

*Посвящается моим сыновьям
Виктору и Роману,
моим внукам
Алексею, Платону, Насте и Вике*

А. Н. ИГНАТОВ

ОПТОЭЛЕКТРОНИКА И НАНОФОТОНИКА

Рекомендовано Сибирским региональным отделением Учебно-методического объединения высших учебных заведений РФ по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации для межвузовского использования в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлениям подготовки «Электроника и наноэлектроника» и «Телекоммуникации»



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ • МОСКВА • КРАСНОДАР
2011

ББК 32.86я73

И 26

Игнатов А. Н.

И 26 Оптоэлектроника и нанофотоника: Учебное пособие. — СПб.: Издательство «Лань», 2011. — 544 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

ISBN 978-5-8114-1136-8

Изложены физические основы работы оптоэлектронных и нанофотонных приборов, рассмотрены основные типы излучающих, фотоприемных и индикаторных приборов, а также вопросы применения оптоэлектронных приборов в аналоговых и цифровых устройствах.

Основное внимание уделено полупроводниковым оптоэлектронным приборам, устройствам и системам, предназначенным для использования в микроэлектронной и наноэлектронной аппаратуре инфокоммуникационных систем. Пособие ориентировано на студентов технических специальностей вузов телекоммуникаций и информатики, а также родственных вузов, где изучаются курсы «Физика», «Физические основы электроники», «Электроника», «Приборы СВЧ и оптического диапазона», «Квантовая и оптическая электроника», и студентов всех форм обучения направлений «Радиотехника», «Проектирование и технологии радиоэлектронных средств», «Телекоммуникации» и «Нанотехнология».

ББК 32.86я73

Рецензенты:

В. И. СЕРЫХ — кандидат технических наук, доцент НГТУ;
А. М. КОПЫЛОВ — кандидат технических наук, доцент МТУСИ

Обложка
Л. А. АРНДТ

*Охраняется законом РФ об авторском праве.
Воспроизведение всей книги или любой ее части
запрещается без письменного разрешения издателя.
Любые попытки нарушения закона
будут преследоваться в судебном порядке.*

© Издательство «Лань», 2011
© А. Н. Игнатов, 2011
© Издательство «Лань»,
художественное оформление, 2011

ПРЕДИСЛОВИЕ

Перспективы развития телекоммуникационных и информационных систем однозначно связаны с совершенствованием микроэлектронной и наноэлектронной элементных баз. Последние пятьдесят лет элементная база развивается в соответствии с законом Г. Мура. Количество элементов в изделиях микроэлектроники и наноэлектроники удваивается каждые два года.

Современные электронные компоненты позволяют создавать малогабаритную, экономичную и надежную электронную аппаратуру. В общей номенклатуре изделий электронной техники оптоэлектронные приборы, устройства и системы являются самыми перспективными.

Изделия оптоэлектроники используют электромагнитное излучение оптического диапазона для приема, обработки, передачи, а также отображения информации. Оптоэлектронные приборы чувствительны к электромагнитному излучению в спектральном диапазоне от инфракрасного до ультрафиолетового. Они широко применяются как излучатели и фотоприемники электромагнитной энергии в этом диапазоне.

Специалисты в области разработки и эксплуатации электронной аппаратуры должны знать как физические основы оптоэлектроники и нанофотоники, так и возможности оптоэлектронной элементной базы.

В книге изложены физические основы работы оптоэлектронных приборов и волноводов, систематизирован материал по излучающим, фотоприемным и индикаторным приборам, рассмотрены вопросы применения оптоэлектронных приборов в аналоговых и цифровых электронных устройствах, большое внимание уделено нанофотонным приборам, устройствам и системам.

Учебное пособие предназначено для студентов технических специальностей вузов телекоммуникаций и информатики, обучающихся по направлениям 210200 «Радиотехника», 210300 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств», 210400 «Телекоммуникации», 210600 «Нанотехнология», и соответствует учебным программам курсов «Физические основы электроники», «Электроника», «Приборы СВЧ и оптического диапазона», «Квантовая и оптическая электроника».

Учебное пособие также будет полезно студентам родственных вузов и учащимся колледжей электронного и радиотехнического профилей.

Автор выражает благодарность А. С. Игнатовой, А. В. Полянской, А. В. Ананьеву, И. Ю. Егорову, Т. А. Сараевой за помощь в подготовке книги к изданию.

проф. А. Н. ИГНАТОВ

ВВЕДЕНИЕ

Физическую основу оптоэлектроники составляют процессы преобразования электрических сигналов в оптические и оптических в электрические, процессы распространения излучения в видимой, инфракрасной и ультрафиолетовой областях спектра в различных средах, а также процессы взаимодействия электромагнитных излучений оптического диапазона с веществом.

Оптоэлектроника синтезирует достижения ряда областей науки и техники: квантовой электроники, полупроводниковой электроники, микроэлектроники. При разработке оптоэлектронных приборов широко используются возможности технологии производства интегральных микросхем. Основу практически любой оптоэлектронной системы составляют генераторы когерентного и некогерентного излучения. Генераторы когерентного излучения получили название «лазеры». Большую группу источников некогерентного излучения составляют светодиоды.

Применение оптоэлектронных приборов позволяет:

- создавать каналы связи с высокой информационной емкостью;
- создавать запоминающие устройства с высокой плотностью записи информации (10^8 бит/см²);
- передавать электромагнитную энергию концентрированно и с малыми потерями;
- обеспечивать параллельную обработку больших объемов информации при использовании временной и пространственной модуляции светового луча;
- создавать близкие к идеальным элементы развязки входов и выходов устройств связи;
- создавать устройства индикации и отображения информации;
- создавать системы распространения образов;
- создавать перспективные типы интегрально-оптических устройств и систем.

Оптоэлектроника относится к разделу функциональной электроники и является перспективным направлением микроэлектроники и наноэлектроники. Использование оптоэлектронных приборов облегчает решение проблемы комплексной микроминиатюризации аппаратуры связи путем замены традиционных элементов связи (трансформаторов, реле, контактов и др.) и создания принципиально новых устройств хранения, отображения и обработки информации.

ВВЕДЕНИЕ В ОПТОЭЛЕКТРОНИКУ

1.1. ВВЕДЕНИЕ В ВОЛОКОННУЮ ОПТИКУ

С фундаментальной точки зрения между световыми и другими электромагнитными волнами, например радиоволнами, не существует отличий за исключением того, что световые волны имеют значительно более высокую частоту.

Спектр электромагнитных волн, представленный на рис. 1.1, простирается от длин волн в несколько тысяч километров до космических лучей с длинами волн в триллионную часть метра [4]. В этом спектре нет пробелов, однако существуют наложения или слияния некоторых областей, что означает отсутствие четких границ между смежными областями. Поэтому использование того или иного диапазона данного спектра для передачи информации в первую очередь определяется параметрами среды распространения электромагнитных волн, в частности показателем затухания, стабильностью постоянных распространения и др. Диапазоны частот, для которых обеспечиваются наилучшие условия распространения электромагнитных волн, называют окнами прозрачности среды. Для передачи информации посредством световых волн используется не весь оптический спектр, расположенный между микроволнами и x -лучами и включающий длины волн в диапазоне от 10 нм до 1 мм. В пределах этого диапазона находится ультрафиолетовое излучение, видимый свет и инфракрасное излучение. Термин «видимый свет» кажется избыточным, однако использование его в ряде случаев необходимо, так как в некоторых книгах ультрафиолетовое и инфракрасное излучение называются ультрафиолетовым и инфракрасным светом соответственно. Видимый свет определяется как излучение, оказывающее влияние на наши зрительные рецепторы, с длиной волны от 380 до 780 нм, т. е. от фиолетового до красного цвета, охватывающее лишь малую часть

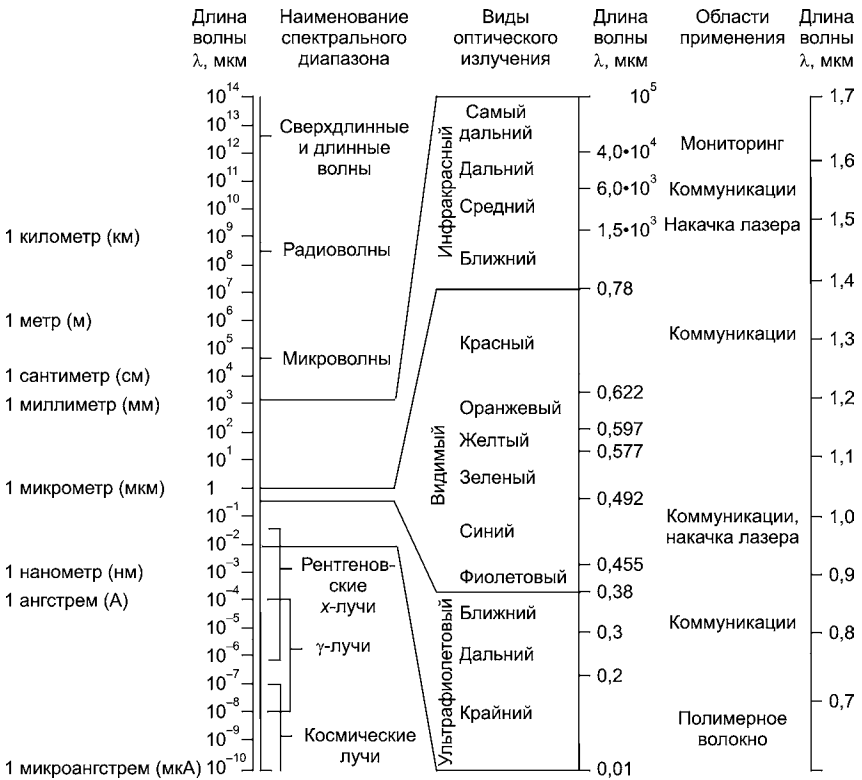


Рис. 1.1

Электромагнитный спектр и области его применения в волоконной оптике

электромагнитного спектра. Свет сам по себе не имеет цвета, но эти волны, возбуждая рецепторы глаза, создают цветовые образы, и это свойство световой волны позволило реализовать простейшие способы передачи информации на расстояния видимости. По аналогии с проводной связью для увеличения дальности передачи за счет направленного распространения световой волны были исследованы различные оптически прозрачные материалы, на основе которых разработаны оптические волноводы, называемые впоследствии оптическими волокнами. Последние, в свою очередь, создали возможность успешного использования отработанных к тому времени оптоэлектронных технологий для высокоскоростной передачи большого объема информации на значительные расстояния. Это направление техники носит название волоконной оптики и в настоящее время интенсивно развивается. Сейчас в воло-

конной оптике используются длины волн приблизительно от 820 до 1650 нм, что определяется как инфракрасное излучение (в соответствии с рис. 1.1), хотя иногда оно также называется просто светом, потому что его можно контролировать и измерять при помощи приборов, сходных с приборами, используемыми для измерений в области видимого света.

Очевидно, что для осуществления передачи информации по оптическому волокну недостаточно наличия самого волокна, для этой цели необходимы еще как минимум источник и приемник излучения, а для передачи на дальние и сверхдальние расстояния — ретрансляторы или оптические усилители. Кроме того, исходную информацию необходимо представить в виде оптического сигнала, что осуществляется путем модуляции источника оптического излучения, а затем восстановить ее на приемной стороне с помощью оптического приемника, включающего демодулятор. Таким образом, простейшая система передачи должна состоять как минимум из модулируемого источника оптического излучения, оптического волокна, оптических ретрансляторов или усилителей и оптического приемника.

1.2. ОСОБЕННОСТИ ОПТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Необходимость дальнейшего освоения оптического диапазона и перенесение на него хорошо развитых в настоящее время методов радиофизики, радиотехники и электроники определяются рядом принципиальных обстоятельств [4]:

- Частота электромагнитных колебаний (несущая частота ν_0) в оптическом диапазоне существенно выше, чем в радиодиапазоне. Например, частота световых колебаний в наиболее освоенной видимой и ближней инфракрасной областях спектра ($\sim 10^{15} \dots 10^{13}$ Гц) в миллионы раз превышает частоту радиоволн в областях радио- и телевидения. Это определяет высокую информационную емкость оптического канала связи. Напомним, что для передачи обычного телевизионного изображения требуется полоса частот $\Delta\nu \approx 5$ МГц. Поэтому в метровом диапазоне (при $\lambda = 1$ м $\nu_0 = 300$ МГц) можно передать лишь около десятка телевизионных программ. В оптическом диапазоне при том же отношении $\Delta\nu/\nu_0$ их число возрастает в миллионы раз.
- Длина световых волн существенно меньше длины радиоволн. Это позволяет получить высокую концентрацию оптического излучения в пространстве. Поперечные размеры волноводов,

по которым излучение может передаваться с малыми потерями, также должны быть примерно равными длине волны. Поэтому оптические волноводы (световоды) при прочих равных условиях обладают существенно меньшими (на несколько порядков) размерами по сравнению с СВЧ-волноводами, что важно с точки зрения микроминиатюризации электронной аппаратуры. И наконец, в оптическом диапазоне нетрудно сформировать узкую диаграмму направленности излучения с углом расходимости $0,1^\circ$ и меньше. Для формирования подобной диаграммы в радиодиапазоне (при $\lambda = 1$ м) потребовалась бы антенна диаметром несколько сотен метров. В оптическом диапазоне функцию такой антенны способны выполнить, например, сферическое зеркало или линза умеренных размеров; размер антенны должен быть пропорционален длине волны.

- Передача информации осуществляется фотонами. В отличие от электронов, которые служат основными носителями информации в обычных электронных приборах, фотоны являются электрически нейтральными частицами, не взаимодействующими между собой и с внешними электрическим и магнитным полями. Это определяет возможность идеальной гальванической развязки входа и выхода, однонаправленность потока информации, высокую помехозащищенность, исключение взаимных наводок и паразитных связей между различными элементами схемы. Поэтому использование оптических методов в современной микроэлектронике заметно расширяет ее функциональные возможности, позволяя реализовывать многоканальные сложные связи и осуществлять «оптический монтаж» исходя лишь из требуемых функциональных задач. Так как фотон в оптоэлектронных системах является основным носителем информации, то оптоэлектронику, как и электронику, тоже называют фотоникой.
- Применение оптических методов записи, хранения и обработки информации открывает новые возможности для построения ЭВМ. Это обусловлено, с одной стороны, возможностью реализации новых принципов параллельной обработки информации (например, на основе голографических методов), а с другой — возможностью достижения высокой плотности записи информации ($\sim 10^8$ бит/см²) в оптических запоминающих устройствах.

На сегодняшний день реализована лишь небольшая часть перечисленных преимуществ оптической электроники, которая, по

мнению специалистов, будет в значительной мере определять технику завтрашнего дня. Для реализации этих преимуществ необходимо, прежде всего, понимать физические процессы взаимодействия оптического излучения с веществом, ибо они являются фундаментом всей квантовой и оптической электроники.

Квантовая электроника — область науки и техники, исследующая и применяющая квантовые явления для генерации, усиления и преобразования когерентных электромагнитных волн.

Оптоэлектроника — область науки и техники, исследующая и применяющая процессы взаимодействия оптического излучения с веществом для передачи, приема, переработки, хранения и отображения информации.

Оптическое излучение — электромагнитное излучение оптического диапазона.

Оптический диапазон спектра составляют электромагнитные колебания, длина волн которых находится в пределах от 10 нм до 1 мм. Внутри оптического диапазона выделяют видимое ($\lambda = 0,38...0,78$ мкм), инфракрасное ($\lambda = 0,78...1000$ мкм) и ультрафиолетовое ($\lambda = 0,01...0,38$ мкм) излучение.

Световые волны — электромагнитные волны оптического диапазона.

Монохроматическое излучение — оптическое излучение, характеризующееся какой-либо одной частотой (одной длиной волны) световых колебаний.

Квантовый усилитель — усилитель электромагнитных волн, основанный на использовании вынужденного излучения.

Квантовый генератор — источник когерентного излучения, основанный на использовании вынужденного излучения.

Лазер — квантовый генератор оптического излучения (оптический квантовый генератор).

Мазер — квантовый генератор электромагнитного излучения радиодиапазона.

Вынужденное излучение — когерентное электромагнитное излучение, возникающее в результате вынужденного испускания.

Вынужденное испускание — когерентное испускание фотона при квантовом переходе системы в результате взаимодействия с внешним электромагнитным полем.

Когерентность — согласованное протекание во времени и в пространстве колебательных или волновых процессов. Электромагнитная волна называется когерентной, если ее амплитуда, частота, фаза, направление распространения и поляризация постоянны или изменяются по определенному закону (упорядоченно).

1.3. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Оптика — одна из древнейших наук. Освоение оптического излучения можно разделить на два больших исторических этапа [4, 22].

Первый этап связан в основном с излучением, наблюдаемым непосредственно глазом, со свойствами видимого света и соответствует развитию классической оптики.

Эволюция взглядов на природу света иллюстрирует диалектический характер познания. Великие мыслители древности считали, что световые лучи исходят из глаз (Платон). На основе учения о зрительных лучах, исходящих из глаз, Евклид, Птолемей и другие создали теорию отражения света от плоских и сферических зеркал и положили начало геометрической оптике. Теории зрительных лучей в древности противопоставлялась еще более фантастическая теория Эпикура и Лукреция о «слепках» с предметов, летящих во всех направлениях и попадающих в глаз. Затем появилась корпускулярная концепция, или теория истечения, поддерживаемая вначале Декартом, а затем Ньютоном. Согласно этой теории свет представляет собой совокупность мельчайших частиц — корпускул, движущихся по определенной траектории — световому лучу. Этой теорией наглядно и естественно объяснялись такие явления, как прямолинейное распространение света в однородных средах, отражение света от зеркальной поверхности, преломление светового луча на границе двух сред, а также его искривление при распространении в неоднородных средах. Одновременно Х. Гюйгенсом была предложена интерпретация тех же явлений на основе понятий световой волны и волновой поверхности. Свет представляет собой волны, распространяющиеся в пространстве. Лучи света являются чисто абстрактным понятием и определяются как кривые, ортогональные волновым поверхностям.

Главным доводом Ньютона против волновой теории было отсутствие вещественной среды («эфира») в мировом пространстве. Явления, связанные с периодичностью (кольца Ньютона), в корпускулярной теории объяснялись тем, что частицы вращаются. Пространство, пробегаемое частицей за один оборот, сопоставлялось с некой «длиной волны». Полярность (поляризацию в современной терминологии) Ньютон считал свойством только твердых частиц. Огибание, дифракцию он пытался истолковать «отталкивательным» и «притягательным» действием вещества на световые корпускулы. Вслед за Ньютоном в XVIII в. большинство ученых

стали склоняться к корпускулярной теории, а волновая теория, блестяще развитая Гюйгенсом, сохранила лишь немногих последователей.

Только на рубеже XVIII–XIX вв. англичанином Т. Юнгом были начаты серьезные исследования интерференции и дифракции, а французом О. Френелем дано их полное теоретическое объяснение на основе волновой теории Гюйгенса. Кроме того, Френель показал, что представления о волновой природе не противоречат факту прямолинейности распространения света в однородной среде. Качественной и количественной точностью своих предсказаний волновая теория в первой половине XIX в. победила теорию истечения. К концу XIX в. Д. Максвелл дал волнам Френеля электромагнитную интерпретацию и показал, что всякая световая волна является электромагнитным возмущением особого рода. Опыты Г. Герца и А. С. Попова экспериментально подтвердили это.

Электромагнитная теория, обобщенная в виде системы дифференциальных уравнений Максвелла, явилась вершиной первого, «классического» этапа развития оптики и наших представлений о природе света.

Второй этап тесно связан с теми революционными преобразованиями, которые претерпела физика в начале XX в. Характерно, что именно изучение оптических спектров поглощения и испускания привело к необходимости введения понятий квантовых скачков и кванта действия h как минимального действия; их ввел в 1900 г. М. Планк для объяснения спектра излучения черного тела. Впоследствии постоянная h , имеющая размерность «действия» [Дж·с], была названа постоянной Планка. В 1905 г. А. Эйнштейн на основе теории Планка возродил в новой форме корпускулярную теорию света, предположив, что планковские кванты энергии $E = h\nu$ существуют в виде реальных частиц, названных им световыми квантами, или фотонами. Таким образом, Эйнштейну удалось объяснить открытый ранее фотоэффект. Применяя эти понятия к атому, Нильс Бор в 1913 г. объяснил простую связь частоты излучения ν с разницей энергий между уровнями — E_n и E_m :

$$\nu_{nm} = \left(\frac{E_n - E_m}{h} \right). \quad (1.1)$$

Фундаментальной для последующего развития квантовой электроники стала работа А. Эйнштейна (1917), в которой он на основе рассмотрения термодинамического равновесия системы молекул ввел понятие об индуцированном излучении. На возможность использования индуцированного излучения для наблюдения

отрицательного поглощения (усиления) впервые указал В. А. Фабрикант (1940).

В 1954 г. Н. Г. Басов и А. М. Прохоров разработали конкретный проект, а Ч. Таунс создал действующий мазер на пучке молекул аммиака. Это был первый прибор, работавший по квантовым принципам, в основу которого положено явление усиления электромагнитных колебаний с помощью индуцированного излучения. За эту работу советским ученым Н. Г. Басову и А. М. Прохорову была присуждена Ленинская, а затем Нобелевская (совместно с американским физиком Ч. Таунсом) премии. Таким образом, 1954 г. может быть назван годом рождения квантовой электроники как самостоятельной науки.

Методы, развитые первоначально в радиодиапазоне (первый аммиачный мазер работал на длине волны 1,25 см), использовали в оптическом диапазоне, и в 1960 г. был создан рубиновый лазер, а в 1961 г. — газовый лазер на смеси гелия и неона. Наука и техника впервые получили в распоряжение когерентный источник световых волн. Это дало толчок развитию таких новых областей науки, как нелинейная оптика, голография и др. Основополагающие работы по голографии были выполнены Д. Габором и Ю. Н. Денисюком.

Параллельно с развитием квантовой радиофизики и квантовой электроники быстрыми темпами развивалась физика полупроводников и полупроводниковая электроника. Успехи в этих областях привели к созданию эффективных полупроводниковых фотоприемников и генераторов света, т. е. приборов, составляющих основу полупроводниковой оптоэлектроники. Главные вехи в ее развитии таковы. В 1873 г. В. Смит обнаружил в слоях селена фотопроводимость, т. е. изменение сопротивления под действием освещения, открыв тем самым внутренний фотоэффект. Внешний фотоэффект был открыт в 1888 г. А. Г. Столетовым. В 1923 г. О. В. Лосев наблюдал свечение кристаллов карборунда (карбида кремния) под действием электрического тока и дал правильное объяснение этому явлению, которое стало основой действия современных электролюминесцентных источников света. В 1960 г. в Физическом институте АН СССР в Москве был рассмотрен принцип работы полупроводникового инжекционного лазера, а в 1962 г. в Физико-техническом институте АН СССР в Ленинграде было обнаружено эффективное рекомбинационное излучение и наблюдалось вынужденное излучение в кристаллах арсенида галлия. Параллельно в Физико-техническом институте Ж. И. Алферов с сотрудниками успешно вел работы по получению гетеропереходов и созданию на их базе эф-

фективных приемников и источников света. В 1968–1970 гг. ими были созданы низкопороговые полупроводниковые лазеры, в том числе работающие в непрерывном режиме при комнатной температуре. Важным моментом в развитии оптической электроники стало получение оптических волокон с низкими потерями (< 1 дБ/км), которое обеспечило возможность их применения в качестве эффективных оптических волноводов. Разработка эффективных полупроводниковых лазеров, работающих в непрерывном режиме, и создание оптических волокон с малыми потерями привели к рождению и быстрому развитию новой системы передачи информации через волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) и созданию волоконно-оптических систем передачи (ВОСП).

В истории науки можно выделить пять поколений ВОСП.

ВОСП первого поколения (1977–1980) использовали диапазон длин волн 0,8...0,9 мкм и позволяли обрабатывать цифровые потоки со скоростью 45 Мбит/с.

ВОСП второго поколения (1980–1983) в качестве рабочей использовали длину волны 1,31 мкм, а скорость обработки цифровых потоков составляла 500 Мбит/с.

Системы передачи третьего поколения (1983–1990) исследовали в качестве излучателей лазеры, у которых длина волны составляла 1,31 и 1,55 мкм, а скорость обработки цифровых потоков — 2 Гбит/с.

В 1989–1994 гг. активно велись разработки ВОСП четвертого поколения. Они работали на длине волны 1,55 мкм, скорость обработки цифровых потоков составляла 10 Гбит/с. В состав ВОСП четвертого поколения входят волоконные оптические усилители.

С 1994 г. создаются широкополосные ВОСП пятого поколения. Их рабочие длины волн находятся в диапазоне 1,53...1,61 мкм. Системы используют спектральное уплотнение и несколько источников света. Предусматривается объединение каналов со скоростью обработки цифровых потоков 10 Гбит/с. В многоканальных ВОСП пятого поколения достигается производительность 1 Тбит/с. Работы по повышению скорости передачи продолжаются.

Развитие ВОСП способствует ускорению внедрения всех технологий широкополосного доступа. Это иллюстрирует рис. 1.2.

В докладе на XXIX Европейской конференции по оптической связи (ЕСОС-2003) Маурицио Дечина рассмотрел перспективы развития сетей связи и информационных услуг в ближайшем десятилетии. Прежде всего, характерной чертой останется экспоненциальный рост как потребностей в информации, так и технических возможностей их удовлетворения.

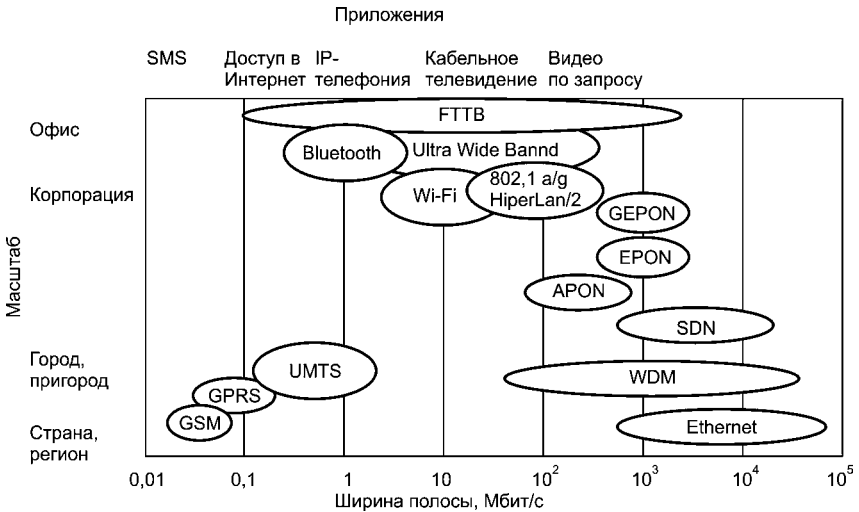


Рис. 1.2
Развитие магистральных
и городских волоконно-оптических и радиосетей

Последние три десятилетия наблюдается активное развитие магистральных цифровых сетей по технологии SDN (Synchronous Digital Hierarchy — синхронно-цифровой иерархии) — технологии транспортных телекоммуникационных сетей, обеспечивающих скорость передачи информации от 155 Мбит/с до 10 Гбит/с. Последнее десятилетие характеризуется внедрением технологии WDM (Wavelength division multiplexing — мультиплексирование с разделением по длине волны), использующей спектральное уплотнение каналов; достигнута скорость 3,2 Тбит/с.

Разработан и внедряется стандарт OTH (Optical Transport Hierarchy — оптическая трансформаторная иерархия) — стандарт гибких мультисервисных оптических сетей.

Разработаны и внедряются сети доступа PON (Passive optical network — пассивные оптические системы); скорости до 10... 100 Гбит/с.

Ethernet (синоним стандарта IEEE 802.3) — сеть передачи данных со случайным методом доступа к среде с разрешением конфликтов (коллизий) CSMA/CD. G-Ethernet (Gigital Ethernet) — пакетная технология передачи информации компьютерных сетей (скорость 1...10 Гбит/с), а также FDDI (Fiber Distributed Data Interface) — распределенный волоконный интерфейс передачи данных в локальных сетях (скорость 100 Мбит/с).

Применяются также гибридные волоконно-коаксиальные сети HFC (Hibrid Fiber Coax) и полностью оптические сети AON (All-Optical Networks).

Развитие сетей связи сопровождается соответствующим ростом ключевых технических показателей, таких как мощность процессоров, объем памяти, скорость обмена информацией и др. В то же время важным моментом будет перевод всех информационно-телекоммуникационных услуг на использование интернет-протокола, в том числе приложений реального времени (голоса, видео).

На транспортном уровне глобальных и городских сетей связи определено будут доминировать оптические (фотонные) технологии передачи информации, развитие же сетей доступа будет определяться конкуренцией оптических технологий и различных беспроводных технологий, которые могут использоваться как дополнение или альтернатива волоконной оптике. К быстро развивающимся технологиям беспроводного доступа относятся Wi-Fi, Ultra Wide Band, Ad Hoc Networks, Sensor networks, RFID и др.

1.4. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ

В настоящее время оптоэлектроника возглавляет список полупроводниковых приборов с наибольшим объемом продаж (до 18 млрд долларов США). Значительный объем продаж приходится на рынок светоизлучающих диодов (СИД). СИД выполняются на основе гетероэпитаксиальных структур и обеспечивают световую отдачу более 25 лм/Вт (лампы накаливания 15 лм/Вт). На основе суперярких СИД создаются крупноформатные цветные уличные экраны. Крупнейший в мире дисплей размером 36×27 м установлен в Нью-Йорке. Он содержит 19 млн штук СИД красного, зеленого и синего цветов, передающих более одного миллиарда цветов и оттенков. Экран воспроизводит текстовую, графическую и видеoinформацию, формируя четкие цветные изображения высокого качества, и работает со стандартными видео- и компьютерными источниками сигналов.

Широкое внедрение гигантских уличных экранов ограничивается их высокой стоимостью (55 тыс. долл./м²). Снижение ее на порядок сделает этот вид продукции рентабельным. Перспективно использование для этих целей дешевых СИД на основе органических и полимерных материалов (OLED).

Полноцветные информационные экраны на основе полимерных материалов имеют ряд преимуществ перед ЖКЭ:

- относительная дешевизна;
- простота технологии изготовления;
- низкое напряжение питания (3...4 В);
- очень высокая скорость переключения;
- широкий выбор цветов и высокая четкость изображения.

Оптоэлектронные приборы являются перспективными элементами сотовых телефонов, а именно портативных дисплеев, к которым предъявляются следующие основные требования:

- снижение стоимости, веса и энергопотребления;
- повышение надежности и долговечности;
- улучшение качества воспроизведения информации;
- повышение быстродействия.

Переход к цветным дисплеям с высоким разрешением (вплоть до 800×600 пикселей) и быстродействием, превышающим 100 кбит/с, возможен при их производстве на основе органических СИД.

Полупроводниковые излучатели «белого света» успешно заменяют лампы накаливания. В 2010 г. эффективность СИД достигла 50 лм/Вт и более 10% мирового рынка ламп накаливания заменили СИД. Экономия электроэнергии составила 40 млрд долларов (это эквивалентно годовому производству энергии 40 атомных станций).

В настоящее время ведется разработка полноцветных (кластерных) ламп, состоящих из нескольких СИД красного, зеленого и синего цветов свечения.

Интенсивно ведется разработка высокоэффективных фотоприемников УФ–ИК-диапазона волн.

Наиболее перспективными направлениями использования фотоприемников и изделий на их основе являются:

- системы цифровой регистрации, обработки и передачи изображений;
- телевизионные системы нового поколения, в частности высокой четкости изображения;
- системы наземной и ИК-связи и мониторинга.

Развитие оптоэлектронных ИМС позволяет повысить быстродействие и надежность функционирования современных волоконно-оптических линий передачи информации, электронно-вычислительных машин нового поколения, заменить в электронной технике мало надежные и неэкономичные электромагнитные реле, разработать и создать системы промышленной автоматизации и телемеханики, а также системы защиты от несанкционированного доступа.

Электронная промышленность Российской Федерации в настоящее время ориентирована на массовый выпуск лазеров и СИД на основе гетероструктур. За развитие и внедрение работ в этой области Ж. И. Алферов в 2000 г. был удостоен Нобелевской премии.

Использование квантовых эффектов в наноструктурах позволяет создавать компактные, экономичные и долговечные полупроводниковые лазеры, пороговая плотность тока которых от 10 до $100 \text{ А}\cdot\text{см}^{-2}$.

Налажено производство суперярких СИД силой света 2 кд при токе 20 мА и функционально законченных изделий на их основе. Начат выпуск высокоэффективных гетероструктур, обеспечивающих интенсивность электролюминесценции не менее 70 мкд при токе 20 мА. Проводятся работы по замене ламп накаливания полупроводниковыми излучателями.

1.5. СИСТЕМА ОБОЗНАЧЕНИЙ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ ИНДИКАЦИИ

При старой системе обозначений полупроводниковых приборов светоизлучающие диоды обозначались двумя буквами: первая указывала на исходный материал, вторая служила признаком прибора-индикатора. Например, обозначение светоизлучающего диода АЛ102 расшифровывалось так: А — арсенид галлия или фосфид галлия; Л — индикатор из единичного излучающего диода; 102 — порядковый номер разработки. Если индикатор представлял собой ряд или матрицу диодов, то в обозначение добавлялась буква «С». Например, обозначение АЛС331 означает: полупроводниковый индикатор на основе фосфида галлия, состоящий из нескольких светоизлучающих диодов, в данном случае из двух.

В связи с развитием семейства полупроводниковых светоизлучающих индикаторов, расширением их классов система обозначений была усовершенствована.

По ОСТ 11.339.015-18 полупроводниковые приборы, выполняющие функцию индикации, обозначаются девятью элементами: первый, буква «К», указывает, что прибор широкого общепромышленного назначения; второй «И» обозначает индикатор; третий «П» — полупроводниковый; четвертый «Д» — единичный светоизлучающий диод (буква «М» указывает, что светодиод специфического применения — для мнемонических табло); пятый — номер разработки (номера от 01 до 99 — со схемой управления); шестой — буква русского алфавита, обозначает, как и в старой

системе, к какой группе относится прибор; седьмой — цифра, указывающая число диодов в индикаторе (при обозначении светоизлучающих диодов единица может опускаться); восьмой — буква, обозначающая цвет: К — красный, Л — зеленый, Г — голубой, Ж — желтый, Р — оранжевый, С — синий, М — многоцветный; девятый — цифра, обозначающая модификацию прибора (5 — это прибор бескорпусной). Например, ИПД04А-1К расшифровывается так: индикатор полупроводниковый из единичного светоизлучающего диода, без схемы управления, группа А, красного цвета свечения. Прибор КИПД03А-1Ж-5 — индикатор полупроводниковый из единичного светоизлучающего диода, без схемы управления, группа А, желтого цвета свечения, бескорпусной.

1.6. СИСТЕМА ОБОЗНАЧЕНИЙ ФОТОПРИЕМНЫХ ПРИБОРОВ И ОПТРОНОВ

С 1973 г. обозначения фотоприемных приборов состоят из трех элементов.

Первый элемент — буква или цифра обозначает материал:

- Г или 1 — германий и его соединения;
- К или 2 — кремний и его соединения;
- А или 3 — соединения галлия.

Второй элемент — буква, указывающая класс прибора:

- Д — диоды;
- Н — тиристоры диодные;
- У — тиристоры триодные;
- Т — транзисторы биполярные;
- П — транзисторы полевые.

Третий элемент — число, указывающее назначение и качественные свойства прибора, а также порядковый номер разработки.

Четвертый элемент — буква, указывающая разновидность типа из данной группы приборов (подразделение на параметрические группы).

В обозначениях оптронов первая буква или цифра определяет материал излучателя (А или 3 — GaAlAs или GaAs), вторая буква (О) указывает на принадлежность прибора к классу оптопар, третья — отражает тип фотоприемника. Резисторные оптопары сохраняют исторически сложившиеся обозначения ОЭП (оптоэлектронные приборы). Некоторые из оптоэлектронных изделий имеют отличные от указанных выше обозначения. Например, К249КН1 — микросхема оптоэлектронного аналогового ключа, состоящего из двух диодных оптопар и двух биполярных транзисторов.

Тестовые вопросы к главе 1
«ВВЕДЕНИЕ В ОПТОЭЛЕКТРОНИКУ»

- 1.1. Какая длина волны соответствует верхней границе оптического диапазона:
 - а) 0,1 мкм;
 - б) 0,5 мкм;
 - в) 1 мм;
 - г) 10 мм?
- 1.2. Какая длина волны соответствует нижней границе оптического диапазона:
 - а) 1 нм;
 - б) 10 нм;
 - в) 100 нм;
 - г) 1 мкм?
- 1.3. Какая длина волны соответствует инфракрасному излучению:
 - а) 0,3 мкм;
 - б) 0,6 мкм;
 - в) 0,5 мкм;
 - г) 1 мкм?
- 1.4. Какая длина волны соответствует ультрафиолетовой области спектра:
 - а) 0,3 мкм;
 - б) 0,7 мкм;
 - в) 0,9 мкм;
 - г) 12 мкм?
- 1.5. Укажите цифрами правильную последовательность цветов, соответствующих видимой области спектра (в порядке убывания длины волны):
 - а) голубой;
 - б) зеленый;
 - в) фиолетовый;
 - г) оранжевый;
 - д) желтый;
 - е) красный;
 - ж) синий.
- 1.6. Какое обозначение соответствует излучательному прибору:
 - а) КТ315А;
 - б) КД252В;
 - в) АЛ102В;
 - г) КП103Ж?
- 1.7. Какое обозначение соответствует фотоприемному прибору:
 - а) КТ814А;
 - б) ФД252А;
 - в) АОУ103;
 - г) АЛС331А?
- 1.8. Какое обозначение соответствует индикаторному прибору:
 - а) АЛС331;
 - б) АЛ103А;
 - в) АЛ102В;
 - г) АОТ101А?
- 1.9. Какое обозначение соответствует оптрону:
 - а) АЛС316А;
 - б) АП601В;
 - в) АОТ301А;
 - г) ЗЛ341Г?
- 1.10. Какие частицы переносят оптическую энергию:
 - а) фотоны;
 - б) фононы;
 - в) электроны;
 - г) дырки?

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

2.1. РАЗЛИЧИЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

По принципу преобразования энергии оптического излучения в конечный сигнал, регистрируемый измерительными приборами, все фотоприемники можно подразделить на две основные группы. К первой относятся термоэлементы (болометры), твердотельные и вакуумные фотоэлементы, в которых энергия оптического излучения преобразуется в электрический ток. Ко второй группе можно отнести фотоэмульсионные слои и человеческий глаз. Энергия оптического излучения приводит к возникновению фотохимических реакций, протекающих в фотоэмульсионном слое, нанесенном на фотопластину, либо к раздражению нервных окончаний на глазной сетчатке. Глаз относят к фотоприемнику высокой чувствительности, который избирательно (селективно) реагирует на свет разных длин волн (380...780 нм).

Для описания оптического излучения, воздействующего на первую группу фотоприемников, пользуются энергетическими характеристиками:

- энергетическая экспозиция;
- поток излучения;
- энергетическая светимость;
- облученность поверхности.

Оптическое излучение, воздействующее на сетчатку глаза или фотопластину, принято характеризовать фотометрическими параметрами:

- световой поток;
- сила света;
- освещенность;
- яркость;
- светимость.

2.2. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

2.2.1. ФУНКЦИЯ ВИДНОСТИ И ЕЕ ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ДЛИНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

Опыт показывает, что глаза большинства людей, не страдающих дефектами зрения, обладают максимальной чувствительностью к оптическому излучению с длиной волны $\lambda = 555$ нм (зеленый свет).

Интенсивность нервного раздражения, возникающего в нервных окончаниях сетчатки глаза под воздействием света, принято характеризовать функцией видности $F(\lambda)$. При $\lambda = 555$ нм $F = F_{\max}$. При $\lambda = 400$ нм, $\lambda = 760$ нм $F = F_{\min}$, как видно на рис. 2.1.

Аналитический вид функции $F(\lambda)$ достаточно сложен. Поэтому для практических целей достаточно воспользоваться относительной функцией видности

$$V(\lambda) = \frac{F(\lambda)}{F_{\max}}. \quad (2.1)$$

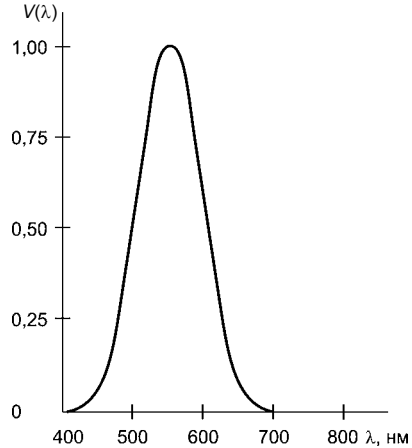


Рис. 2.1
Экспериментальная зависимость относительной функции видности V от длины волны для среднего (бездефектного) человеческого глаза

Таблица 2.1

Зависимость относительной функции видности V человеческого глаза от длины электромагнитной волны λ

λ , нм	$V(\lambda)$	λ , нм	$V(\lambda)$	λ , нм	$V(\lambda)$	λ , нм	$V(\lambda)$	λ , нм	$V(\lambda)$
400	0,004	480	0,139	555	1,000	630	0,265	710	0,002
410	0,0012	490	0,208	560	0,995	640	0,175	720	0,001
420	0,004	500	0,323	570	0,952	650	0,107	730	0,0005
430	0,012	510	0,503	580	0,870	660	0,061	740	0,0002
440	0,023	520	0,710	590	0,757	670	0,032	750	0,0001
450	0,038	530	0,862	600	0,631	680	0,017	760	0,00006
460	0,060	540	0,954	610	0,503	690	0,008		
470	0,091	550	0,995	620	0,381	700	0,004		

Функция $V(\lambda)$ безразмерна и позволяет установить взаимосвязь между энергетическими и фотометрическими параметрами оптического излучения.

На рис. 2.1 показана экспериментальная зависимость $V(\lambda)$ для среднего (бездефектного) человеческого глаза.

В табл. 2.1 приведены значения $V(\lambda)$ для некоторых длин электромагнитных волн.

2.2.2. ТЕЛЕСНЫЙ УГОЛ, СВЕТОВОЙ ПОТОК И МЕХАНИЧЕСКИЙ ЭКВИВАЛЕНТ СВЕТА

Рассмотрим точечный источник света i , испускающий свет равномерно по всему трехмерному пространству. Выберем в указанном пространстве световой конус с углом α , в вершине которого находится источник света i .

Пересечем световой конус сферической поверхностью S радиусом R . Как видно из рис. 2.2, конус «вырезает» на сферической поверхности площадку площадью ΔS_C .

Рассмотренный световой конус принято характеризовать телесным углом $\Delta\Omega$, который определяется как

$$\Delta\Omega = \frac{\Delta S_C}{R^2} \quad (2.2)$$

и измеряется встерадианах.

Очевидно, что телесному углу $\Delta\Omega = 1$ ср соответствует условие $\Delta S_C = R^2$. Полному телесному углу, при котором точечный источник i излучает свет в сферу радиусом R , соответствует величина $\Delta S_n = 4\pi R^2$. Полный телесный угол определяется по формуле

$$\Omega = \frac{4\pi R^2}{R^2} = 4\pi. \quad (2.3)$$

Пусть монохроматическое излучение длиной волны $\lambda = 555$ нм переносит через площадку ΔS (в соответствии с рис. 2.2) за одну секунду энергию 0,0016 Дж. Полагают, что в данном случае внутри телесного угла $\Delta\Omega$ распространяется световой поток $\Delta\Phi$, равный 1 лм.

Указанное соотношение является международным стандартом для одного люмена.

Таким образом, при $\lambda = 555$ нм

$$\begin{aligned} &0,0016 \text{ Дж/С} = \\ &= 0,0016 \text{ Вт} \sim 1 \text{ лм}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

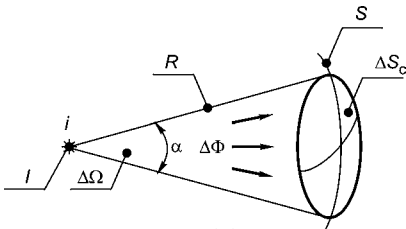


Рис. 2.2
Определение телесного угла

Пропорциональность (2.4) является не только определением люмена, но и единственным связующим звеном между фотометрическими и энергетическими характеристиками оптического излучения.

Величину $A_{\text{э}} = 0,0016$ Вт/лм принято называть механическим эквивалентом света. При $\Delta\Phi = 1$ лм и $\lambda = 555$ нм

$$A_{\text{э}} = 0,0016 \text{ Вт.} \quad (2.5)$$

Относительная функция видности (см. (2.1), рис. 2.1, табл. 2.1 и формулу (2.5)) позволяет рассчитать необходимую мощность излучения P_{λ} , соответствующую световому потоку в 1 лм, для любой длины волны из диапазона 400...760 нм:

$$P_{\lambda} = \frac{A_{\text{э}}}{V(\lambda)}. \quad (2.6)$$

Например, пользуясь табл. 2.1, находим, что световому потоку в 1 лм при длине волны $\lambda = 633$ нм соответствует $V(\lambda) = 0,25$.

Согласно формуле (2.6), для обеспечения такого светового потока необходима мощность

$$P_{\lambda=633} = \frac{A_{\text{э}}}{V(\lambda)} = \frac{0,0016}{0,25} = 6,4 \cdot 10^{-3}.$$

Пусть гелий-неоновый лазер обладает мощностью излучения $P_{\lambda} = 5 \cdot 10^{-3}$ Вт. Очевидно, что световой поток, соответствующий ему, определится из следующих зависимостей: $6,4 \cdot 10^{-3}$ Вт \sim 1 лм, $5 \cdot 10^{-3}$ Вт \sim Φ лм, которым соответствует пропорция

$$\frac{6,4 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3}} = \frac{1 \text{ лм}}{\Phi \text{ лм}},$$

откуда $\Phi = 0,78$ лм.

2.2.3. СИЛА СВЕТА (I_V)

Пусть внутри телесного угла $\Delta\Omega$ распространяется световой поток $\Delta\Phi$ (в соответствии с рис. 2.2).

Величина

$$I_V = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega}, \left[\frac{\text{лм}}{\text{ср}} \right] \equiv [\text{кд}] \quad (2.7)$$

есть сила света источника.

Согласно формуле (2.7) сила света имеет простой физический смысл: это величина, численно равная световому потоку, распространяющемуся в телесном угле $\Delta\Omega = 1$ ср. Единицей силы света является одна кандела (кд). Несмотря на то что сила света I_V

введена нами в фотометрические характеристики через поток $\Delta\Phi$ по соображениям исторического характера, она является в настоящее время основным фотометрическим параметром системы СИ. Согласно международному стандарту *одна кандела равна силе света в заданном направлении, излучаемого монохроматическим источником с частотой $5,4 \cdot 10^{14}$ Гц, излучение которого в указанном направлении составляет $(1/683)$ Вт/ср.*

Согласно формуле (2.7) $1 \text{ кд} = 1 \text{ лм}/1 \text{ ср}$.

2.2.4. ОСВЕЩЕННОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ (E)

Освещенность поверхности определяется как

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}, \quad (2.8)$$

где $\Delta\Phi$ — световой поток, падающий на поверхность площади ΔS . Определение освещенности изображено на рис. 2.3.

Если $\Delta\Phi = 1 \text{ лм}$, $\Delta S = 1 \text{ м}^2$, то освещенность $E = 1 \text{ люкс (лк)}$, т. е. $1 \text{ лк} = 1 \text{ лм}/1 \text{ м}^2$.

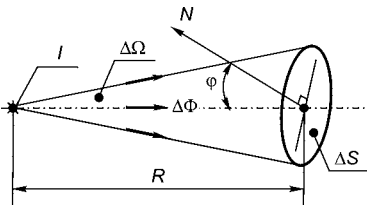


Рис. 2.3
Определение освещенности

2.2.5. ЗАКОН ОСВЕЩЕННОСТИ

Элементарные преобразования позволяют установить взаимосвязь освещенности поверхности E , расстояния R и угла падения света φ на поверхность в соответствии с рис. 2.3 как

$$E = \frac{I}{R^2} \cos \varphi. \quad (2.9)$$

Формула (2.9) носит название *закона освещенности*.

2.2.6. СВЕТИМОСТЬ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ (M)

До сих пор мы рассматривали точечные источники света. Всякий реальный источник имеет конечные размеры. Пусть светящаяся площадка площадью ΔS излучает свет в полусферу, которой соответствует телесный угол $\Delta\Omega = 2\pi$ ср, как изображено на рис. 2.4. Обозначим $\Delta\Phi_{\text{ПС}}$ световой поток, излучаемый площадью ΔS в полусферу.

Величина $M = \frac{\Delta\Phi_{\text{ПС}}}{\Delta S}$ (лм/м²) есть светимость излучающей поверхности ΔS .

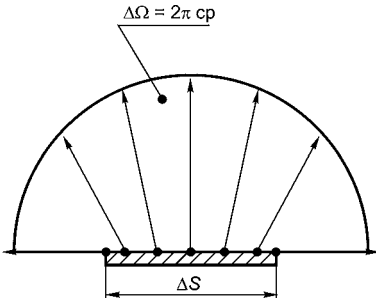


Рис. 2.4
Определение светимости

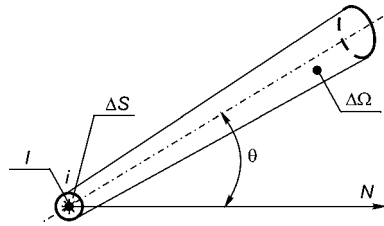


Рис. 2.5
Определение яркости

Согласно (2.9) и рис. 2.4 светимость M численно равна световому потоку, излучаемому с единицы площади светящейся поверхности в телесный угол 2π ср.

**2.2.7.
ЯРКОСТЬ СВЕЯЩЕЙСЯ ПОВЕРХНОСТИ (L)**

Пусть светящаяся поверхность площади ΔS излучает световой поток $\Delta\Phi$ в телесный угол $\Delta\Omega$, ось симметрии которого составляет угол Θ с нормалью \vec{N} к излучающей поверхности, как показано на рис. 2.5.

Величина

$$L = \frac{I}{\Delta S \cos\Theta} \tag{2.10}$$

есть яркость светящейся поверхности.

**2.2.8.
ЗАКОН ЛАМБЕРТА**

В 1760 г. немецким ученым Ламбертом было показано, что если площадь ΔS не только излучает свет, но еще и идеально равномерно рассеивает его по всем направлениям, яркость излучения L не зависит от угла Θ , входящего в формулу (2.10).

Согласно закону Ламберта

$$L_V = \text{const} \tag{2.11}$$

для любых Θ , входящих в формулу (2.10).

Элементарные преобразования показывают, что для ламбертовского источника взаимосвязь светимости излучающей поверхности M_V и ее яркости L_V имеет вид

$$M_V = \pi L_V. \tag{2.12}$$

2.2.9. СВЕТОВАЯ ЭКСПОЗИЦИЯ (H_V)

Световой экспозицией H (лк·с) называется произведение освещенности поверхности E и времени t , в течение которого происходит облучение поверхности. По определению

$$H = Et. \quad (2.13)$$

Таблица 2.2

Перечень основных фотометрических (световых) параметров

Наименование фотометрических величин	Аналитическое выражение	Размерность в СИ
Сила света	I_V	Кандела (кд)
Световой поток	$\Delta\Phi = I_V\Delta\Omega$	Люмен (лм)
Освещенность поверхности	$E_V = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}$	Люкс (лк), люмен на квадратный метр (лм/м ²)
Светимость излучающей поверхности	$M_V = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}$	Люмен на квадратный метр (лм/м ²)
Яркость светящейся поверхности	$L = \frac{I_V}{\Delta S \cos\Theta}$	Кандела на квадратный метр (кд/м ²)

В табл. 2.2 приведены основные фотометрические характеристики, их размерности в СИ и аналитические выражения для них.

2.3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

2.3.1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭКСПОЗИЦИЯ (H_e)

Величина, равная отношению энергии излучения ΔE , попадающего на поверхность, к площади этой поверхности ΔS , есть энергетическая экспозиция

$$H_e = \frac{\Delta E}{\Delta S}. \quad (2.14)$$

2.3.2. ПОТОК ИЗЛУЧЕНИЯ (Φ_e)

Величина, равная отношению энергии излучения ΔE к времени переноса этого излучения Δt , называется потоком излучения:

$$\Phi_e = \frac{\Delta E}{\Delta t}. \quad (2.15)$$

2.3.3.
ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СВЕТИМОСТЬ
(ИНТЕГРАЛЬНАЯ ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ M_e)

Интегральная излучательная способность равна отношению потока излучения Φ_e к площади $\Delta S_{И}$, с которой этот поток испускается:

$$M_e = \frac{\Phi_e}{\Delta S_{И}}. \quad (2.16)$$

2.3.4.
ОБЛУЧЕННОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ (E_e)

Величина, равная отношению потока излучения Φ_e к площади $\Delta S_{П}$, на которую этот поток падает и поглощается, есть облученность поверхности:

$$E_e = \frac{\Phi_e}{\Delta S_{П}}. \quad (2.17)$$

2.4.
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ
И СВЕТОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Энергетические параметры характеризуют излучение относительно к его действию на какой-либо приемник излучения и связаны с переносимой излучением энергией.

С помощью световых параметров оценивают излучение в том случае, если приемником излучения служит человеческий глаз. Чувствительность глаза к свету разной длины волны неодинакова. Она имеет максимум при $\lambda = 0,555$ мкм и быстро снижается при удалении от этого максимума. На границах видимого диапазона ($\lambda = 0,38$ мкм и $\lambda = 0,78$ мкм) чувствительность глаза практически падает до нуля [23].

На рис. 2.6 показана относительная спектральная световая эффективность глаза, адаптированного к дневному (1) и ночному (2) свету.

Относительная спектральная световая эффективность $V(\lambda)$ представляет собой усредненный результат многих исследований.

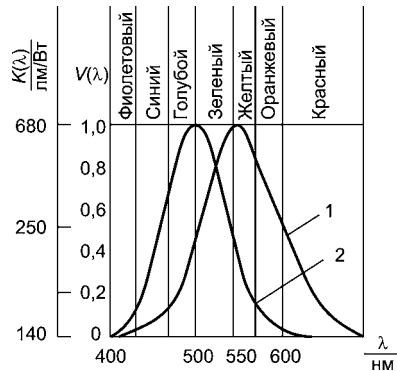


Рис. 2.6
Спектральная характеристика чувствительности человеческого глаза

Оптическое излучение в видимом диапазоне описывается световыми параметрами и характеристиками.

Таким образом, энергетические и световые параметры излучения по смыслу одинаковы, но характеризуют излучение в разных диапазонах волн и имеют разные единицы измерения. Количественные характеристики видимого света связывают со зрительным ощущением. В инфракрасном и ультрафиолетовом поддиапазонах оптического излучения, не воспринимаемого глазом, параметры характеризуют непосредственно энергию, переносимую излучением. Световые и энергетические параметры связаны пропорциональной зависимостью.

Для количественного описания оптического излучения, а также источников и приемников излучения используются пять основных энергетических параметров: поток излучения и сила излучения, параметры, характеризующие излучение; энергетическая светимость и энергетическая яркость, характеризующие источник излучения с учетом площади излучаемой поверхности; энергетическая освещенность (облученность), характеризующая облучаемую, т. е. принимающую излучение поверхность. Для видимого излучения применяются, соответственно, пять световых параметров: световой поток, сила света, светимость, яркость и освещенность.

В ряде случаев эксплуатации излучателей требуется перевод имеющихся световых параметров в энергетические и наоборот. Так, в паспортных данных на светоизлучающие диоды излучение характеризуется обычно силой света или яркостью. Применение же таких приборов, например, в устройствах оптической связи и сигнализации не позволяет непосредственно использовать световые параметры. Переход к энергетическим параметрам осуществляется с помощью световой эффективности, которая в общем случае равна

$$K_V = \frac{\Phi_V [\text{лм}]}{\Phi_e [\text{Вт}]} = \frac{I_V [\text{кд}]}{I_e [\text{Вт/ср}]} = \frac{L_V [\text{кд/м}^2]}{L_e [\text{Вт/(ср} \cdot \text{м}^2)]}, \quad (2.18)$$

где Φ_e — поток излучения (Вт); Φ_V — световой поток (лм); I_e — сила излучения (Вт/ср); I_V — сила света (кд = лм/ср); L_e — энергетическая яркость (Вт/(ср·м²)); L_V — яркость (кд/м²).

2.5.

КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Цвет какой-либо отражающей или излучающей поверхности характеризуется цветовым фоном, его насыщенностью (степенью отличия от белого цвета) и яркостью или светлотой. Первые две величины определяют цветность излучения. Основной прием для

количественной оценки цвета заключается в установлении абсолютных значений и относительных соотношений мощности (или яркости) трех стандартизированных узкополосных излучений, которые при совместном воздействии вызывают такое же физиологическое ощущение в глазу, как и оцениваемый цвет.

В качестве основных цветов Международной комиссией по освещению (МКО) приняты спектрально чистые цвета трех монохроматических излучений R , G и B с длинами волн $\lambda_R = 700$ нм (красный), $\lambda_G = 546,1$ нм (зеленый) и $\lambda_B = 435,8$ нм (синий), соотношение мощностей которых $R : G : B = 1 : 0,091 : 0,0138$. Любой цвет F определяется основным соотношением колориметрии

$$F = r'R + g'G + b'B, \tag{2.19}$$

где r' , g' , b' — координаты цвета (или цветовые координаты), обуславливающие долю соответствующего цвета.

Более удобной для описания цветов является система, в которой основные цвета X , Y , Z не являются реальными, но позволяют определять цвет с помощью такого же уравнения:

$$F = x'X + y'Y + z'Z. \tag{2.20}$$

Для характеристики только цветности координаты цвета x' , y' , z' заменяются нормированными координатами цветности:

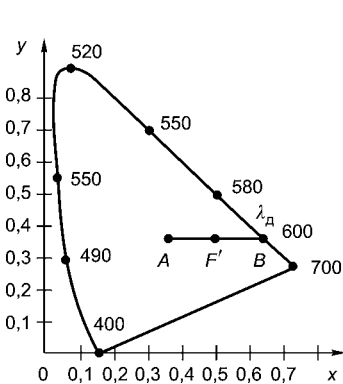


Рис. 2.7
График цветности

$$\begin{aligned} x &= \frac{x'}{x' + y' + z'}; \\ y &= \frac{y'}{x' + y' + z'}; \\ z &= \frac{z'}{x' + y' + z'}. \end{aligned} \tag{2.21}$$

Таким образом, $x + y + z = 1$, откуда следует, что независимыми являются только две координаты (обычно выбирают x и y).

Тогда цветность можно представить точкой на плоскости (в соответствии с рис. 2.7).

Как видно, цветность определяется направлением вектора F в цветовом пространстве, а не абсолютной величиной, которая при постоянстве относительного спектрального состава излучения служит для оценки яркости объекта.

Цветовой тон обычно характеризуют доминирующей длиной волны λ_d , определение которой для данного цвета F' очевидно из рис. 2.7. Цветовой тон также можно описать качественно, наименованием зоны цветового графика, в которой располагается точка цветности F' .

Насыщенность цвета характеризует степень, уровень, силу выражения цветового тона и определяется чистотой цвета — относительным значением энергии монохроматического излучения, которое в смеси с белым излучением воспроизводит анализируемый цвет. На рис. 2.7 это относительное удаление точки F' от точки E на прямой $E\lambda_d$ равно $EF'/E\lambda_d$. Наибольшей насыщенностью обладают спектрально-чистые цвета, наименьшей — ахроматические, серые цвета.

Специфическим понятием являются и дополнительные цвета — два цвета, которые при смешении могут дать белый цвет. На цветовом графике они соответствуют точкам пересечения кривой спектрально-чистых цветов и прямой, проходящей через точку E .

Кривая спектрально-чистых цветов — незамкнутая кривая линия, соединяющая ее концы, — есть линия пурпурных цветностей, получаемых искусственно, путем смешения красного и фиолетового цветов. Часть кривой в красно-зеленой области представляет собой практически прямую линию. Это значит, что при любом смешении спектральных цветов из этой области результирующий цвет имеет 100% -ную чистоту. Для получения насыщенных зелено-красных цветов обязательно нужна добавка синего цвета. Все многообразие реальных цветов находится внутри замкнутой кривой, изображенной на рис. 2.7; точки снаружи характеризуют не-реальные цвета.

Следует отметить, что координаты цветности могут быть вычислены, если известна спектральная характеристика источника излучения $p(\lambda)$. Упомянутые величины связаны следующим образом:

$$\begin{aligned} x' &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} p(\lambda)x'(\lambda)d\lambda; \\ y' &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} p(\lambda)y'(\lambda)d\lambda; \\ z' &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} p(\lambda)z'(\lambda)d\lambda. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Зависимости $x'(\lambda)$, $y'(\lambda)$, $z'(\lambda)$ получены экспериментально и приняты МКО в качестве цветовых характеристик для стандартного наблюдения. Поскольку аналитическими выражениями подынтегральных функций пользователь не располагает, интегралы могут быть определены численным методом.

Порядок расчета по данным спектральной характеристики следующий:

- вычисляются массивы $x'(\lambda)p(\lambda)$, $y'(\lambda)p(\lambda)$, $z'(\lambda)p(\lambda)$;
- определяются суммы

$$\sum_{\lambda} x'(\lambda)p(\lambda), \quad \sum_{\lambda} y'(\lambda)p(\lambda), \quad \sum_{\lambda} z'(\lambda)p(\lambda);$$

- рассчитывается нормирующий коэффициент

$$k = \frac{100}{\sum_{\lambda} y'(\lambda)p(\lambda)};$$

- вычисляются координаты цвета

$$x' = k \sum_{\lambda} x'(\lambda)p(\lambda), \quad y' = k \sum_{\lambda} y'(\lambda)p(\lambda), \quad z' = k \sum_{\lambda} z'(\lambda)p(\lambda);$$

- по координатам цвета определяются координаты цветности (формула (2.22)) в системе МКО 1931 г.

2.6. КОГЕРЕНТНОСТЬ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

2.6.1. МОНОХРОМАТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ВОЛНА

Идеальная монохроматическая электромагнитная волна (МЭВ) понимается как бесконечная в пространстве и времени волна, имеющая постоянную циклическую частоту ω . Такой волне соответствует уравнение

$$\vec{E} = \vec{E}_0 f(\omega t - kx), \quad (2.23)$$

где \vec{E} — напряженность электрической компоненты поля волны в точке с координатой x ; \vec{E}_0 — амплитуда вектора напряженности; t — время работы излучателя волны; k — модуль волнового вектора, $k = 2\pi/\lambda$; λ — длина волны.

Вид функции f определяется режимом работы излучателя МЭВ.

2.6.2.
ОСОБЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН
В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ (УФ), ВИДИМОМ
И ИНФРАКРАСНОМ (ИК) ДИАПАЗОНАХ

Современная оптоэлектроника использует в качестве источников излучения полупроводниковые, твердотельные и газовые оптические квантовые генераторы (ОКГ). Излучателями света в ОКГ являются либо возбужденные валентные электроны атомов (газовые ОКГ), либо электроны проводимости (полупроводниковые ОКГ). В первом случае переход валентного электрона из возбужденного состояния в невозбужденное сопровождается излучением фотона с энергией

$$E_{\text{ф}} = h\nu, \quad (2.24)$$

где h — постоянная Планка; ν — частота соответствующей фотону волны.

Во втором случае излучение фотона происходит в процессе рекомбинации электрона проводимости с дыркой, расположенной в валентной зоне. В обоих случаях время перехода электрона из возбужденного состояния в невозбужденное конечно и составляет величину $\tau_{\text{н}} \approx 10^{-8}$ с. Время излучения фотона в процессе указанного перехода много меньше, чем $\tau_{\text{н}}$, и составляет величину $\tau_{\text{ф}} = 10^{-15}$ с, для $\lambda = 1,5$ мкм. Условное соотношение $\tau_{\text{н}}$ и $\tau_{\text{ф}}$ показано на рис. 2.8.

За время $\tau_{\text{н}}$ излучается множество фотонов $N_{\text{ф}}$, число которых определяется количеством возбужденных электронов в газе или твердом теле. Всегда найдутся фотоны, имеющие одинаковую частоту ν , с которой изменяется их поле $\vec{E}(t)$. Последовательность таких фотонов образует волновой пуч, показанный на рис. 2.9.

Нетрудно видеть на рис. 2.9, что время самовоспроизведения фотона $\tau_{\text{ф}}$ одного порядка с периодом T возникшей электромагнитной волны.

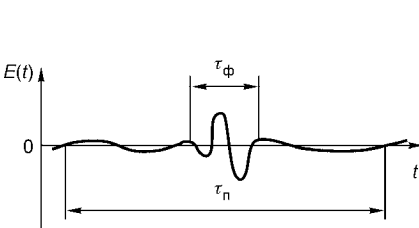


Рис. 2.8
Поле фотона

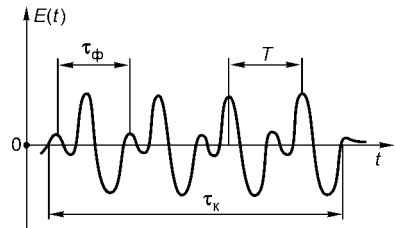


Рис. 2.9
Волновой пуч

Любой ОКГ за время τ_k (в соответствии с рис. 2.9) излучает не единственный цуг, а множество цугов с незначительно отличающимися частотами. Накладываясь друг на друга во времени и пространстве, цуги образуют волновой пакет. Внутри волнового пакета цуги интерферируют. В результате интерференции возникают биения векторов \vec{E} как результат сложения колебаний с близкими частотами. Заметим, что волновой цуг распространяется с фазовой скоростью

$$V_\Phi = \frac{c}{n} = \frac{\omega}{k}, \quad (2.25)$$

где n — абсолютный показатель преломления в среде распространения волны; c — скорость света в вакууме, $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с.

Волновой пакет распространяется с групповой скоростью

$$V_\Gamma = \frac{d\omega}{dk} = V_\Phi + \frac{dV_\Phi}{dk}, \quad (2.26)$$

где dV_Φ/dk — дисперсия фазовой скорости.

Реальное оптическое излучение, генерируемое ОКГ, представляет собой поток волновых пакетов, отличающийся от идеальной МЭВ, определенной выше.

Введем понятие когерентности оптического излучения как меры приближения реального излучения к идеальной МЭВ.

Различают временную и пространственную когерентность.

Основной характеристикой временной когерентности является время когерентности τ_k — это промежуток времени, в течение которого закон изменения фазы электромагнитной волны $f(\omega t - kx)$ остается постоянным (в соответствии с рис. 2.9).

Согласно рис. 2.9

$$\tau_k = N_\Phi \tau_\Phi, \quad (2.27)$$

где N_Φ — число фотонов, входящих в волновой цуг.

К характеристикам пространственной когерентности относятся: длина когерентности l_k , «радиус» когерентности ρ_k и объем когерентности V_k .

Длиной когерентности l_k называется расстояние, которое проходит волна за время когерентности τ_k . По определению

$$l_k = \left(\frac{c}{n} \right) \tau_k.$$

«Радиусом» когерентности ρ_k называется диаметр круга, в пределах которого разброс направлений волнового вектора \vec{k} электромагнитной волны не превышает π радиан.

Объемом когерентности V_k называется произведение площади круга диаметром ρ_k на длину когерентности l_k . По определению

$$V_k = \left(\frac{\pi \rho_k^2}{4} \right) l_k.$$

Понятие когерентности не следует путать с понятием *когерентных волн*.

По определению две волны называются *когерентными*, если они имеют одинаковые частоты и постоянную во времени разность фаз. Из вышесказанного очевидно, что для реального оптического излучения понятие когерентных волн является идеализированной моделью.

2.6.3. ВЗАИМОСВЯЗЬ τ_k И l_k С РЕАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Элементарные преобразования позволяют установить взаимосвязь τ_k и l_k с шириной полосы частот волнового пакета $\Delta\nu$, разбросом длин волн $\Delta\lambda$ и разбросом модулей волновых векторов Δk в следующем виде:

$$\Delta\nu = \frac{1}{\tau_k}; \quad (2.28)$$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{l_k}; \quad (2.29)$$

$$\Delta k = \frac{2\pi}{l_k}, \quad (2.30)$$

где λ понимается как среднее значение длины волны в волновом пакете.

2.7. КВАНТОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ И ВЕРОЯТНОСТИ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДОВ

2.7.1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УРОВНИ И КВАНТОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

В отличие от электронных приборов, в которых для усиления или генерации электромагнитного поля используется энергия свободных носителей зарядов, в квантовых приборах, как правило, задействуется внутренняя энергия микрочастиц (энергия атомов, ионов, молекул). При этом сами микрочастицы могут находиться в движении. Электроны, входящие в состав микрочастиц, назы-

ваются связанными. Строгое математическое описание квантовых приборов и анализ их работы представляют собой чрезвычайно сложную задачу. Это связано, в частности, с тем, что при анализе квантовых устройств приходится рассматривать процессы, подчиняющиеся законам микромира. Поэтому в зависимости от решаемой задачи используются различные приближенные модели и методы их описания.

Простейшей моделью, иллюстрирующей процессы излучения электромагнитного поля микрочастицами и резонансный характер их взаимодействия с электромагнитным полем, является модель, в которой излучение рассматривается как результат колебаний электрона, удерживаемого близ положения равновесия упругими силами. Более строгим и плодотворным является используемый в этой главе вероятностный метод описания процессов в ансамбле микрочастиц. Вероятностный метод с успехом применяется, например, при анализе некоторых моделей квантовых усилителей. Однако важнейшие задачи, связанные с определением частоты и мощности квантовых генераторов, не могут быть решены с помощью вероятностного метода. Для них применяется полуклассический метод. В полуклассической теории свойства рабочего вещества анализируются методами квантовой механики, а электромагнитное поле — по законам классической электродинамики. Наиболее строгим методом анализа квантовых приборов является метод квантовой электродинамики. Однако применение этого метода связано со сложным математическим аппаратом. Впервые вероятностный метод анализа процесса взаимодействия ансамбля микрочастиц с электромагнитным полем был применен Эйнштейном.

В соответствии с законами квантовой механики внутренняя энергия изолированной микрочастицы может принимать лишь дискретные значения, называемые уровнями энергии. Совокупность различных разрешенных значений внутренней энергии микрочастицы определяет систему уровней. Основой системы являются электронные уровни (ЭУ), отстоящие друг от друга на $1 \dots 10$ эВ. Между электронными уровнями располагаются колебательные уровни (КУ), отстоящие друг от друга примерно на $0,1$ эВ, а между колебательными уровнями находятся вращательные уровни (ВУ) с интервалом 10^{-3} эВ и менее. Названия групп уровней связаны с их происхождением: электронные уровни соответствуют энергии взаимодействия электронов с ядром; колебательные и вращательные уровни связаны с движением отдельных частей микрочастицы внутри нее и движением (вращением) частицы как целого. Уровень,

соответствующий наименьшей допустимой энергии микрочастицы, называется основным, а остальные — возбужденными.

Изменение внутренней энергии называется переходом с уровня на уровень. При переходе с высокого энергетического уровня E_2 на низкий E_1 выделяется энергия $\Delta E_{21} = E_2 - E_1$, а при переходе с низкого на высокий поглощается такая же энергия. Переходы с излучением или поглощением квантов электромагнитного поля (фотонов) называются излучательными. Энергетические уровни, с которых запрещены излучательные переходы на более низкие уровни энергии, называются метастабильными. Микрочастица может отдавать (или отбирать) энергию ΔE_{21} и без участия электромагнитного поля — при взаимодействии с другой микрочастицей, в результате чего увеличивается или уменьшается кинетическая энергия другой частицы. Такие переходы называются безизлучательными.

Переходы, которые совершаются в системах микрочастиц, классифицируются по различным признакам. Основными видами переходов являются спонтанные, вынужденные и релаксационные.

2.7.2.

СПОНТАННЫЕ ПЕРЕХОДЫ

Спонтанные переходы — самопроизвольные излучательные квантовые переходы из верхнего энергетического состояния в нижнее. Электромагнитное поле спонтанного излучения характеризуется тремя параметрами: центральной частотой спектральной линии $\nu_{\text{ц}}$, спектральной плотностью излучения $S(\nu)$ и мощностью излучения. Центральная частота излучения называется также частотой квантового перехода и частотой спектральной линии и определяется постулатом Бора:

$$\nu_{\text{ц}} = \nu_{21} = \frac{E_2 - E_1}{h}, \quad (2.31)$$

где E_2 и E_1 — энергия верхнего и нижнего уровней соответственно; h — постоянная Планка.

Ширина спектра спонтанного излучения относительно велика, и спонтанное излучение должно рассматриваться как шумоподобный сигнал. Определим теперь мощность спонтанного излучения. Здесь и в дальнейшем будем рассматривать процессы в единице объема вещества.

Пусть в рассматриваемом объеме содержится N_2 частиц с энергией E_2 и N_1 частиц с энергией E_1 . Число частиц в единице объема с данной энергией называется населенностью уровня. Спонтанные

переходы носят случайный характер и оцениваются вероятностью перехода в единицу времени A_{21} , которая называется коэффициентом Эйнштейна для спонтанных переходов. Если населенность уровня N_2 остается неизменной во времени (или меняется незначительно), то число переходов в единицу времени с уровня E_2 на уровень E_1 составит

$$N_{21} = N_2 A_{21}. \quad (2.32)$$

При каждом переходе выделяется энергия $E_2 - E_1 = h\nu_{21}$, поэтому мощность излучения

$$P_{21} = n_{21}(E_2 - E_1) = N_2 A_{21} h\nu_{21}. \quad (2.33)$$

Между коэффициентом Эйнштейна и средним временем жизни частицы на уровне (временем, за которое при отсутствии внешнего возбуждения населенность уровня падает в e раз) существует простая связь:

$$A_{21} = \frac{1}{\tau_2}. \quad (2.34)$$

В системе частиц, имеющих несколько энергетических уровней, возможны спонтанные переходы частиц с данного уровня на нижние. Полная вероятность A_j спонтанного перехода с уровня j на все нижние i уровней равна сумме вероятностей отдельных спонтанных переходов A_{ji} :

$$A_j = \sum_{i=1}^{j-1} A_{ji} = A_{j1} + A_{j2} + \dots + A_{j(j-1)}. \quad (2.35)$$

Уровни, для которых вероятность спонтанных переходов очень мала, называют *метастабильными*.

Время жизни частиц на уровне j в многоуровневой системе определяется аналогично:

$$\tau_j = \frac{1}{A_j}. \quad (2.36)$$

Среднее время жизни на уровне составляет от одной до сотен наносекунд. На метастабильных уровнях время жизни — миллисекунды.

2.7.3. ВЫНУЖДЕННЫЕ ПЕРЕХОДЫ

Вынужденные переходы — это квантовые переходы частиц под действием внешнего электромагнитного поля, частота которого совпадает с частотой перехода или близка к ней. При этом возможны переходы с верхнего уровня 2 на нижний 1 и с нижнего на

верхний. В первом случае под действием внешнего электромагнитного поля с частотой ν_{21} происходит вынужденное испускание кванта энергии. Особенность вынужденного испускания состоит в том, что появившийся фотон идентичен фотону внешнего поля. Вынужденное излучение имеет такие же частоту, фазу, направление распространения и поляризацию, как и вынуждающее излучение. Поэтому вынужденное излучение увеличивает энергию электромагнитного поля с частотой перехода ν_{21} . Это служит предпосылкой для создания квантовых усилителей и генераторов.

Следует отметить, что на вынужденный переход с излучением энергии не затрачивается энергия внешнего поля, которое является лишь своеобразным стимулятором процесса. В противоположность этому для перевода частицы из нижнего энергетического состояния 1 в верхнее 2 необходимо затратить энергию внешнего поля, равную разности энергии верхнего и нижнего уровней: $E_2 - E_1 = h\nu_{21}$. Таким образом, при каждом вынужденном переходе снизу вверх затрачивается квант энергии внешнего поля $h\nu_{21}$.

Вынужденные переходы (как и спонтанные) имеют статистический характер. Поэтому вводятся вероятностные коэффициенты: E_{21} — вероятность вынужденного перехода сверху вниз и E_{12} — снизу вверх в одну секунду. Эти вероятности пропорциональны объемной плотности энергии внешнего поля Π_ν в единичном спектральном интервале на частоте перехода и определяются из соотношения

$$E_{21} = B_{21}\Pi_\nu E_{12} = B_{12}\Pi_\nu, \quad (2.37)$$

где B_{21} и B_{12} — коэффициенты Эйнштейна для вынужденных переходов с излучением и поглощением энергии соответственно.

Коэффициенты B_{21} и B_{12} имеют смысл вероятностей вынужденных переходов в одну секунду при единичной объемной плотности энергии внешнего поля ($\Pi_\nu = 1 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-3}\cdot\text{с}^{-1}$).

Число вынужденных переходов сверху вниз с излучением энергии в единицу времени в единице объема пропорционально вероятности E_{21} и населенности верхнего уровня N_2 :

$$N_{21} = E_{21}N_1 = B_{21}\Pi_\nu N_2. \quad (2.38)$$

Аналогично при тех же условиях число вынужденных переходов снизу вверх с поглощением энергии

$$N_{12} = E_{12}N_1 = B_{12}\Pi_\nu N_2. \quad (2.39)$$

**2.7.4.
СООТНОШЕНИЯ
МЕЖДУ КОЭФФИЦИЕНТАМИ ЭЙНШТЕЙНА**

Эйнштейн рассмотрел процессы в полости абсолютно черного тела, где находятся атомы газа. Со стенок, ограничивающих полость абсолютно черного тела, происходит тепловое излучение электромагнитного поля, вследствие чего в полости устанавливается некоторая плотность энергии этого поля Π_ν . Под действием этого поля атомы газа совершают вынужденные переходы; кроме того, происходят и спонтанные переходы. Эйнштейн рассмотрел состояние термодинамического равновесия такой системы — состояние, в которое она приходит, будучи предоставленной самой себе. В этом состоянии плотность энергии электромагнитного поля в полости абсолютно черного тела, находящегося при температуре T , определяется формулой Планка:

$$\Pi_\nu = \frac{(8\pi\nu^2 / c^3)}{\exp(h\nu / KT) - 1}. \quad (2.40)$$

Распределение атомов газа по уровням энергии в состоянии термодинамического равновесия подчиняется закону Больцмана:

$$\frac{N_{2Б}}{N_{1Б}} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{KT}\right). \quad (2.41)$$

При этом число излучательных переходов в единицу времени с верхних уровней на нижние должно равняться числу безызлучательных переходов с нижних уровней на верхние. Рассмотрим переходы между двумя уровнями: E_2 и E_1 . С уровня E_2 совершаются спонтанные переходы с вероятностью в единицу времени A_{21} и вынужденные переходы под действием поля излучения стенок полости с вероятностью $E_{21} = B_{21}\Pi_\nu$. Полное число переходов в единицу времени со второго на первый уровень

$$N_{21} = N_2(A_{21} + E_{21}) = N_2(A_{21} + B_{21}\Pi_\nu). \quad (2.42)$$

С первого уровня на второй будут совершаться только вынужденные переходы, число которых в единицу времени

$$N_{12} = N_1B_{12}\Pi_\nu. \quad (2.43)$$

В состоянии равновесия

$$N_2(A_{21} + E_{21}) = N_1E_{12}. \quad (2.44)$$

При условии $B_{12} = B_{21}$

$$A_{21} = \frac{8\pi h\nu_{21}^3}{c^3} B_{21}. \quad (2.45)$$

В приборах СВЧ-диапазона, работающих на «низкой» частоте, вероятность спонтанных переходов мала по сравнению с вероятностью вынужденных переходов и их роль невелика. В лазерах же, работающих на оптических частотах, пренебрегать спонтанными переходами нельзя.

2.7.5. РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ПЕРЕХОДЫ

Переход системы частиц в состояние термодинамического равновесия называется процессом релаксации, а квантовые переходы, которые способствуют установлению и поддержанию термодинамического равновесия, называются релаксационными переходами. В качестве примера, иллюстрирующего релаксационные переходы, рассмотрим процессы в некотором объеме газа. Как известно, молекулы газа находятся в тепловом хаотическом движении, причем средняя кинетическая энергия молекулы газа пропорциональна KT (K — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура газа). В процессе теплового хаотического движения молекулы газа сталкиваются. При этом сталкивающиеся частицы могут взаимодействовать либо упруго, т. е. без изменения суммарной кинетической энергии, либо неупруго, когда часть кинетической энергии одной частицы переходит во внутреннюю энергию другой (или наоборот: внутренняя энергия одной частицы может перейти в кинетическую энергию другой). В состоянии термодинамического (теплового) равновесия температура газа и суммарная кинетическая энергия всех частиц остаются неизменными. Неизменна и внутренняя энергия частиц, которая распределяется между уровнями по закону Больцмана.

Если нарушить равновесие, например резко увеличить температуру газа до T_2 , то при новой температуре средняя кинетическая энергия молекул газа возрастет (станет пропорциональной KT_2), суммарная кинетическая энергия всех частиц газа возрастет, а внутренняя энергия частиц некоторое время будет оставаться неизменной. В результате неупругих соударений, при которых часть кинетической энергии молекул переходит во внутреннюю энергию частиц, произойдет ее увеличение с новым распределением частиц по уровням. После установления нового равновесия внутренняя энергия распределяется по закону Больцмана при температуре T_2 . Постоянная времени установления термодинамического равновесия называется временем релаксации $\tau_{\text{рел}}$.

Релаксационные процессы происходят не только в газах, но и в твердых телах. Переход кинетической энергии одной частицы

во внутреннюю энергию другой при неупругих столкновениях молекул газа является примером релаксационных переходов. Релаксационные переходы носят статистический характер. Вероятности релаксационных переходов между уровнями E_1 и E_2 будем обозначать E_{12} , а обратных переходов — E_{21} . В большинстве случаев, имеющих место в квантовых приборах, релаксационные переходы являются безызлучательными.

В состоянии термодинамического равновесия населенность уровней не изменяется во времени, поэтому число безызлучательных переходов с уровня 1 на уровень 2 в одну секунду равно числу обратных безызлучательных переходов с уровня 2 на уровень 1:

$$N_{1B}E_{12} = N_{2B}E_{21}. \quad (2.46)$$

В состоянии термодинамического равновесия распределение населенностей определяется законом Больцмана. Получаем

$$\frac{E_{21}}{E_{12}} = \exp\left(\frac{h\nu_{21}}{KT}\right). \quad (2.47)$$

Из этого следует, что вероятность безызлучательных переходов сверху вниз выше, чем снизу вверх ($E_{21} > E_{12}$), в отличие от вероятностей вынужденных переходов, которые одинаковы. Если $h\nu_{21} \ll KT$, что обычно справедливо для квантовых приборов СВЧ-диапазона, то выражение (2.47) можно заменить приближенным выражением

$$\frac{E_{21}}{E_{12}} = 1 + \frac{h\nu_{21}}{KT}. \quad (2.48)$$

2.8. ШИРИНА СПЕКТРАЛЬНОЙ ЛИНИИ

До сих пор мы рассматривали ансамбли одинаковых частиц, имеющих, например, энергетические уровни E_2 и E_1 , между которыми совершаются переходы. При излучательных переходах между уровнями E_2 и E_1 различных частиц частота излучения всех частиц по формуле должна быть одинаковой. Однако в соответствии с принципом Паули в системе частиц не может быть больше двух частиц, имеющих одинаковую энергию. Поэтому при образовании ансамбля одинаковых частиц их энергетические уровни несколько расщепляются. Степень размытости уровней определяется соотношением Гейзенберга, которое можно записать как

$$\Delta E \Delta t \geq h, \quad (2.49)$$

где ΔE и Δt — неопределенности энергии и времени.

Предположим, что необходимо определить частоту излучения при переходе с уровня 2 на основной уровень 1. Время жизни частиц в возбужденном состоянии определяется как $\tau_2 = 1/A_{21}$. Следует считать, что неопределенность времени равна времени жизни частицы, т. е. $\Delta t = \tau_2$. Подставляя Δt в формулу (2.49), получаем неопределенность энергии уровня 2: $\Delta E_2 \geq h/\tau_2$. Наиболее широкими оказываются уровни с малым временем жизни. Неопределенность частоты перехода между «размытыми» уровнями 2 и 1 шириной ΔE_2 и ΔE_1 есть сумма неопределенностей энергий обоих уровней и находится из соотношения $v_{\max} - v_{\min} = (\Delta E_2 + \Delta E_1)/h$. Ширина спектральной линии, определяемая только временем жизни частиц, обеспечивающих спонтанное излучение, минимальна и называется естественной шириной спектральной линии. Ширину контура спектральной линии принято определять как разность частот, на которых интенсивность I равна половине максимального значения I_0 . Частотой перехода (центральной частотой перехода) называют частоту, соответствующую максимуму спектральной линии. Форма спектральной линии может быть представлена так называемой лоренцевой кривой $I/I_0 = \Delta v^2 / [(v - v_0)^2 + \Delta v^2]$, совпадающей с резонансной кривой колебательного контура. Реальные наблюдаемые спектральные линии имеют ширину больше естественной.

Уширение спектральной линии из-за столкновений. В газообразных веществах молекулы газа, будучи в тепловом движении, сталкиваются; при этом часть таких столкновений носит неупругий характер. При неупругих соударениях совершается переход с уровня на уровень, что сокращает время жизни частицы на уровне по сравнению с временем жизни, обусловленным спонтанными переходами. Но сокращение времени жизни на уровне в соответствии с принципом Гейзенберга приводит к увеличению размытости уровня ΔE , что, в свою очередь, приводит к уширению спектра излучения. Для уменьшения эффекта уширения линии излучения при столкновениях в некоторых квантовых приборах используются методы, снижающие вероятность неупругих столкновений излучающих частиц. С этой целью увеличивают длину свободного пробега частиц, заставляя частицы двигаться в форме узконаправленных пучков. Для предотвращения сокращения времени жизни частиц при неупругих ударах о стенки сосуда последние покрывают особым материалом, так что частица испытывает только упругое отражение.

Доплеровское уширение спектральной линии связано с эффектом Доплера, т. е. с зависимостью наблюдаемой частоты излу-

ния от скорости движения излучателя. Если источник, создающий в неподвижном состоянии монохроматическое излучение частотой ν_0 , движется со скоростью V в сторону наблюдателя так, что проекция скорости на направление наблюдения есть V_x , то наблюдатель регистрирует более высокую частоту излучения

$$\nu = \nu_0 \left(1 + \frac{V_x}{c} \right) = \nu_0 \left(1 + \frac{V \cos \theta}{c} \right), \quad (2.50)$$

где c — фазовая скорость распространения волны; θ — угол между направлениями движения излучателя и осью «наблюдатель—излучатель».

В квантовых системах источниками излучения являются атомы или молекулы. В газообразной среде при термодинамическом равновесии скорости частиц распределены по закону Максвелла–Больцмана. Поэтому и форма спектральной линии всего вещества будет связана с этим распределением. В спектре, регистрируемом наблюдателем, должен быть непрерывный набор частот, так как разные атомы движутся с разными скоростями относительно наблюдателя. Учитывая лишь проекции скоростей V_x распределения Максвелла–Больцмана, можно получить следующее выражение для формы доплеровской спектральной линии:

$$I = I_0 \exp \left[-\frac{M_c^2 (\nu - \nu_0)^2}{2KT \nu_0^2} \right]. \quad (2.51)$$

Эта зависимость является гауссовской функцией. Соответствующая значению $I_0/2$ ширина линии

$$\Delta \nu = \nu_0 \sqrt{2 \ln 2 \left(\frac{KT}{M_c^2} \right)}. \quad (2.52)$$

С увеличением массы частиц M и понижением температуры T ширина линии $\Delta \nu$ уменьшается.

Наблюдаемая спектральная линия вещества представляет собой суперпозицию спектральных линий всех частиц вещества, т. е. линий с различными центральными частотами. Для легких частиц при обычной температуре ширина доплеровской линии в оптическом диапазоне может превышать естественную ширину линии на несколько порядков и достигать одного гигагерца и более.

В квантовых приборах широко используются твердые вещества с примесными ионами, квантовые переходы которых являются рабочими. Колебания кристаллической решетки создают переменное электрическое поле, которое влияет на ионы решетки и изменяет их энергию, а это приводит к размытию энергетических

уровней и уширению спектральной линии. Кроме того, ширина линии увеличивается вследствие тепловых колебаний самих ионов. Причиной уширения спектральной линии твердого тела может быть также пространственная неоднородность физических параметров среды или неоднородности электрического и магнитного полей. Причиной уширения спектральной линии может быть также электромагнитное излучение, вызывающее вынужденные переходы между рассматриваемыми уровнями и приводящее к изменению времени жизни частицы. Поэтому, например, генерация излучения в квантовых приборах будет приводить к изменению ширины линии.

2.9. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ ПЕРЕХОДОВ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

То обстоятельство, что вынужденное излучение возбужденных микрочастиц при переходах с верхнего энергетического уровня на нижний когерентно (совпадает по частоте, фазе, поляризации и направлению распространения) с вынуждающим, наталкивает на мысль о возможности использования вынужденных переходов для усиления электромагнитного поля. Чтобы оценить возможность такого усиления, рассмотрим обмен энергии поля и вещества [22]. Предположим, что вещество имеет два энергетических уровня E_1 и E_2 с населенностями N_1 и N_2 , а частота внешнего поля равна частоте квантового перехода ν_{21} . При объемной плотности энергии Π_ν число вынужденных переходов в единицу времени в единице объема с выделением энергии $n_{21} = \text{ВП}_\nu N_2$, а выделяемая при этих переходах энергия в единице объема в единицу времени, т. е. мощность, определяется как

$$P_{\text{выд}} = n_{21} h \nu_{21} = \text{ВП}_\nu N_2 h \nu_{21}. \quad (2.53)$$

Аналогично число вынужденных переходов с поглощением энергии и поглощаемая от внешнего поля мощность в единице объема определяются соответственно как

$$n_{12} = \text{ВП}_\nu N_1; \quad (2.54)$$

$$P_{\text{погл}} = \text{ВП}_\nu N_1 h \nu_{21}. \quad (2.55)$$

Изменение мощности электромагнитного поля

$$P = P_{\text{выд}} - P_{\text{погл}} = B h \nu_{21} (N_2 - N_1). \quad (2.56)$$

Назовем P мощностью взаимодействия.

Если $P > 0$, т. е. выделяемая мощность превышает поглощаемую, то в системе увеличивается энергия поля или усиливается электромагнитное поле. При $P < 0$ преобладает поглощение энергии и энергия внешнего поля убывает.

Таким образом, условием усиления ($P > 0$) будет $(N_2 - N_1) > 0$ или $N_2/N_1 > 1$.

В состоянии термодинамического равновесия населенность верхнего уровня меньше, чем нижнего ($N_{2Б} < N_{1Б}$), в соответствии с законом Больцмана. Поэтому вещество в этом состоянии поглощает энергию внешнего поля ($P < 0$), так как число квантовых переходов n_{12} снизу вверх ($1 \rightarrow 2$) с поглощением энергии больше числа квантовых переходов n_{21} сверху вниз ($2 \rightarrow 1$) с выделением энергии.

Соотношение $N_2 > N_1$ является обратным (инверсным) по отношению к состоянию термодинамического равновесия, когда $N_{2Б} < N_{1Б}$. Поэтому состояние, при котором $N_2 > N_1$, т. е. возможно усиление, называют состоянием с инверсией населенностей уровней.

Закон Больцмана, справедливый для термодинамического равновесия, можно записать так:

$$T_{\Pi} = \frac{E_2 - E_1}{K \ln(N_1/N_2)} = \frac{h\nu_{21}}{K \ln(N_1/N_2)}. \quad (2.57)$$

Величину T_{Π} называют температурой перехода. Формально при состоянии с инверсией населенностей эта температура отрицательная ($T_{\Pi} < 0$).

Среда, в которой есть состояние с инверсией населенностей, называется также активной средой, так как в ней возможно усиление электромагнитного поля.

В состоянии термодинамического равновесия $N_{1Б} > N_{2Б}$, поэтому при воздействии электромагнитного поля число вынужденных переходов снизу вверх ($1 \rightarrow 2$) больше числа вынужденных переходов сверху вниз ($2 \rightarrow 1$): населенность нижнего уровня убывает, а верхнего растет.

При достаточно большой объемной плотности энергии поля Π , возможно выравнивание населенностей уровней (N_1 и N_2), когда числа вынужденных переходов $1 \rightarrow 2$ и $2 \rightarrow 1$ равны, т. е. наступает динамическое равновесие. Явление выравнивания населенностей уровней называют насыщением перехода. Таким образом, при воздействии электромагнитного поля на двухуровневую систему можно добиться насыщения перехода, но не инверсии населенностей.

Населенности уровней при любом значении объемной плотности энергии поля находятся из решения скоростных (кинетических) уравнений. Для двухуровневой системы скорости изменения населенностей уровней:

$$\begin{aligned}\frac{dN_1}{dt} &= -N_1 \text{ВП}_v - N_1 E_{12} + N_2 \text{ВП}_v + N_2 A_{21} + N_2 E_{21}; \\ \frac{dN_2}{dt} &= N_1 \text{ВП}_v + N_1 E_{12} - N_2 \text{ВП}_v - N_2 A_{21} - N_2 E_{21}; \\ N_1 + N_2 &= N,\end{aligned}\quad (2.58)$$

где N — общее число частиц.

Поясним процедуру составления уравнений. Населенность уровня 1 в единицу времени убывает вследствие вынужденных переходов $1 \rightarrow 2$ на величину $N_1 \text{ВП}_v$, а из-за безызлучательных переходов $1 \rightarrow 2$ — на величину $N_1 E_{12}$. Одновременно происходит рост населенности N_1 вследствие переходов $2 \rightarrow 1$ на величину $N_2 \text{ВП}_v$ (вынужденные переходы), $N_1 A_{21}$ (спонтанные переходы) и $N_2 E_{21}$ (безызлучательные переходы). Первые два слагаемых учитывают увеличение N_2 в результате вынужденных и безызлучательных переходов $1 \rightarrow 2$, а остальные определяют убывание N_2 вследствие вынужденных, спонтанных и безызлучательных переходов $2 \rightarrow 1$.

Очевидно, что для двухуровневой системы при сохранении общего числа частиц

$$\frac{dN_1}{dt} = -\frac{dN_2}{dt}.$$

В стационарном состоянии

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{dN_2}{dt} = 0,$$

поэтому можно написать систему двух уравнений

$$\begin{aligned}N_1(\text{ВП}_v + E_{12}) - N_2(\text{ВП}_v + A_{21} + E_{21}) &= 0; \\ N_1 + N_2 &= N.\end{aligned}\quad (2.59)$$

Решая эту систему уравнений, можно найти стационарные величины N_1 и N_2 , а затем их отношение:

$$N_1 = \frac{N}{A_{21} + E_{21} + E_{12}} \frac{A_{21} + E_{21} + \text{ВП}_v}{1 + \delta_{12} \Pi_v}; \quad (2.60)$$

$$N_2 = \frac{N}{A_{21} + E_{21} + E_{12}} \frac{E_{21} + \text{ВП}_v}{1 + \delta_{12} \Pi_v}; \quad (2.61)$$

$$N_2 - N_1 = N \frac{E_{12} - (A_{21} + E_{21})}{A_{21} + E_{21} + E_{12}} \frac{1}{1 + \delta_{12} \Pi_v}; \quad (2.62)$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{A_{21} + E_{21} + B\Pi_v}{E_{12} + B\Pi_v}; \quad (2.63)$$

$$\delta_{12} = \frac{2B}{A_{21} + E_{21} + E_{12}}. \quad (2.64)$$

Рассмотрим зависимости N_1 и N_2 от объемной плотности энергии Π_v для случая, когда система до воздействия электромагнитного поля находилась в термодинамическом равновесии с населенностями N_{1B} и N_{2B} , определяемыми законом Больцмана. При малых значениях Π_v населенность нижнего уровня N_1 убывает, а верхнего N_2 растет по линейному закону. При очень больших значениях плотности энергии ($\Pi_v \rightarrow \infty$) N_1 и N_2 стремятся к среднему значению $N/2 = (N_{1B} + N_{2B})/2$, соответствующему насыщению переходов.

При отсутствии поля ($\Pi_v = 0$) населенности уровней равны N_1^0 и N_2^0 , причем $N_2^0 > N_1^0$. С ростом Π_v N_2 убывает, а N_1 растет от значений N_2^0 и N_1^0 по линейному закону, но при больших Π_v асимптотически они приближаются к среднему значению

$$N/2 = (N_1^0 + N_2^0)/2,$$

соответствующему насыщению перехода.

Разность населенностей уровней ($N_2 - N_1$) определяет мощность взаимодействия P :

$$P = Bh\nu_{21}N \frac{E_{12} - (A_{21} + E_{21})}{A_{21} + E_{21} + E_{12}} \frac{\Pi_v}{1 + \delta_{12}\Pi_v}. \quad (2.65)$$

Эта формула позволяет найти зависимость мощности взаимодействия от объемной плотности энергии Π_v электромагнитного поля, взаимодействующего с веществом. Зависимость $P(\Pi_v)$ определяется отношением $\Pi_v/(1 + \delta_{12}\Pi_v)$. При увеличении Π_v мощность сначала (когда $\delta_{12}\Pi_v \ll 1$) линейно растет, а затем стремится к предельному значению $P_{\text{пред}}$, которое определяется путем раскрытия неопределенности при $\Pi_v \rightarrow \infty$, т. е. в состоянии насыщения перехода

$$P_{\text{пред}} = 0,5h\nu_{21}N[E_{21} - (A_{21} + E_{21})]. \quad (2.66)$$

Учитывая, что обычно вероятность релаксационных переходов много больше вероятности спонтанных, выражению (2.65) можно придать более простой и наглядный вид

$$P = \frac{(N_2 - N_1)Bh\nu\Pi_v}{1 + 2\tau_{\text{рел}}B\Pi_v}, \quad (2.67)$$

где $\tau_{\text{рел}}$ — время релаксации.

В состоянии насыщения при $P_v \rightarrow \infty$ ($N_1 = N_2$), когда мощность, выделяемая при вынужденных переходах $2 \rightarrow 1$, равна мощности, поглощаемой при вынужденных переходах $1 \rightarrow 2$, от электромагнитного поля отбирается мощность $P_{\text{пред}}$. Эта мощность необходима для поддержания равенства населенностей уровней, которое постоянно стремится нарушаться из-за наличия спонтанных и безызлучательных переходов с вероятностями A_{21} , E_{21} и E_{12} . Число этих переходов непосредственно от плотности энергии не зависит и определяется только населенностью уровней. Получаемая от электромагнитного поля энергия рассеивается в веществе, например в кристаллической решетке, в виде теплоты.

2.10. МЕХАНИЗМ ГЕНЕРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Физической основой полупроводниковых излучателей является люминесценция. Под люминесценцией понимают электромагнитное нетепловое излучение, обладающее длительностью, значительно превышающей период световых колебаний. Таким образом, в определении подчеркивается тот факт, что, в отличие от свечения нагретых тел, люминесценция не требует нагревания тела, хотя, конечно, подведение энергии в том или ином виде необходимо. Кроме того, в отличие от рассеяния света, люминесценция продолжается некоторое время после отключения возбуждающей энергии. Иначе говоря, поглощенная люминесцирующим проводником энергия задерживается в нем, а затем частично превращается в оптическое излучение, частично — в теплоту.

В зависимости от вида энергии, возбуждающей люминесценцию, различают фото-, электролюминесценцию и другие виды [23]. Люминесцировать могут твердые, жидкие и газообразные тела. В оптоэлектронных полупроводниковых приборах используется люминесценция кристаллических примесных полупроводников с широкой запрещенной зоной.

Люминесценция включает два основных этапа. На первом под воздействием возбуждающей энергии происходит генерация носителей заряда. Этот этап определяет тип люминесценции. На втором этапе генерированные носители заряда рекомбинируют на центрах рекомбинации. Выделяющаяся при рекомбинации энергия превращается либо в оптическое излучение, либо в теплоту.

Как ясно из названия, инжекционная электролюминесценция, т. е. генерация оптического излучения в p - n -переходе, объединяет два процесса: инжекцию носителей и собственно электролюми-

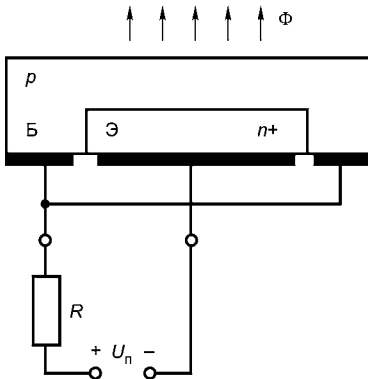


Рис. 2.10
Электрорлуминесценция
p-n-перехода

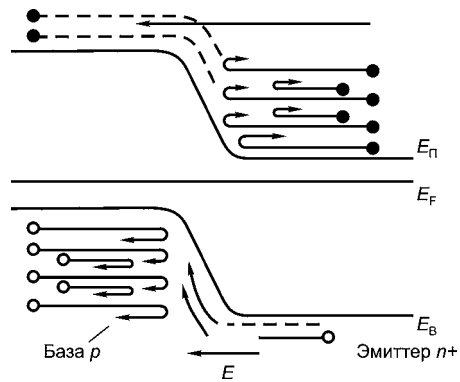


Рис. 2.11
Движение носителей заряда
в *p-n*-переходе

несценцию. С помощью инжекции обеспечивается создание неравновесных носителей заряда в соответствии с рис. 2.10.

При контакте однородных полупроводников с разными типами электропроводности уровень Ферми E_F в равновесном состоянии должен быть единым. Это приводит к искривлению зон и образованию потенциального барьера, как на рис. 2.11.

Основная масса дырок из *p*-слоя, где их много, диффундируют слева направо в область перехода, но не могут преодолеть потенциальный барьер и, проникнув в переход на некоторую глубину, снова возвращаются в *p*-слой. Дырки *n*-слоя, как пузырьки, легко «всплывают» ко дну валентной зоны и образуют дрейфовый поток справа налево.

Этот поток уравнивается встречным диффузионным потоком дырок *p*-слоя, имеющих большую энергию и способных преодолеть потенциальный барьер. Аналогичная картина в движении электронов: электроны *p*-слоя свободно скатываются в *n*-слой — это дрейфовый ток. Этот электронный поток уравнивается потоком электронов *n*-слоя, обладающих большой энергией. При приложении прямого напряжения потенциальный барьер понижается и появляются диффузионные токи как дырок, так и электронов, т. е. увеличивается инжекция неосновных носителей: дырок — в *n*-область, электронов — в *p*-область.

Обычно излучающей является область только по одну сторону *p-n*-перехода. На рис. 2.12 это *p*-область. Желательно, чтобы количество инжектированных носителей было максимально именно в излучающей (активной) *p*-области. С этой целью в *n*-область

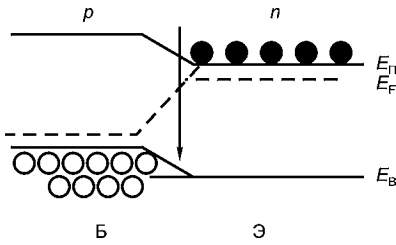


Рис. 2.12
Рекомбинация носителей
в $p-n$ -переходе

вводят донорной примеси больше, чем акцепторной в p -область. Таким образом, в излучающей структуре инжекция практически односторонняя — из n -эмиттера в p -базу, и излучает базовая область.

Материалы излучающих структур, как уже отмечалось, должны иметь широкую запрещенную зону. В таких структурах оказывается значительным и даже преобладающим рекомбинационный ток $I_{рек}$, вызванный процессами рекомбинации в области объемного разряда $p-n$ -перехода, как показано на рис. 2.12.

Чем шире запрещенная зона, тем больше потенциальный барьер и тем значительнее рекомбинация электронов в $p-n$ -переходе. Эта рекомбинация происходит обычно на глубоких центрах люминесценции и заканчивается генерацией тепловой энергии (генерация на центрах рекомбинации 2 показана на рис. 2.13). Таким образом, для оптического излучения эти электроны «пропадают», а рекомбинационный ток $I_{рек}$, ими создаваемый, снижает эффективность инжекции «излучающих» электронов.

Полезной компонентой тока, обеспечивающей излучательную рекомбинацию в p -базе, является электронный ток I_n , инжектируемый эмиттером. Эффективность инжекции определяется тем,

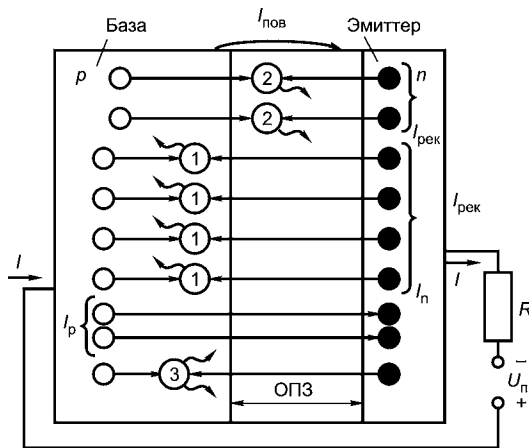


Рис. 2.13
Составляющие тока инжекционной электролюминесценции

насколько ток I_n отличается от полного тока I и характеризуется коэффициентом γ :

$$\gamma = \frac{I_n}{I} = \frac{I_n}{I_n + I_p + I_{\text{рек}} + I_{\text{тун}} + I_{\text{пов}}}, \quad (2.68)$$

где I_p — дырочная составляющая тока, обусловленная инжекцией дырок в n -эмиттер (доля I_p тем меньше, чем сильнее легирован n -эмиттер по сравнению с p -базой); $I_{\text{рек}}$ — ток безызлучательной рекомбинации в области p - n -перехода; $I_{\text{тун}}$ — туннельный ток, обусловленный просачиванием носителей сквозь потенциальный барьер ($I_{\text{тун}}$ тем больше, чем уже p - n -переход, чем сильнее легирована база и чем больше прямое напряжение); $I_{\text{пов}}$ — ток утечки по поверхности p - n -перехода.

Инжектированные в p -базу электроны рекомбинируют там вблизи p - n -перехода, при этом наряду с рекомбинацией, которая обеспечивает генерацию оптического излучения, существуют механизмы безызлучательной рекомбинации, не дающие излучения. К важнейшим из них относятся:

- рекомбинация на глубоких центрах люминесценции: электрон может переходить в валентную зону не непосредственно, а через те или иные центры рекомбинации, образующие энергетические уровни в запрещенной зоне. В этом случае энергия рекомбинации частично выделяется в виде длинноволновых фотонов, частично переходит в тепловые колебания решетки. В качестве таких центров выступают примеси и структурные дефекты. Особенно вредны примеси, образующие уровни вблизи середины запрещенной зоны (глубокие центры). К числу таких примесей относятся медь, никель, кобальт, хром, золото и некоторые другие;
- ударная, или Оже-рекомбинация. При очень высоких концентрациях свободных носителей заряда в полупроводнике увеличивается вероятность столкновения трех тел (например, двух электронов и дырки). Энергия рекомбинирующей электронно-дырочной пары при этом отдается третьему свободному носителю в форме кинетической энергии. Эта кинетическая энергия постепенно теряется при соударениях с решеткой.

Практически к безызлучательным актам рекомбинации следует отнести и такие, при которых генерируют фотоны с энергией, много меньшей ширины запрещенной зоны E_G . Получающееся при этом длинноволновое излучение выходит из рабочего спектрального диапазона излучателя и теряется при передаче оптического сигнала.

Количественно эффективность рекомбинации при люминесценции характеризуют внутренним квантовым выходом η_o , который

определяют как отношение числа актов излучательной рекомбинации к полному числу актов (излучательной и безызлучательной) рекомбинации. Иногда внутренний квантовый выход определяют отношением генерированных фотонов к числу инжектированных в активную область за то же время неосновных носителей заряда (в нашем примере — электронов в p -базу).

Таким образом, эффективность инжекционной электролюминесценции определяется произведением $\gamma\eta_o$. Предельный η_o определяется условиями изготовления p - n -перехода и электрическим режимом работы. Прежде всего, η_o зависит от плотности прямого тока I , как видно на рис. 2.14.

При малой плотности тока большое влияние оказывает рекомбинация в области объемного заряда, вследствие которой η_o сначала резко нарастает с увеличением I до тех пор, пока диффузионная

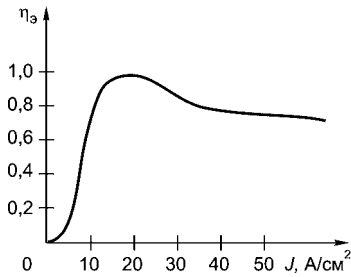


Рис. 2.14
Зависимость внутреннего квантового выхода от плотности прямого тока

компонента не становится преобладающей в токе диода. Дальнейшее увеличение I приводит к постепенному насыщению центров люминесценции и уменьшению η_o .

Влияние температуры сводится к изменению коэффициента инжекции и внутреннего квантового выхода. Коэффициент инжекции несколько увеличивается с ростом температуры; эффективность излучения обычно снижается, и внутренний квантовый выход уменьшается.

2.11. ПРЯМОЗОННЫЕ И НЕПРЯМОЗОННЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ

На первом этапе люминесценции возможны различные переходы электронов: «зона-зона», «зона — примесный уровень» и переходы между уровнями примеси. При межзонных переходах имеют место два основных случая, соответствующие прямым и непрямым переходам.

Наличие прямых и не прямых переходов объясняется зависимостью энергии электрона от его импульса, как показано на рис. 2.15. Импульс электрона P_o равен произведению его массы m_o на скорость движения:

$$P_o = m_o V. \quad (2.69)$$

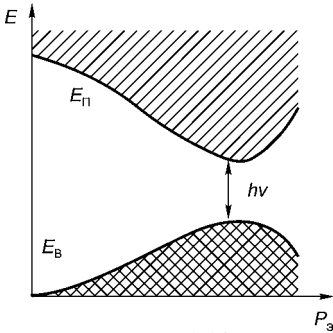


Рис. 2.15
Зависимость энергии электро-
на от импульса для прямых
переходов электронов

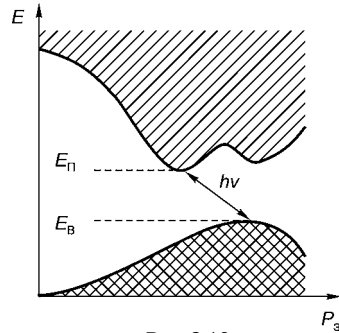


Рис. 2.16
Зависимость энергии электро-
на от импульса для непрямых
переходов электронов

Прямой переход — это переход электрона без изменения импульса электрона. Непрямой переход сопровождается изменением импульса электрона, которое компенсируется импульсом излучаемого или поглощаемого фотона.

По закону сохранения импульса при излучении или поглощении фотона должно выполняться равенство

$$P_{э1} = P_{э2} \pm k_{\phi}, \quad (2.70)$$

где $P_{э1}$ и $P_{э2}$ — начальный и конечный импульсы электрона соответственно; k_{ϕ} — импульс фотона.

Так как скорость движения фотона равна скорости света, то $k_{\phi} = m_{\phi}c$, где масса фотона m_{ϕ} связана с длиной волны соотношением де Бройля:

$$m_{\phi} = \frac{h}{\lambda c}. \quad (2.71)$$

Тогда импульс фотона

$$k_{\phi} = \frac{hv}{c} \approx \frac{E_G}{c}, \quad (2.72)$$

где E_G — ширина запрещенной зоны.

Для $E_G \approx 1$ эВ имеем $k_{\phi} \ll P_{э2}$, т. е. импульс электрона можно считать неизменным при прямом переходе ($P_{э1} \approx P_{э2}$), что соответствует переходу по вертикали между максимумом валентной зоны E_B и минимумом зоны проводимости E_G в соответствии с рис. 2.15.

Возможны также переходы электронов из валентной зоны в зону проводимости с изменением импульса электрона ($P_{э1} \neq P_{э2}$) — непрямые переходы. При этом в процессе поглощения энергии, кроме фотона и электрона, должна участвовать еще третья частица, которая заберет часть импульса на себя, как показано на рис. 2.16. Закон сохранения импульса при непрямых переходах имеет вид

$$P_{s1} = P_{s2} \pm k_{\phi} \pm k, \quad (2.73)$$

где k — импульс третьей частицы (например, фотона).

Основные материалы полупроводниковых излучателей (GaAs и тройные соединения на его основе — GaAlAs и GaAsP) относятся к прямозонным полупроводникам, т. е. к таким, в которых разрешены прямые оптические переходы «зона–зона». Каждая рекомбинация носителя заряда при таком переходе сопровождается излучением фотона, длина волны которого определяется соотношением

$$\lambda = \frac{1,24}{E_G}, \quad (2.74)$$

где λ — в микрометрах; E_G — в электрон-вольтах.

Таким образом, выполнение закона сохранения импульса (оно так же обязательно для любого электронного перехода, как и соблюдение закона сохранения энергии) при прямых переходах не требует участия в рекомбинации третьей (помимо электрона и дырки) частицы. Вследствие этого вероятность прямых оптических переходов высока, и прямозонные полупроводники являются эффективными люминесцентными материалами.

В непрямозонных полупроводниках (например, в фосфиде галлия GaP) минимум зоны проводимости смещен по оси импульса. Излучательная рекомбинация электрона с дыркой идет лишь на некотором комплексе, которому передается избыточный импульс и соответственно часть энергии. Длина волны излучения при непрямых переходах получается больше. Тем не менее излучательная рекомбинация может эффективно идти через подходящие примесные центры в два этапа: сначала происходит локализация носителя одного знака на примесном центре, а затем рекомбинация этого носителя со свободным носителем другого знака. В качестве таких центров излучательной рекомбинации в фосфиде галлия, например, выступают комплексы «донор–акцептор» ($Zn^{+}-O^{-}$) или нейтральные ловушки (атом N вместо атома P в решетке GaP).

Следует отметить, что самопоглощение излучения в прямозонных полупроводниках значительно сильнее, чем в непрямозонных.

Кроме двойных (бинарных) соединений широко используются и твердые растворы — в основном тройные соединения, например GaAlAs, GaAsP, InGaP и др. Структура формул тройных соединений показывает, атомы каких элементов замещают в кристаллической решетке друг друга. Ширина запрещенной зоны и структура энергетических зон твердых растворов зависят от соотношения компонентов в растворе.

Таблица 2.3

Перспективные материалы для элементной базы оптоэлектроники

Характеристика материала				Легирующая примесь	
Тип материала	Химическая формула	Ширина запрещенной зоны, эВ	Показатель преломления	p-типа	n-типа
A ^{III} B ^V	GaP	2,25	3,3	Zn, Cd	Se, Te
	GaAs	1,43	3,6	Zn, Cd	Se, Te
	GaN	3,25	2,1...2,4	Zn, Cd	Se, Te
	InN	2,4	2,9	Zn, Cd	Se, Te
	AlN	3,8	2,0	Zn, Cd	Se, Te
	AlP	2,45	—	Zn, Cd	Se, Te
	Ga _{1-x} In _x P	1,35...2,25	2,9...3,3	Zn, Cd	Se, Te
	Ga _{1-x} As _x P	1,43...2,25	3,3...3,6	Zn, Cd	Se, Te
	AlAs _{1-x} P _x	2,16...2,45	—	Zn, Cd	Se, Te
	Al _{1-x} In _x P	1,30...2,45	—	Zn, Cd	Se, Te
	Ga _{1-x} Al _x P	2,25...2,45	—	Zn, Cd	Se, Te
	GaAlN	3,25...3,8	—	Zn, Cd	Se, Te
	Ga _{1-x} In _x As _{1-y} P _y	0,36...2,25	2,9...3,3	Zn, Cd	Se, Te
Ga _{1-x} AlAs _{1-y} P _y	1,43...2,45	2,9...3,2	Zn, Cd	Se, Te	
Al _{1-x} In _x As _{1-y} P _y	0,36...2,45	3,0...3,2	Zn, Cd	Se, Te	
A ^{II} B ^{VI}	ZnS	3,8	2,4	Cu, P	Ai, Br, Cl
	CdS	2,9	2,5	Cu, P	Al, In, Ga, Br
	ZnSe	2,7	2,9	—	Al, Br, In, Ga
	CdSe	1,8	2,6	—	Cl, Br, I
	ZnTe	2,3	3,6	Cu, Ag, P	Al, Cl, Ga
	CdTe	1,6	2,8	Li, Sb, P	Al, Cl, In
	Zn _{1-x} Cd _x S	2,9...3,8	2,4...2,5	Cu, P	Al, In, Br, Ga
	Zn _{1-x} Cd _x Se	1,8...2,7	2,6...2,9	—	Br, Ga, In, Al
	ZnSe _{1-x} S _x	2,7...3,8	2,4...2,9	—	Al, Br, Cl
	Cd _{1-x} Se _x S	1,8...2,9	2,5...2,6	—	Al, Br, Cl
CdTe _{1-x} S _x	1,6...2,9	2,5...2,7	Cu, P, Sb	Cl, In, I	
A ^V B ^{VI}	SiC	2,8...3,3	2,5...2,7	Al, In	N
Другие материалы	Si	1,1	3,5	B, Ga, Al	As, P, Sp
	CuAlS ₂	3,5	—		
	GaS	3,4	—		
	ZnSe–GaP	2,25...2,70	2,9...3,3		
	ZnS–GaP	2,25...3,80	2,4...3,3		

В табл. 2.3 приведены материалы, которые используются для изготовления полупроводниковых излучателей; дано также значение ширины запрещенной зоны E_G для каждого материала.

Современные излучатели в основном используют прямые переходы. Выбор ширины запрещенной зоны E_G определяется рабочей длиной волны λ_p излучателя в оптическом диапазоне волн.

Из выражения (2.75) имеем

$$E_G = \frac{1,24}{\lambda_p}. \quad (2.75)$$

Следовательно, для работы в диапазоне видимого излучения (0,38...0,78 мкм) необходимы полупроводники с шириной запрещенной зоны 1,5...3,0 эВ. Это требование сразу исключает использование германия и кремния и других полупроводников, технология которых хорошо разработана и обуславливает переход к материалам типа $A^{III}B^V$, их твердым растворам и др.

В полупроводниках генерация оптического излучения обеспечивается обычно с помощью электролюминесценции. При электролюминесценции энергия возбуждения потребляется из электрического поля. Различают два вида электролюминесценции:

- инжекционную, которая возникает в p - n -переходе, находящемся под прямым напряжением;
- предпробойную, которая развивается в сильных полях, близких к тем, при которых появляется электрический пробой p - n -перехода.

Самое широкое применение в излучателях нашла инжекционная электролюминесценция.

2.12. ВНЕШНИЙ КВАНТОВЫЙ ВЫХОД И ПОТЕРИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Инжекционная электролюминесценция является физической основой работы излучающих полупроводниковых диодов. Термин «излучающие диоды» охватывает диоды, работающие в диапазоне видимого излучения, — это светоизлучающие диоды (СИД), используемые для визуального отображения информации, и диоды, работающие в инфракрасном диапазоне оптического излучения, — инфракрасные излучающие диоды (ИК-диоды).

Излучающий диод — основной и наиболее универсальный излучатель некогерентной оптоэлектроники. Это обуславливает следующие его достоинства: высокий КПД преобразования электрической энергии в оптическую; относительно узкий спектр из-

лучения (квазимонохроматичность) для одного типа диодов, с одной стороны, и перекрытие почти всего оптического диапазона излучения диодами различных типов — с другой; высокую для некогерентного излучателя направленность излучения; малое прямое падение напряжения, что обеспечивает электрическую совместимость СИД с интегральными схемами; высокое быстродействие; малые габариты; технологическую совместимость с микроэлектронными устройствами; высокую надежность и долговечность.

Качество излучающего диода характеризуется внешним квантовым выходом

$$\eta = \gamma \eta_o \eta_{\text{опт}}, \quad (2.76)$$

где γ — коэффициент инжекции; η_o — внутренний квантовый выход; $\eta_{\text{опт}}$ — оптическая эффективность, или коэффициент вывода света.

Произведение $\gamma \eta_o$ определяет эффективность инжекционной электролюминесценции. Однако даже при большом значении $\gamma \eta_o$ внешний квантовый выход может оказаться малым вследствие низкого вывода излучения из структуры диода во внешнюю среду. При выводе излучения из активной (излучающей) области диода имеют место потери энергии, показанные на рис. 2.17.

1. Потери на самопоглощение (излучение 1). При поглощении полупроводником фотонов их энергия может быть передана электронам валентной зоны с переводом этих электронов в зону проводимости. Возможно поглощение энергии фотонов свободными электронами зоны проводимости или дырками валентной зоны. При этом энергия фотонов расходуется также на перевод носителей на более высокие для них энергетические уровни, но в пределах соответствующей разрешенной зоны. Возможно примесное

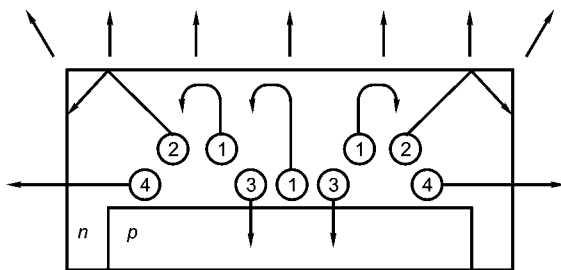


Рис. 2.17

Потери оптического излучения при выходе во внешнюю среду

поглощение фотонов, при котором их энергия расходуется на возбуждение примесных уровней. Кроме того, в полупроводниках может происходить поглощение фотонов кристаллической решеткой, поглощение с переходом электронов с акцепторного на донорный энергетический уровень и некоторые другие виды поглощения.

2. Потери на полное внутреннее отражение (излучение 2). При попадании излучения на границу раздела оптически более плотной среды (полупроводник) и оптически менее плотной (воздух) для частиц излучения выполняется условие полного внутреннего отражения. Эта часть излучения, отразившись внутри кристалла, в конечном счете теряется за счет самопоглощения.

Излучение, падающее на поверхность раздела под углом Θ , превышающим критический угол $\Theta_{кр}$, претерпевает полное внутреннее отражение; при $\Theta < \Theta_{кр}$ излучение частично отражается от непросветленной поверхности. Это френелевские потери. Если на поверхность полупроводника нанести диэлектрическую пленку с соответствующими значениями толщины и показателями преломления, то она будет оказывать просветляющее действие и коэффициент пропускания увеличится; критический угол при этом практически не изменится.

3. Потери на обратное 3 и торцевое 4 излучения. Генерация в активной области полупроводника спонтанная и характеризуется тем, что лучи равновероятно направлены во все стороны. Излучение 3, распространяющееся в сторону эмиттера, быстро поглощается.

Активная область нередко слегка отличается показателем преломления от соседних областей. Поэтому излучение 4 вследствие многократных отражений фокусируется вдоль активной области, так что интенсивность торцевого излучения выше, чем в других направлениях выхода света из кристалла.

Эффективность выхода оптического излучения из диода характеризуется коэффициентом выхода $\eta_{\text{опт}}$ и определяется отношением мощности выходящего излучения к мощности излучения, генерируемого внутри кристалла:

$$\eta_{\text{опт}} = \frac{P_{\text{изл.}}}{P_{\text{ген}}}. \quad (2.77)$$

Таким образом, внешний квантовый выход η — это интегральный показатель излучательной способности СИД, который учитывает эффективность инжекции γ , электролюминесценции η_e и вывода излучения $\eta_{\text{опт}}$ при создании оптического излучения.

2.13. ИЗЛУЧАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Наилучшие параметры имеют диоды, изготовленные на основе гетероструктур (или гетеропроходов) [23]. На рис. 2.18 представлены энергетические диаграммы излучающей гетероструктуры GaAlAs–GaAs в состоянии равновесия. На металлургической границе перехода образуется разрыв (скачок) энергии $\Delta E = E_{G1} - E_{G2}$. Таким образом, гетероструктура имеет разные потенциальные барьеры для инжектируемых дырок и электронов.

Движение носителей в равновесном состоянии гетероструктуры определяется носителями заряда только одного типа (для гетероструктуры на рис. 2.18 — электронами). Поэтому при приложении прямого напряжения имеет место односторонняя инжекция — только электронов из широкого слоя (эмиттера) в узкозонный слой (базу). Такая структура, содержащая широкозонный эмиттер и узкозонную базу, называется одинарной гетероструктурой.

Наряду с одинарной в излучающих диодах используется двойная гетероструктура, в которой имеется дополнительно запирающий широкозонный p_3 -слой того же, что и база, типа проводимости, как показано на рис. 2.19. В двойной гетероструктуре второй потенциальный барьер препятствует выходу электронов из базовой области (зона базы образует потенциальную яму, в которой скапливаются инжектированные электроны).

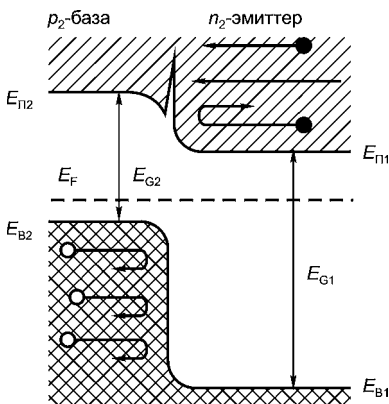


Рис. 2.18
Энергетическая диаграмма
излучающей одинарной
структуры

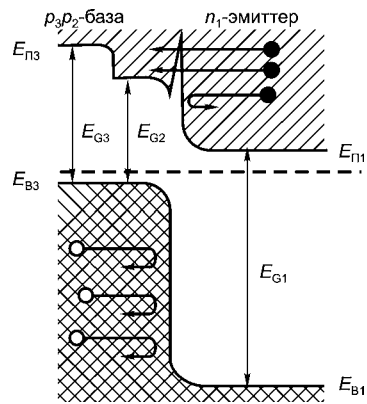


Рис. 2.19
Энергетическая
диаграмма двойной
гетероструктуры

Избыточная концентрация носителей в активной (излучающей) области и односторонняя инжекция резко повышают внутренний квантовый выход гетероструктуры, а также ее быстродействие.

В самом деле, использование двойной гетероструктуры обеспечивает локализацию инжектированных носителей зарядов в базе при уменьшении ее ширины до нескольких микрометров. Это и позволяет при сохранении внутреннего квантового выхода значительно повысить быстродействие двойных гетероструктур. В одинарной гетероструктуре при уменьшении ширины базы мощность излучения резко падает, а быстродействие растет незначительно. Для лучших образцов на одинарной гетероструктуре внешний квантовый выход составляет 3...4%, время переключения — 40...80 нс; у двойных гетероструктур примерно такой же внешний квантовый выход, а время переключения 20...30 нс.

Важно подчеркнуть, что односторонняя инжекция не связана со степенью легирования эмиттерной и базовой областей, как при обычном (гомогенном) переходе. В результате она сохраняется до значительной плотности тока и появляется возможность изменения степени легирования областей гетероструктуры без ухудшения инжекции p - n -перехода.

Другой отличительной особенностью гетероструктур является разница оптических свойств базы и эмиттера. Вследствие этого спектральная характеристика излучения узкозонной базы оказывается сдвинутой в область длинных волн по отношению к спектральной характеристике поглощения широкозонного эмиттера, как показано на рис. 2.20. Поэтому излучение выводится из СИД через эмиттер практически без поглощения.

В излучателях с двойной гетероструктурой и удаленной подложкой сказывается явление многократного отражения («многопроходный эффект»). Излучение, претерпевающее на внешней

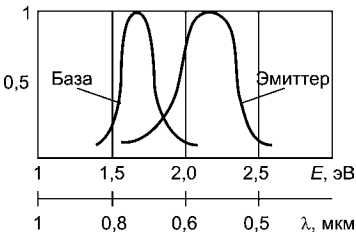


Рис. 2.20
Спектральная характеристика базы и эмиттера гетероструктуры

границе кристалла гетероструктуры полное внутреннее отражение, многократно отразившись от различных граней кристалла, в конце концов падает на внешнюю границу под таким углом, который дает возможность ему выйти наружу. Как видим, многопроходный эффект является полезным только в том случае, если поглощение излучения в полупроводнике мало. По-

глощение в узкозонной базе удается несколько компенсировать с помощью фотолюминесценции: поглощение кванта излучения ведет к новому акту излучения.

Все преимущества гетероструктур достижимы только при высоком качестве гетероперехода. Для получения качественного гетероперехода необходимо иметь хорошее совпадение параметров структуры по обе стороны от металлургической границы: различие постоянных кристаллических решеток не должно превышать 0,01%, близкими должны быть и температурные коэффициенты расширения. В тех случаях, когда эти требования не выполняются, высокая концентрация дефектов в области гетероперехода практически сводит к нулю все преимущества гетероперехода.

2.14. ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Свет, попадая в твердое тело, вступает с ним во взаимодействие, связанное с обменом энергии. Часть энергии излучения поглощается и идет на увеличение энергии электронов или фотонов (теплового движения атомов). Поглощение света в твердом теле происходит в соответствии с законом Бугера–Ламберта:

$$\Phi(x) = \Phi_0(1 - k)e^{-\alpha x}, \tag{2.78}$$

где k — коэффициент отражения; $\Phi(x)$ — поток световой энергии на расстоянии x от поверхности (вдоль луча); Φ_0 — падающий на поверхность поток световой энергии; α — коэффициент поглощения.

Обратная к нему величина $\chi_0 = \alpha_0^{-1}$ численно равна толщине слоя, при прохождении через который интенсивность света уменьшается в e раз, как показано на рис. 2.21. Зависимость коэффициента поглощения от частоты $\alpha(\nu)$ или от длины волны $\alpha(\lambda)$ характеризует спектр поглощения тела.

В полупроводниках различают пять основных видов поглощения излучения: собственное, примесное, экситонное, решеточное, на свободных носителях. Собственное (фундаментальное) поглощение определяется межзонными переходами электронов из валентной зоны в свободную и сопровождается генерацией электронно-дырочных пар. В зависимости от энергетического расстояния между зонами такое поглощение наблюдается в широкой области спектра, включая видимую, инфракрасную и ультрафиолетовую.

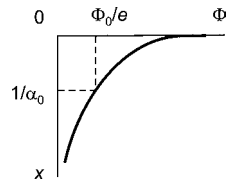


Рис. 2.21 Поглощение оптического излучения в полупроводнике

Собственное поглощение — типично пороговый процесс, поскольку минимальная энергия поглощаемых фотонов определяется шириной запрещенной зоны полупроводника. Область вблизи $h\nu \approx E_G$ называется краем собственного поглощения. При $h\nu < E_G$ коэффициент собственного поглощения равен нулю и излучение проходит через полупроводник без потерь. Вид спектральных зависимостей коэффициентов поглощения различных полупроводников определяется структурой их энергетических зон. Для прямозонных полупроводников типа GaAs у края собственного поглощения [9]:

$$\alpha = A(h\nu - E_G)^{1/2}, \quad (2.79)$$

где A — коэффициент, зависящий от эффективных масс носителей. Для полупроводников группы $A^{III}B^V$ можно принять $A \approx 10^4 \text{ см}^{-1} \cdot \text{эВ}^{-1/2}$. Тогда, если для $h\nu = E_G$, $\alpha = 0$, то при $h\nu - E_G = 0,01 \text{ эВ}$, $\alpha = 10^3 \text{ см}^{-1}$, т. е. собственное поглощение для прямозонных полупроводников резко возрастает даже при малых превышениях энергии поглощаемых фотонов относительно E_G .

Для непрямозонных полупроводников (Si, Ge, GaP и др.) переброс электрона в зону проводимости сопровождается изменением его квазиимпульса и требует участия в процессе поглощения третьего тела, например фонона. Минимальная энергия, необходимая для совершения непрямого перехода, будет $h\nu_{\min} = E_G + E_\phi$ для перехода с испусканием фонона. Тогда α будет состоять из двух слагаемых [9]:

$$\alpha = B \left(\frac{(h\nu - E_G + E_\phi)^2}{1 - \exp(-E_\phi/(KT))} - \frac{(h\nu - E_G - E_\phi)^2}{\exp(E_\phi/(KT)) - 1} \right), \quad (2.80)$$

где E_ϕ — энергия фонона; B — постоянная, не зависящая от температуры.

Примесное поглощение связано с процессами ионизации или возбуждения примесных уровней, лежащих в запрещенной зоне полупроводника. При этом под действием фотонов соответствующей энергии возможны переходы электронов с примесного уровня в зону проводимости, из валентной зоны на примесные уровни (фотоионизация мелких уровней) или с одного примесного уровня на другой (фотоионизация и фотонейтрализация глубоких уровней). В первых двух случаях генерируются свободные носители одного знака и спектр поглощения имеет вид сравнительно широкой полосы, сдвинутой относительно собственного поглощения в сторону более длинных волн. В третьем варианте свободные носители заряда не образуются, а спектр поглощения имеет вид узких линий.

Следует учитывать, что при комнатной температуре «мелкие» примесные уровни во многих полупроводниках ионизированы термически, так как энергия тепловых колебаний кристаллической решетки выше энергии активации ($kT > E_a$). Поэтому поглощение излучения примесями можно наблюдать лишь при достаточно низких температурах в ИК-области спектра ($\lambda = 10 \dots 200$ мкм). В то же время в полупроводниках существуют «глубокие» примесные уровни, вероятность термической ионизации которых при комнатной температуре мала. Они играют большую роль в фотоприемниках, поскольку определяют такие параметры полупроводников, как скорость рекомбинации неравновесных носителей, время их жизни и др.

На краю примесного поглощения, где $h\nu \approx E_a$,

$$\alpha \approx 8,3 \cdot 10^{-17} \cdot m_e \frac{N}{m_e^* E_a},$$

где N — концентрация примесей; E_a — энергия активации примесного уровня; m_e , m_e^* — масса свободного электрона и его эффективная масса в полупроводнике соответственно; n — показатель преломления.

Вследствие меньшей концентрации атомов примесей по сравнению с концентрацией атомов основного материала коэффициент примесного поглощения будет значительно меньше, чем собственного, в пределах $0,1 \dots 100$ см⁻¹.

Поглощение на свободных носителях, обусловленное электронными переходами внутри зон, существенно при концентрациях носителей выше $10^{19} \dots 10^{20}$ см⁻³.

В общем случае спектральная зависимость коэффициента поглощения на свободных носителях заряда может быть аппроксимирована степенной функцией вида

$$\alpha \approx n\lambda b,$$

где n — концентрация свободных носителей заряда; b — постоянный коэффициент, зависящий от механизма рассеяния (например, $b = 1,5$ при рассеянии на акустических фононах, $b = 3,5$ при рассеянии на ионизированных примесях).

Экситонное поглощение характерно для полупроводников с достаточно широкой запрещенной зоной. Экситон — слабосвязанная пара «электрон–дырка», имеющая серию энергетических уровней. Это нейтральное образование. Его появление не приводит к изменению электрических характеристик образца. Если температура достаточно высока, то под действием тепловой энергии электрон

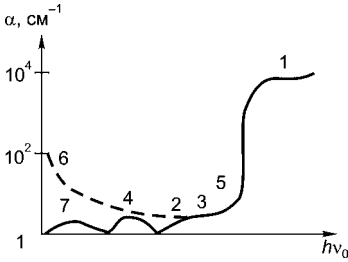


Рис. 2.22
Спектральные характеристики поглощения света в полупроводниковом материале

переходит в зону проводимости, т. е. в этом случае получается результат, достигаемый при собственном поглощении света. При этом фотопроводимость не меняется.

Решеточное поглощение происходит при взаимодействии поля световой волны с колеблющимися зарядами узлов решетки. Другими словами, при решеточном поглощении фотона рождается фонон, причем этот процесс не сопровождается фотогенерацией свободных носителей заряда. Спектр решеточного поглощения характеризуется рядом пиков поглощения, расположенных в ИК-области, обычно они накладываются на линии поглощения свободными носителями.

Таким образом, в результате поглощения излучения в полупроводнике возникают свободные носители заряда или изменяется концентрация этих носителей. Это явление носит название «внутренний фотоэффект» и характеризуется безразмерной величиной — квантовым выходом η , равным отношению числа генерируемых фотоносителей к числу поглощаемых полупроводником фотонов. При $h\nu < E_G$ $\eta = 0$, а при $h\nu > E_G$ η резко увеличивается и становится близким к единице, практически не меняясь при дальнейшем увеличении энергии фотонов. Избыточная энергия $\Delta E = h\nu - E_G$ идет на увеличение кинетической энергии электронов в зоне проводимости.

Спектр поглощения света твердым полупроводниковым материалом иллюстрирует рис. 2.22, а типы электронных переходов изображены на рис. 2.23.

На рис. 2.23 в случае 1 электрон из связанного состояния переходит в свободное (из валентной зоны — в зону проводимости).

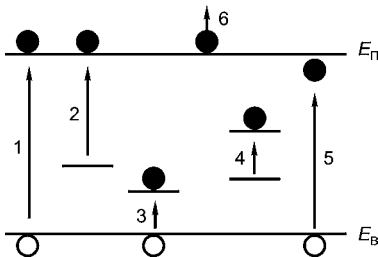


Рис. 2.23
Электронные переходы при поглощении света в полупроводниковом материале:

1 — собственное (фундаментальное) поглощение (электрон из связанного состояния переходит в свободное, из валентной зоны — в зону проводимости); $h\nu \geq E_G$; 2, 3 — примесное поглощение; 4 — внутривалентный переход; 5 — экситонное поглощение; 6 — поглощение свободными носителями заряда; E_n — энергия, соответствующая дну зоны проводимости; E_v — энергия, соответствующая потолку валентной зоны.

Это соответствует собственному (фундаментальному) поглощению. Случай 2 соответствует примесному поглощению. Как при собственном поглощении, так и при примесном наблюдается изменение электропроводности полупроводникового материала. При внутрицентровых переходах (случай 4) электрон не освобождается и, следовательно, электропроводность не меняется. Случай 5 соответствует экситонному поглощению и не сопровождается изменением электропроводности. Если температура достаточно высока, то под действием тепловой энергии электрон переходит в зону проводимости, т. е. в этом случае достигается тот же результат, что и при собственном поглощении света. Случай 6 иллюстрирует поглощение света свободными электронами пропорционально их концентрации. При собственном поглощении, если коэффициент поглощения $\alpha = 10^5 \text{ см}^{-1}$, глубина поглощения $x = 0,1 \text{ мкм}$, при примесном поглощении при концентрации электронов $N = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $\alpha = 10 \text{ см}^{-1}$, а глубина поглощения увеличивается до $x = 0,1 \text{ см}$. При $h\nu \approx 0,1 \text{ эВ}$ наблюдается поглощение света ионами решетки (случай 7 на рис. 2.22).

Работа фотоприемников, как правило, основана на эффекте собственного поглощения. В некоторых случаях, например для расширения спектральной характеристики, в длинноволновой области используют примесное поглощение.

2.15. ТИПЫ ПЕРЕХОДОВ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧАЮЩИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

На рис. 2.24 приведена схема электронных переходов при поглощении энергии полупроводниками. В излучателях используются обратные переходы, при которых энергия электронов уменьшается в полупроводниках с различной шириной запрещенной зоны E_G и различными примесями.

Переход 1 называется межзонным. Для получения излучения в диапазоне $0,38...0,78 \text{ мкм}$ используются прямозонные полупроводники с шириной запрещенной зоны $E_G = 1,6...3 \text{ эВ}$.

Переходы 2, 3, 4 — излучательные, с участием примесных уровней центров свечения.

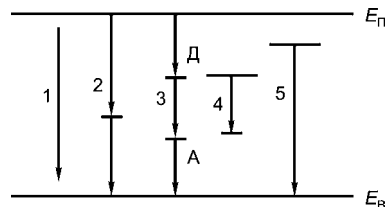


Рис. 2.24
Обратные электронные переходы при поглощении энергии полупроводниковыми материалами

Переход 2 иллюстрирует рекомбинацию электрона, находящегося в зоне проводимости, и дырки в валентной зоне через промежуточный акцепторный уровень.

Переход 3 соответствует случаю, когда рекомбинация происходит через донорный (Д) и акцепторный (А) уровни примесей.

Переход 4 — это переход электрона с возбужденного уровня на основной в пределах примесного центра (случай внутрицентральной рекомбинации). Добавки Fe, Co, Ni приводят к безызлучательным переходам через центры тушения.

Переход 5 наблюдается при низкой температуре и высоком уровне возбуждения и соответствует рекомбинации через экситонные состояния.

Эффект испускания фотонов полупроводниковыми структурами используется в излучающих диодах.

Излучающие диоды применяются в качестве излучателей в различных системах индикации, отображения информации, в волоконно-оптических линиях связи и во многих других устройствах; при этом диод выступает как самостоятельный элемент устройства — дискретный оптоэлектронный прибор или входит в состав другого оптоэлектронного прибора, например оптопары. Во втором случае излучающая структура должна обеспечить одновременно высокую мощность излучения, максимально узкую диаграмму направленности и высокое быстродействие. Только при таком сочетании параметров излучатель хорошо согласуется с фотоприемником оптопары и характеристики оптопары оптимальны. Для излучающих диодов, не входящих в состав оптопары, требования к направленности излучения обычно существенно ниже. Кроме того, светоизлучающие диоды могут иметь относительно низкое быстродействие, т. е. низкую скорость преобразования электрической энергии в световую.

В зависимости от способа приема излучения излучающего диода — визуального или невизуального — оптические свойства излучения диода описываются световыми или энергетическими параметрами. При визуальной передаче информации (в знаковых индикаторах; при подсветке надписей и пусковых кнопок; для индикации состояния электронного устройства и т. п.) приемником излучения служит человеческий глаз. Невизуальная передача информации характеризуется тем, что обнаружение потока излучения от диода, работающего обычно в инфракрасном диапазоне, исключает человеческое зрение и осуществляется физическим фотоприемником. К невизуальной области применения относятся, например, устройства считывания с перфокарт и перфолент

вычислительных машин, всевозможные оптические устройства связи и сигнализации и т. п.

Эффективность излучающего диода характеризуют зависимостями параметров оптического излучения от прямого тока через диод (излучающими характеристиками) и от длины волны излучения (спектральными характеристиками).

Для ИК-диодов излучательная характеристика представляет собой зависимость потока излучения Φ_e от прямого тока $I_{пр}$, представленную на рис. 2.25.

Для светоизлучающих диодов излучательная характеристика задается обычно зависимостью силы света I_V от прямого тока $I_{пр}$. В качестве параметра электрического режима выбран прямой ток через диод, а не падение напряжения на диоде. Это связано с тем, что $p-n$ -переход излучающего диода включен в прямом направлении и электрическое сопротивление диода мало. Поэтому можно считать, что прямой ток через излучающий диод задается внешней цепью, изменяется в широком диапазоне и легко измеряется.

При малых токах $I_{пр}$ велика доля безызлучательной рекомбинационной составляющей тока и коэффициент инжекции мал.

С ростом прямого тока поток излучения сначала быстро увеличивается — до тех пор, пока в токе диода не становится преобладающей диффузионная составляющая тока. Дальнейшее увеличение $I_{пр}$ приводит к постепенному насыщению центров люминесценции и снижению излучательной способности диода. Кроме того, с ростом тока увеличивается вероятность ударной рекомбинации, что также снижает излучательную способность. Совместное действие рассмотренных механизмов влияния прямого тока на силу излучения приводит к тому, что излучательная характеристика максимальна при некотором токе. Максимальная сила излучения зависит от площади и геометрии излучающего $p-n$ -перехода и от размеров электрических контактов.

Зависимость длины волны от параметров оптического излучения (или от энергии излучаемых фотонов) называется спектральной характеристикой излучающего диода. Длина волны излучения определяется разностью двух энергетических уровней, между

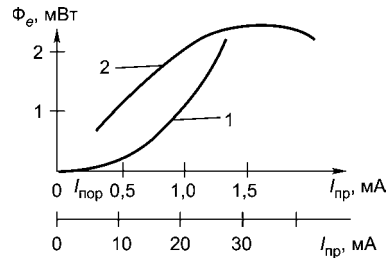


Рис. 2.25
Излучательная характеристика СИД:
кривой 1 соответствует верхняя шкала; кривой 2 — нижняя.

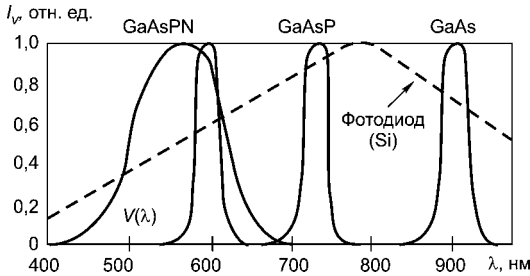


Рис. 2.26
Спектральная
характеристика глаза,
СИД фото диода

которыми происходит переход электронов при люминесценции. В связи с разной шириной запрещенной зоны у разных материалов длина волны излучения различается в разных типах излучающих диодов. Примеры спектральных характеристик приведены на рис. 2.26.

Так как переход электронов при рекомбинации носителей зарядов обычно происходит не между двумя энергетическими уровнями, а между двумя группами энергетических уровней, то спектр излучения оказывается размытым. Спектральный диапазон излучающего диода характеризуют шириной спектра излучения $\Delta\lambda_{0,5}$, измеряемой на половине максимальной силы света I_ν . Излучение большинства излучающих диодов близко к квазимонохроматическому ($\Delta\lambda/\lambda_{\max} \ll 1$) и имеет относительно высокую направленность распределения мощности в пространстве.

Независимо от того, насколько эффективен излучающий диод, выходное излучение даже большой мощности не будет зарегистрировано, если длина волны излучения не соответствует спектру излучения, на которое реагирует фотоприемник. В огромном большинстве случаев излучающий диод должен быть спектрально согласован либо с человеческим глазом, либо с кремниевым фотоприемником. Диапазон спектральной чувствительности фотоприемника составляет примерно $0,3 \dots 1,1$ мкм. Человеческий глаз обладает существенно более узким диапазоном чувствительности с практически полезной областью $0,4 \dots 0,7$ мкм. Для эффективной работы пары «излучатель–фотоприемник» необходимо тщательное согласование спектральных характеристик этих приборов.

Например, согласование с человеческим глазом светоизлучающего диода на основе GaAsP обеспечивается выбором такой длины волны, при которой произведение относительной световой эффективности глаза $V(\lambda)$ и квантового выхода СИД η является максимальным, т. е.

$$V(\lambda)\eta(\lambda) = \max. \quad (2.81)$$

Этот максимум достигается при $\lambda = 655$ нм, как показано на рис. 2.27, при красном цвете излучения.

В СИД, имеющих более короткую длину волны излучения (например, $\lambda_{\text{max}} = 565$ нм, зеленый цвет, и $\lambda_{\text{max}} = 585$ нм, желтый цвет), η обычно существенно ниже, чем у излучающего диода красного цвета. Однако относительная чувствительность глаза при такой длине волны значительно выше. В результате удается получить набор излучателей от красного до зеленого цвета свечения, для которых произведение $V(\lambda)\eta$ одинаково. На рис. 2.27 представлены также для сравнения спектральные характеристики чувствительности человеческого глаза и фотодиода (пунктиром) в относительных единицах. Следует подчеркнуть особенности спектрального согласования излучающего диода с фотодиодом. С одной стороны, такое согласование облегчается, так как спектральный диапазон фотодиода значительно шире, чем спектр $V(\lambda)$, с другой — спектральное согласование не всегда является решающим фактором эффективной работы пары «излучатель–фотодиод».

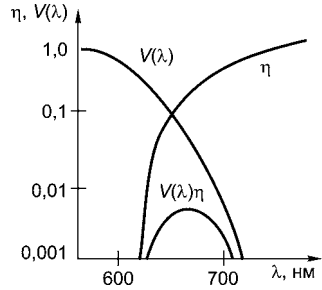


Рис. 2.27
Согласование спектральной характеристики светодиода и относительной световой эффективности

2.16. ПАРАМЕТРЫ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Параметры оптического излучения, а также их определения, расчетные формулы, единицы величин и обозначения сведены в табл. 2.4.

Излучение в оптическом диапазоне может характеризоваться как волновыми, так и корпускулярными категориями и параметрами и может быть представлено в виде потока фотонов. Энергия каждого фотона определяется соотношением

$$E_{\phi} = h\nu = \frac{hc}{n\lambda}, \tag{2.82}$$

где h — постоянная Планка, $h = 4,13 \cdot 10^{-15}$ эВ·с; c — скорость света в вакууме, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с; n — показатель преломления оптической среды; ν , λ — частота колебаний (Гц) и длина волны (м) оптического излучения соответственно.

Таблица 2.4

Энергетические и световые параметры оптического излучения

Энергетические параметры		Определение	Формула	Световые параметры	
Название и обозначение	Единица измерения			Название и обозначение	Единица измерения
Поток излучения Φ_e	Вт	Скорость переноса энергии излучения	$\Phi = \frac{dQ}{dt}$	Световой поток Φ_V	лм
Сила излучения I_e	Вт/ср	Поток в единице телесного угла	$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$	Сила света I_V	кд = лм/ср
Энергетическая светимость (излучательность) M_e	Вт/м ²	Поток с единицы площади излучающей поверхности	$M = \frac{d\Phi}{dS}$	Светимость M_V	лм/м ²
Энергетическая яркость L_e	Вт/(ср·м ²)	Поток в единице телесного угла, отнесенный к площади, излучающей с учетом угла падения луча относительно нормали	$L = \frac{dI}{dS \cos \phi}$	Яркость L_V	кд/м ² = лм/(ср·м ²)
Энергетическая освещенность (облученность) E_e	Вт/м ²	Поток на единицу площади поверхности приемника излучения	$E = \frac{d\Phi}{dS}$	Освещенность E_V	лк = лм/м ²

Пусть в единицу времени через единичную площадь проходит N_ϕ фотонов. Тогда поток излучения Φ определяется выражением

$$\Phi = N_\phi E_\phi S = N_\phi \frac{hc}{n\lambda} S, \quad (2.83)$$

где S — площадь.

Поток излучения при заданном N_ϕ тем больше, чем короче длина волны излучения. Полезно выразить число фотонов через энергетические параметры излучения

$$N_\phi = \frac{\Phi}{SE_\phi} = 5 \cdot 10^{16} \lambda \frac{\Phi}{S}, \quad (2.84)$$

где единицы измерения N_ϕ — $1/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; λ — мкм; Φ/S — Вт/м².

Тестовые вопросы к главе 2

«ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ»

- 2.1. Какой длине волны соответствует максимальная чувствительность глаза:
- а) 0,41 мкм;
 - б) 0,56 мкм;
 - в) 0,63 мм;
 - г) 0,72 мм?
- 2.2. Какой длине волны соответствует минимальная чувствительность глаза в области, близкой к ультрафиолетовому излучению:
- а) 0,4 мкм;
 - б) 0,45 мкм;
 - в) 0,5 мкм;
 - г) 0,6 мкм?
- 2.3. Какой длине волны соответствует минимальная чувствительность глаза в области, близкой к инфракрасному излучению:
- а) 0,72 мкм;
 - б) 0,62 мкм;
 - в) 0,55 мкм;
 - г) 0,5 мкм?
- 2.4. Какой материал относится к непрямозонным:
- а) ZnSe;
 - б) GaP;
 - в) GaN;
 - г) CdS?
- 2.5. Какие пары материалов позволяют создавать гетерооптоэлектронные приборы:
- а) Ge–Ge;
 - б) Si–Si;
 - в) GaAs–GaAlAs;
 - г) GaAs–GaAs?
- 2.6. Какой механизм генерации излучения реализуется в полупроводниках:
- а) эффект термоэлектронной эмиссии;
 - б) эффект генерации электронно-дырочных пар;
 - в) эффект рекомбинации;
 - г) эффект фотолюминесценции?
- 2.7. Какие материалы пригодны для изготовления излучающих приборов:
- а) Ge;
 - б) Si;
 - в) Cu;
 - г) GaP?
- 2.8. Какие материалы пригодны для изготовления фотоприемников:
- а) Al;
 - б) Au;
 - в) Ge;
 - г) Si?
- 2.9. Какая ширина запрещенной зоны E_G у материалов, применяемых для изготовления оптоэлектронных приборов видимой области спектра:
- а) 0,1 эВ;
 - б) 1,5 эВ;
 - в) 3,5 эВ;
 - г) 6 эВ?
- 2.10. Какая составляющая общего тока p – n -перехода обеспечивает инжекционную электролюминесценцию:
- а) обратный ток p – n -перехода;
 - б) прямой ток p – n -перехода;
 - в) туннельный ток;
 - г) ток утечки по поверхности p – n -перехода?

ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДЫ

3.1. АБСОЛЮТНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Абсолютный показатель преломления (АПП) является одной из важнейших характеристик среды распространения электромагнитной волны и может быть представлен в виде

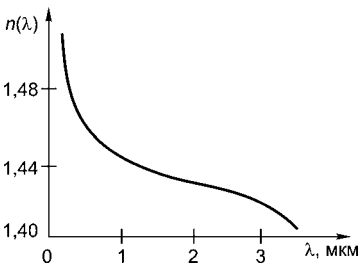


Рис. 3.1
Зависимость $n(\lambda)$ для SiO_2

$$\text{АПП} = n = \frac{C}{V_{\Phi}} = \frac{\lambda_0}{\lambda} = \sqrt{\epsilon\mu}, \quad (3.1)$$

где λ_0 — длина волны в вакууме; λ — длина волны в диэлектрике; ϵ и μ — относительные диэлектрическая и магнитная проницаемость диэлектрика соответственно.

Существенной особенностью АПП является его зависимость от длины волны λ . Для беспримесной двуокиси кремния (SiO_2), используемой для изготовления волокон, указанная зависимость имеет вид, показанный на рис. 3.1.

3.2. ЗАКОНЫ ОТРАЖЕНИЯ И ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА

3.2.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Введем минимум определений, необходимых для понимания законов отражения и преломления света.

Углом падения волны на границу раздела двух сред AB с АПП n_1 и n_2 в соответствии с рис. 3.2 называется угол φ_1 между падающим лучом I и нормалью \vec{N}_1 к границе AB .

Угол отражения φ_3 отсчитывается между нормалью \vec{N}_1 и отраженным лучом 3. Угол преломления φ_2 отсчитывается между нормалью \vec{N}_2 к границе раздела AB и преломленным лучом 2.

Суть законов отражения и преломления света заключается в следующем.

При падении электромагнитной волны на границу раздела с АПП n_1 и n_2 падающий, преломленный и отраженный лучи располагаются в одной плоскости с нормальми $\vec{N}_{1,2}$, проходящими через точку O и ортогональными границе раздела AB , как показано на рис. 3.2.

Частоты падающей, отраженной и преломленной волн одинаковы. Угол падения φ_1 равен углу отражения φ_3 . Угол падения φ_1 связан с углом преломления φ_2 соотношением

$$n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi_2. \tag{3.2}$$

3.2.2. УСЛОВИЕ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА ОТ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ДВУХ СРЕД

Согласно закону преломления (выражение (3.2)) ход лучей 1 и 2 обратим, что видно на рис. 3.2, поэтому рис. 3.2 соответствует рис. 3.3.

Согласно рис. 3.3а $n_2 > n_1$, а с учетом выражения (3.2) $\sin \varphi_2 < \sin \varphi_1$, $\varphi_2 < \varphi_1$.

Увеличим угол падения φ_2 настолько, чтобы луч 1 начал скользить вдоль границы раздела AB (рис. 3.3б). В этом случае угол преломления $\varphi_1 = 90^\circ$. При $\varphi_1 = 90^\circ$ угол φ_2 называют предельным углом падения светового луча на границу раздела двух сред и обозначают $\varphi_{пр}$. Если $\varphi_2 > \varphi_{пр}$ (рис. 3.3в), волна, соответствующая

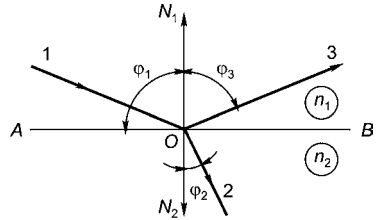


Рис. 3.2
Отражение и преломление света

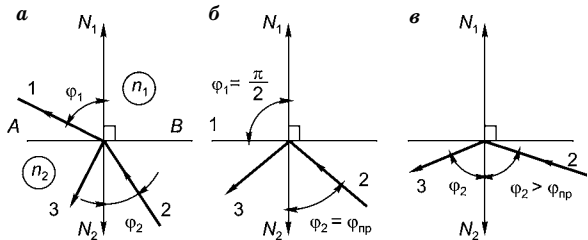


Рис. 3.3
Определение условия полного внутреннего отражения:

а — $\varphi_2 < \varphi_{пр}$; б — $\varphi_2 = \varphi_{пр}$, в — $\varphi_2 > \varphi_{пр}$; 1 — преломленный луч; 2 — падающий луч; 3 — отраженный луч.

лучу 1, быстро затухает и остается только отраженная волна, соответствующая лучу 3 (рис. 3.3б).

Такое явление называют полным внутренним отражением (ПВО) света от границы раздела AB (рис. 3.3в). Из сказанного ясно, что условие ПВО описывается двумя неравенствами:

$$\varphi_2 > \varphi_{\text{пр}}, \quad n_2 > n_1. \quad (3.3)$$

В заключение заметим, что условие ПВО является одним из главных необходимых условий распространения света по диэлектрическим волноводам.

3.3. КОНСТРУКЦИЯ ПЛАНАРНОГО СИММЕТРИЧНОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА

Планарный симметричный оптический волновод (ПОВ) представляет собой тонкий слой диэлектрика толщиной $d = (2 \dots 5)\lambda$, где λ — длина волны оптического излучения в волноводном слое.

Волноводный слой с АПП = n_c , как показано на рис. 3.4, ограничен сверху и снизу диэлектриком с АПП = $n_0 > n_c$.

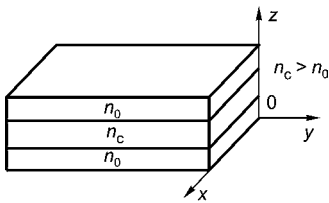


Рис. 3.4
Планарный волновод

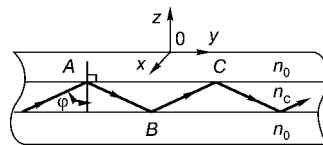


Рис. 3.5
Условие ПВО
в планарном волноводе

На рис. 3.5 изображено одно из сечений ПОВ, параллельное плоскости ZOY трехмерной декартовой системы координат, и условие ПВО в волноводном слое. В соответствии с рис. 3.5 свет распространяется вдоль волноводного слоя по зигзагообразной траектории, испытывая ПВО в точках A, B, C и аналогичных других.

3.4. ЭФФЕКТ ГУСА–ХЕНХЕНА

В 1947 г. Гусом и Хенхеном было установлено, что ПВО волны от границы раздела двух диэлектриков происходит не в точках A, B, C , как показано на рис. 3.5, а в некоторой области пространства, расположенного в слое с АПП = n_0 в соответствии с рис. 3.6.

Глубина проникновения волны (в слой с АПП = n_0) $h \approx \lambda$, где λ — длина волны в указанном слое.

На рис. 3.7 показан один из вариантов взаимного расположения векторов $\vec{E}, \vec{H}, \vec{V}$ в электромагнитной волне в процессе отражения света.

Вектор напряженности магнитной компоненты поля \vec{H} принадлежит плоскости рисунка, ортогонален вектору фазовой скорости волны \vec{V} и вектору \vec{E} . Вектор \vec{E} линейно поляризован в плоскости, ортогональной плоскости рисунка.

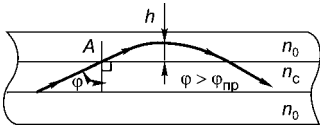


Рис. 3.6
Суть эффекта Гуса-Хенхена

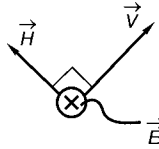


Рис. 3.7
ТЕ-мода

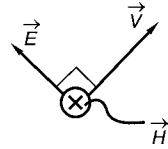


Рис. 3.8
ТМ-мода

Волна, соответствующая рис. 3.7, носит название ТЕ-моды оптического излучения. Смысл ТМ-моды поясняет рис. 3.8. В случаях ТЕ- и ТМ-моды взаимное расположение векторов $\vec{E}, \vec{H}, \vec{V}$ подчиняется правилу правого винта.

Если длина траектории волны в верхнем слое ПОВ равна l , как на рис. 3.6, фаза волны в окрестности точки A получает приращение пространственной компоненты на величину

$$\delta_A = Kl = \frac{2\pi}{\lambda} l = \frac{2\pi}{\lambda_0} l n_0. \tag{3.4}$$

Если вектор \vec{E} волны, распространяющейся в волноводном слое, поляризован ортогонально плоскости рис. 3.7 (ТЕ-мода), приращение пространственной компоненты δ_A можно рассчитать по формуле

$$\delta_A = \delta_{TE} = -2 \operatorname{arctg} \left[\frac{(n_c^2 \sin^2 \varphi_m - n_0^2)^{1/2}}{n_c \cos \varphi_m} \right]. \tag{3.5}$$

Если вектор \vec{E} поляризован в плоскости, как показано на рис. 3.8, что соответствует ТМ-моду, то

$$\delta_A = \delta_{TM} = -2 \operatorname{arctg} \left[\left(\frac{n_c}{n_0} \right)^2 \frac{(n_c^2 \sin^2 \varphi_m - n_0^2)^{1/2}}{n_c \cos \varphi_m} \right], \tag{3.6}$$

где φ_m — квантовое значение угла $\varphi_2 > \varphi_{пр}$, показанного на рис. 3.3в.

3.5. УСЛОВИЕ ПОПЕРЕЧНОГО РЕЗОНАНСА ДЛЯ ПЛАНАРНОГО ВОЛНОВОДА

Заметим, что по оптическим волноводам распространяются не лучи, а световые пучки конечной ширины. На рис. 3.9 показан механизм двойного переотражения одного из таких пучков в режиме ПВО.

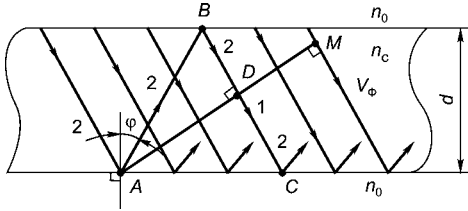


Рис. 3.9
Механизм двойного
переотражения одного
пучка в режиме ПВО

На рис. 3.9 волна 1 в точке D и волна 2 перед отражением от границы $n_c \rightarrow n_0$ в точке A находятся в одной фазе, поскольку принадлежат одному волновому фронту AM .

При распространении по траектории DC волна 1 получает приращение пространственной компоненты фазы

$$\Delta\Phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda_0}(DC)n_c. \quad (3.7)$$

Волна 2, распространяясь по траектории ABC , получает приращение фазы

$$\Delta\Phi_2 = \delta_A + \frac{2\pi}{\lambda_0}(AB)n_c + \delta_B + \frac{2\pi}{\lambda_0}(BC)n_c, \quad (3.8)$$

где $\delta_A = \delta_B = \delta$ и определяется формулами (3.5) и (3.6), в зависимости от поляризации.

Разность приращений пространственных компонент фаз (3.7) и (3.8)

$$\Delta\Phi = \Delta\Phi_2 - \Delta\Phi_1. \quad (3.9)$$

В установившемся режиме распространения света по волноводу волны типа 1 и 2 интерферируют в точке C .

Условие непогашения волн 1 и 2 в точке C аналогично условию интерференционных максимумов, которое имеет вид

$$\Delta\Phi = \Delta\Phi_2 - \Delta\Phi_1 = 2\pi m. \quad (3.10)$$

Выражая DC, AB, BC через толщину волноводного слоя d и проводя элементарные тригонометрические преобразования, получа-

ем условие поперечного резонанса для планарного волновода из формул (2.7)–(2.10) в виде

$$\delta + \frac{2\pi d n_c \cos \varphi_m}{\lambda_0} = \pi m, \quad (3.11)$$

где $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

Угол φ_m имеет индекс m , поскольку он квантован согласно формуле (3.11) (т. е. не может быть произвольной величины).

Планарные волноводы широко применяются в современных оптических трактах связи. Они являются компонентами полупроводниковых оптических квантовых генераторов, модуляторов света и оптических переключателей.

3.6. МОДА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Мода оптического излучения представляет собой электромагнитную волну, характеризующуюся:

- частотой излучения;
- временной и пространственной когерентностью;
- поляризацией вектора \vec{E} (ТЕ- или ТМ-мода);
- дискретным углом падения φ_m на границу раздела $n_c \rightarrow n_0$;
- модовым квантовым числом (m);
- эффективным волноводным показателем преломления $n_{\text{эфф}} = n_c \sin \varphi_m$;
- постоянной распространения $\beta = k_0 n_{\text{эфф}}$, где $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ — модуль волнового вектора в вакууме.

3.7. КОНСТРУКЦИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА — СТЕКЛОВОЛОКНА (СВ)

Конструкция СВ показана на рис. 3.10. Такое СВ имеет ступенчатый профиль распределения АПП вдоль диаметра СВ. Для обеспечения условия ПВО АПП центральной части СВ (n_c) незначительно превышает АПП оболочки n_0 . Например, $n_c = 1,48$; $n_0 = 1,46$.

Типичные размеры диаметров центральной части волокна D_c и оболочки D_0 следующие: $D_c = 50$ мкм, $D_0 = 120$ мкм. Для повышения механической прочности на СВ наносится полимерное покрытие, которое на рис. 3.10 не показано.

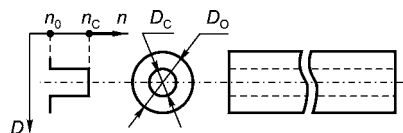


Рис. 3.10
Цилиндрический волновод

3.8. НОМИНАЛЬНАЯ ЧИСЛОВАЯ АПЕРТУРА СТЕКЛОВОЛКНА

Направим световой пучок на торец СВ так, как показано на рис. 3.11. Пучок ограничен двумя крайними лучами 1 и 2. Луч 1 составляет угол γ_k с осью симметрии СВ, луч 2 распространяется вдоль оси симметрии СВ.

Луч 1 преломляется на границе $n_V \rightarrow n_C$ под углом β и превращается в луч 3. Соответствующая лучу 3 волна в точке В распадается на две, волна 4 преломляется в среду с АПП = n_0 под углом α , волна 5 отражается от границы $n_C \rightarrow n_0$.

Назовем угол γ_k критическим и потребуем, чтобы ему соответствовал предельный угол падения $\varphi = \varphi_{\text{пр}}$ на границу раздела $n_C \rightarrow n_0$, как показано на рис. 3.11. Тогда угол преломления $\alpha = \pi/2$ и волна 4 скользит вдоль границы раздела $n_C \rightarrow n_0$. В окрестности точки А закон преломления света имеет вид $n_B \sin \gamma_k = n_C \sin \beta$, где n_B — АПП среды, из которой свет попадает на торец СВ. Из треугольника АВС имеем $\beta = \pi/2 - \varphi_{\text{пр}}$; $\sin \beta = \cos \varphi_{\text{пр}}$. Следовательно, $n_B \sin \gamma_k = n_C \sin \varphi_{\text{пр}}$ и

$$\cos \varphi_{\text{пр}} = \frac{n_B}{n_C} \sin \gamma_k. \quad (3.12)$$

В окрестности точки В $n_C \sin \varphi_{\text{пр}} = n_0 \sin \pi/2 = n_0$, откуда

$$\sin \varphi_{\text{пр}} = \frac{n_0}{n_C}. \quad (3.13)$$

Возведя во вторую степень выражения (3.12) и (3.13) и сложив их почленно, получим

$$\begin{aligned} \left(\frac{n_B}{n_C}\right)^2 \sin^2 \gamma_k + \frac{n_0^2}{n_C^2} &= 1; \\ n_B^2 \sin^2 \gamma_k &= n_C^2 - n_0^2; \\ n_B \sin \gamma_k &= \sqrt{n_C^2 - n_0^2} = A. \end{aligned} \quad (3.14)$$

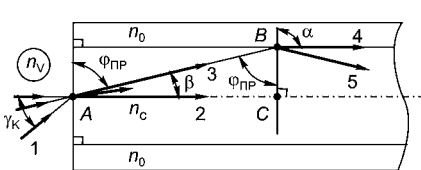


Рис. 3.11

Прохождение лучей в световоде

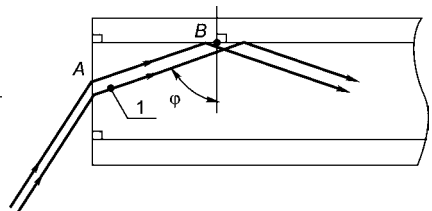


Рис. 3.12

К определению цифровой апертуры

Выражение (3.14) позволяет определить номинальную числовую апертуру A стекловолокна.

Согласно рис. 3.11 и 3.12 при $\gamma < \gamma_k$ в окрестности точки B имеет место ПВО и свет распространяется вдоль СВ по зигзагообразной траектории. При $\gamma < \gamma_k$ условие ПВО не выполняется и энергия волны Z постепенно переходит в оболочку.

3.9. КВАНТОВАНИЕ УГЛОВ φ и γ В СТЕКЛОВОЛОКНЕ

Если световой пучок распространяется зигзагообразно по СВ в плоскости, проходящей через ось симметрии СВ, как на рис. 3.11, и выполняется условие ПВО для СВ, как и для планарного волновода, то имеет место поперечный резонанс в виде, аналогичном формуле (3.11):

$$\delta + \frac{2\pi D_C n_C \cos \varphi_m}{\lambda_0} = \pi m, \quad (3.15)$$

где D_C — диаметр центральной части СВ. Согласно формуле (3.15) угол $\varphi = \varphi_m$ квантован и

$$\cos \varphi_m = \frac{\left(m - \frac{\delta}{\pi}\right) \lambda_0}{2D_C n_C}. \quad (3.16)$$

По аналогии с выражением (3.12)

$$\cos \varphi_m = \frac{n_B}{n_C} \sin \gamma_m. \quad (3.17)$$

Из выражений (3.16) и (3.17)

$$\sin \gamma_m = \frac{\left(m - \frac{\delta}{\pi}\right) \lambda_0}{2D_C n_B}. \quad (3.18)$$

Согласно выражениям (3.16) и (3.17) квантованные углы φ и γ равны:

$$\varphi_m = \arccos \left[\frac{\left(m - \frac{\delta}{\pi}\right) \lambda_0}{2D_C n_C} \right]; \quad (3.19)$$

$$\gamma_m = \arcsin \left[\frac{\left(m - \frac{\delta}{\pi}\right) \lambda_0}{2D_C n_B} \right], \quad (3.20)$$

где $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

3.10. УШИРЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ В СТЕКЛОВОЛОКНЕ

3.10.1. УШИРЕНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА, ОБУСЛОВЛЕННОЕ РАСХОДИМОСТЬЮ СВЕТОВОГО ПУЧКА

По современным волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС) передаются высокочастотные (примерно $10^9 \dots 10^{14}$ Гц) импульсные сигналы прямоугольной формы, соответствующие единице (1) цифровой информации. Промежутки между единицами заполняются нулями. Различные сочетания единиц и нулей битов позволяют воспроизвести любой аналоговый сигнал, т. е. закодировать его и запустить в стекловолокно в виде высокочастотных оптических импульсов.

К оптическим импульсам предъявляются два важнейших требования: 1) длительность единиц и нулей битов должна быть одинакова; 2) импульс не должен уширяться в пространстве и времени. Нарушение этих требований приводит к накладкам импульсов, то есть искажает исходную аналоговую информацию.

Рассмотрим, к чему приводит расходимость пучка световых лучей, вводимых в СВ, как показано на рис. 3.11. Согласно рис. 3.11 между крайними лучами 2 и 3 светового пучка находится множество лучей, распространяющихся внутри конуса с углом при вершине угла BAC . Каждому лучу соответствует определенная электромагнитная волна. Все волны одной и той же частоты, но падают на границу раздела $n_C \rightarrow n_B$ под разными углами φ_m . Разным углам соответствуют разные моды оптического излучения. Таким образом, в данном случае СВ со ступенчатым профилем АПП работает в многомодовом режиме. Согласно рис. 3.11 луч 2 распространяется вдоль оси симметрии стекловолокна и достигает сечения BC за время

$$t_2 = \frac{AC}{V} = \frac{l_2 n_C}{c}. \quad (3.21)$$

Луч 3 достигает сечения BC за время

$$t_3 = \frac{AB}{V} = \frac{l_3 n_C}{c}. \quad (3.22)$$

Уширение импульсного сигнала на участке от точки A до сечения BC составит межмодовую дисперсию, определяемую временем

$$\tau_{\text{ММ}} = t_3 - t_2 = \frac{n_C}{c} (l_3 - l_2) = \frac{n_C}{c} \left(\frac{l_2}{\sin \varphi_{\text{нр}}} - l_2 \right). \quad (3.23)$$

Она имеет смысл временного уширения импульсного оптического сигнала за половину времени одного ПВО электромагнитной волны. Термин «дисперсия» является исторически сложившимся техническим термином. Реальная физическая материальная дисперсия света — это зависимость АПП от длины (или частоты) электромагнитной волны (см. раздел 3.1).

Уширение импульсного оптического сигнала, обусловленное зависимостью волнового числа от частоты электромагнитной волны.

Предположим, что волновой пакет распространяется по СВ в виде единственной моды (пучка параллельных лучей) с групповой скоростью

$$V_{\Gamma} = \frac{d\omega}{dk}. \quad (3.24)$$

Материальной дисперсией (зависимостью $n(\omega)$) пренебрегаем в соответствии с рис. 3.12.

Время распространения света t вдоль траектории $l = AB$ определяется по формуле

$$t = \frac{l}{V_{\Gamma}} = l \frac{dk}{d\omega}. \quad (3.25)$$

Временное уширение импульса $\tau_{\text{ВМ}}$ за половину времени одного акта ПВО определяется как

$$\tau_{\text{ВМ}} = \Delta t = l \frac{d^2k}{d\omega^2} \Delta\omega. \quad (3.26)$$

Нахождение Δt из формулы (3.25) в данном случае аналогично нахождению дифференциала левой и правой части формулы (3.25) с последующей заменой dt на Δt и $d\omega$ на $\Delta\omega$. Согласно формуле (3.26)

$$\tau_{\text{ВМ}} = l \frac{d^2k}{d\omega^2} \Delta\omega, \quad (3.27)$$

где $\Delta\omega$ — разброс значений циклических частот в волновом пакете. Величину $\tau_{\text{ВМ}}$ называют внутримодовой дисперсией. Согласно формуле (3.27) величину $\tau_{\text{ВМ}}$ можно уменьшить, повысив монохроматичность волнового пакета.

3.10.2. УШИРЕНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА, ОБУСЛОВЛЕННОЕ МАТЕРИАЛЬНОЙ ДИСПЕРСИЕЙ

Оптическая схема показана на рис. 3.12. Внутримодовой дисперсией $\tau_{\text{ВМ}}$ пренебрегаем, но учитываем материальную дисперсию $n = n(\omega)$ либо $n = n(\lambda)$. Введем понятие абсолютного группового показателя преломления волнового пакета: $N = c/V_{\Gamma}$. Поскольку

групповая скорость волнового пакета $V_{\Gamma} = d\omega/dk$ согласно формуле (3.24), то n можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} N &= c \left(\frac{dK}{d\omega} \right) = c \frac{d}{d\omega} \left(\frac{\omega}{V_{\Phi}} \right) = c \frac{d}{d\omega} \left(\frac{\omega n}{c} \right) = \\ &= \frac{d}{d\omega} (\omega n) = n \frac{d\omega}{d\omega} + \omega \frac{dn}{d\omega} = n + \omega \frac{dn}{d\omega}. \end{aligned} \quad (3.28)$$

Таким образом,

$$N = n + \omega \frac{dn}{d\omega}. \quad (3.29)$$

Поскольку $n = n(\lambda)$, а $\lambda = \lambda(\omega)$,

$$\frac{dn}{d\omega} = \frac{dn}{d\lambda} \frac{d\lambda}{d\omega}. \quad (3.30)$$

Представим ω в следующем виде:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi c}{\lambda}. \quad (3.31)$$

Дифференцируем выражение (3.31) по λ :

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{d\lambda} &= -\frac{2\pi c}{\lambda^2}; \\ \frac{d\lambda}{d\omega} &= -\frac{\lambda^2}{2\pi c}. \end{aligned} \quad (3.32)$$

Подставим выражение (3.32) в (3.30):

$$\frac{dn}{d\omega} = -\frac{dn}{d\lambda} \frac{\lambda^2}{2\pi c}. \quad (3.33)$$

Из формул (3.29) и (3.33) имеем

$$N = n - \lambda \frac{dn}{d\omega}. \quad (3.34)$$

Согласно формулам (3.28) и (3.34)

$$V_{\Gamma} = \frac{c}{N} = \frac{c}{n - \lambda \frac{dn}{d\omega}}. \quad (3.35)$$

По определению скорости время распространения импульса

$$t = \frac{l}{V_{\Gamma}} = \frac{l}{c} \left(n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right). \quad (3.36)$$

Поскольку уширение за счет материальной дисперсии $\tau_{\text{мд}} = \Delta t$, а величина Δt находится аналогично дифференциалу функции $t(x)$, согласно формуле (3.36)

$$\tau_{\text{мд}} = \Delta t = \frac{l}{c} \left(\frac{dn}{d\lambda} \Delta\lambda - \frac{d\lambda}{d\lambda} \frac{dn}{d\lambda} \Delta\lambda - \lambda \frac{d^2n}{d\lambda^2} \Delta\lambda \right) = -\frac{l}{c} \left[\lambda \frac{d^2n}{d\lambda^2} \Delta\lambda \right]. \quad (3.37)$$

Отбрасывая в формуле (3.37) знак «минус» как не несущий никакого физического смысла, получаем

$$\tau_{\text{мд}} = \frac{l\lambda}{c} \frac{d^2n}{d\lambda^2} \Delta\lambda. \quad (3.38)$$

3.11. СВОЙСТВА ГРАДИЕНТНЫХ СВЕТОВОЛОКОН

3.11.1. РЕФРАКЦИЯ СВЕТА В СВЕТОВОЛОКНЕ

Рефракцией света называется искривление траектории светового луча в среде с переменным показателем преломления.

Пусть АПП изменяется скачкообразно в многослойной структуре, показанной на рис. 3.13. Согласно закону преломления

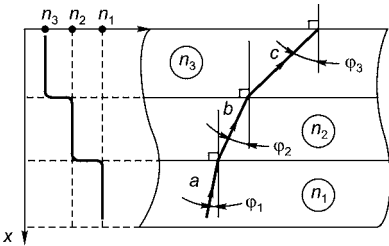


Рис. 3.13

Рефракция света в среде с переменным показателем преломления

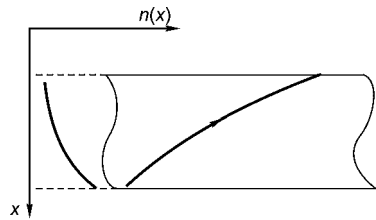


Рис. 3.14

Рефракция света в среде с плавным изменением показателя преломления

$n_1 > n_2 > n_3$, а углы падения света на границы раздела сред $\varphi_1 < \varphi_2 < \varphi_3$. Поэтому траектория светового луча представляет собой ломаную линию.

Если n изменяется плавно, как показано на рис. 3.14, то траектория светового луча — плавная кривая.

3.11.2. ГРАДИЕНТНЫЕ СТЕКЛОВОЛОКНА КАК СПОСОБ Понижения МЕЖМОДОВОЙ ДИСПЕРСИИ

На рис. 3.15 показана центральная часть СВ с плавным симметричным распределением профиля АПП. На оси симметрии волокна АПП максимален и плавно убывает в направлениях к краям центральной части СВ.

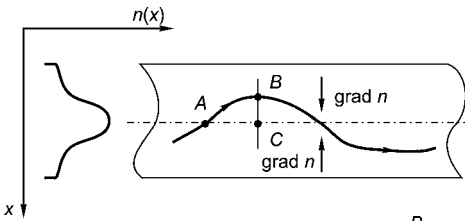


Рис. 3.15
Градиентное стекловолокно

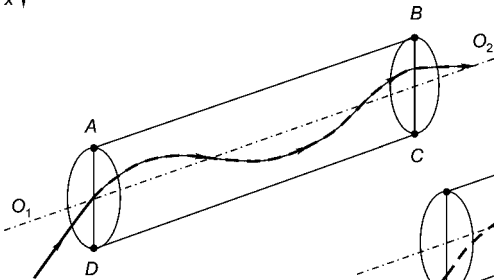


Рис. 3.16
Траектория «прямого» луча

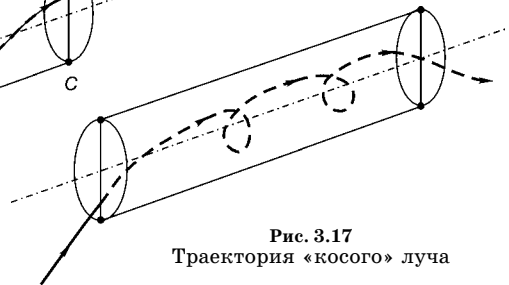


Рис. 3.17
Траектория «косого» луча

Там же показаны направления векторов — градиентов АПП, каждый из которых направлен от периферии к оси симметрии СВ. Такого типа СВ получили название градиентных.

Назовем луч AC , распространяющийся вдоль оси симметрии волокна, центральным и обозначим отрезок $AC = l_C$ (в соответствии с рис. 3.15). Для луча AC АПП = n_C . Для луча AB длина траектории $l > l_C$, а среднее значение АПП = $n < n_C$.

Скорость распространения луча AC $V_C = C/n_C$. Среднее значение скорости света вдоль $AB = l$ есть $\bar{V} = C/n$. Поскольку $n_C > n$, $V_C < \bar{V}$. Время распространения света по траектории AC — $t_C = l_C/V_C$, по траектории AB — $t = l/\bar{V}$.

Поскольку выполняется система неравенств $l_C < l$, $V_C < \bar{V}$, подбором профиля распределения АПП $n(x)$ в соответствии с рис. 3.15 можно добиться выполнения равенства $t_C = t$ и свести к минимуму межмодовую дисперсию τ_{MM} , определяемую по формуле (3.23).

Следует, однако, заметить, что рассуждения в разделах 3.9–3.11 справедливы лишь для «прямых» лучей, распространяющихся в плоскости $ABCD$, проходящей через ось симметрии волокна и его диаметр, как показано на рис. 3.16.

Для «косых» лучей, не лежащих в вышеуказанной плоскости, траектория представляет собой винтовую линию, как на рис. 3.17. Это значительно увеличивает длину траектории l , и равенство $t_C = t$ уже не выполняется, а τ_{MM} начинает возрастать.

Формы распределения профиля абсолютного показателя преломления в стекловолокнах.

Форма распределения профиля АПП в градиентных СВ достаточно хорошо может быть описана формулой общего вида

$$n(R) = n_c \left[1 - 2\varepsilon \left| \frac{R}{a} \right|^g \right]^{1/2}, \quad (3.39)$$

где R — радиус СВ; n_c — АПП на оси симметрии СВ; a — радиус центральной части СВ; $\varepsilon = A^2 / 2n_c^2$, где A — номинальная числовая апертура СВ,

$$A = \sqrt{n_c^2 - n_0^2},$$

здесь n_0 — АПП оболочки СВ.

Согласно формуле (3.39) при $R = 0$ $n(R) = n_c$. При $0 < R < a$ значения $n(R)$ определяются коэффициентом g , который задает форму профиля АПП.

Одним из самых распространенных профилей распределения АПП в современных СВ является *параболический*, для которого $g = 2$.

Такой профиль показан на рис. 3.18, и согласно формуле (3.39) ему соответствует формула

$$\frac{n^2(R)}{n_c^2} + 2\varepsilon \left[\left| \frac{R}{a} \right|^2 \right] = 1. \quad (3.40)$$

При $R = 0$, $n(R) = n_c$. На границе «центр-оболочка» $R = a$, и согласно формулам (3.39) и (3.40) имеем

$$\begin{aligned} \frac{n^2(a)}{n_c^2} + \frac{2(n_c^2 - n_0^2)}{2n_c^2} &= 1, \\ \frac{n^2(a)}{n_c^2} + 1 - \frac{n_0^2}{n_c^2} &= 1, \quad n(a) = n_0. \end{aligned} \quad (3.40^*)$$

Существует также *ступенчатый профиль*.

Заметим, что при $R > |\pm a|$

$$\left| \frac{R}{a} \right| < 1. \quad (3.41)$$

Согласно рис. 3.19 для ступенчатого СВ должны выполняться условия: $n(R) = n_c$

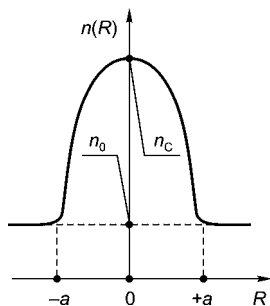


Рис. 3.18
Параболический
профиль распределения
АПП в СВ

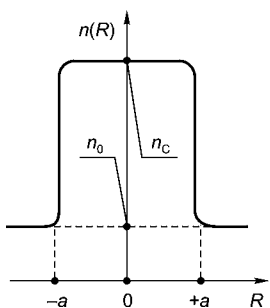


Рис. 3.19
Ступенчатый профиль
распределения АПП в СВ

для $0 \leq R < |\pm a|$ и $n(a) = n_0$. Согласно формуле (3.39) $n(R) = n_c$ при $2\varepsilon \left| \frac{R}{a} \right|^g = 0$. Поскольку $\left| \frac{R}{a} \right| \ll 1$, $g = \infty$. Таким образом, для ступенчатого СВ формула (3.39) принимает вид $n(R) = n_c$ при $0 \leq R < |\pm a|$;

$$n(R) = n_0 \quad (3.42)$$

при $R = |\pm a|$.

3.12.

СТАЦИОНАРНОЕ ВОЛНОВОЕ УРАВНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КОМПОНЕНТЫ ПОЛЯ \vec{E} СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ И ЕГО РЕШЕНИЕ

Для решения стационарного волнового уравнения удобно использовать цилиндрическую систему координат (ЦСК), совмещенную с СВ. На рис. 3.20 показана ЦСК, в которой любой параметр (в нашем случае вектор напряженности электрической компоненты поля \vec{E}) характеризуется тремя координатами: пространственной Z , радиальной R , азимутальной φ .

Таким образом, в точке B стекловолокна напряженность электрической компоненты поля световой волны \vec{E} : $B = \vec{E}(Z, \varphi, R)$. На рис. 3.20 ось симметрии СВ O_1O_2 совмещена с осью O_1Z , линия $O_1Y // AD$ и принята за «0» отсчета азимута φ , $O_1Y \perp O_1O_2$ и $AD \perp O_1O_2$, $AB = R \perp O_1O_2$, вектор $\vec{E}(Z, \varphi, R)$ принадлежит плоскости DAB , которая ортогональна оси симметрии O_1O_2 ; O_1F — радиус центральной части стекловолокна.

Стационарное (не зависящее от времени) волновое уравнение: при фиксированных Z и φ распределение напряженности электрической компоненты поля $E(R)$ световой волны вдоль радиуса R СВ определяется как

$$\frac{\partial^2 E(R)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial E(R)}{\partial R} + K_0^2 n^2 E(R) = 0, \quad (3.43)$$

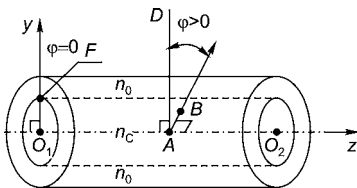


Рис. 3.20
Цилиндрическая система
координат:

$O_1A = Z$, $DAB = \varphi$, $AB = R$.

где $K_0 = K_0(R)$ — модуль волнового вектора в вакууме; $n = n(R)$ определяется по формуле (3.40).

Решением уравнения (3.43) является функция Бесселя в виде

$$E(R) = E_0 \exp(-\alpha |R|) \cos \psi, \quad (3.44)$$

где E_0 — амплитуда вектора \vec{E} ; α — коэффициент затухания вектора \vec{E} вдоль радиуса СВ; R — радиальная

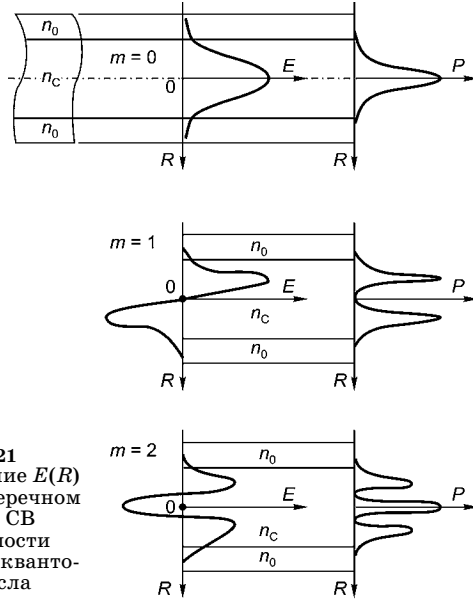


Рис. 3.21
 Распределение $E(R)$ и $P(R)$ в поперечном сечении СВ в зависимости от модового квантового числа

координата вектора \vec{E} (рис. 3.20); $\psi = m\pi f(R, a)$; m — модовое квантовое число, определяемое по формуле (3.16) как

$$m = \frac{4an_c \cos \phi_m}{\lambda_0} + \frac{\delta}{\pi}, \tag{3.45}$$

где a — радиус центральной части СВ, $0 \leq a \leq R$; $f(R, a)$ — функция зависимости ψ от распределения профиля АПП внутри СВ и типа поляризации вектора \vec{E} (ТЕ или ТМ).

На рис. 3.21 показана зависимость $E(R)$ и мощности излучения $P(R)$, пропорциональной $E^2(R)$, в конкретном сечении СВ от модового квантового числа $m = 0, 1, 2$.

3.13. ПРЕДЕЛЬНОЕ ЧИСЛО МОД, СПОСОБНЫХ РАСПРОСТРАНЯТЬСЯ ПО СТЕКЛОВОЛОКНАМ

Согласно разделам 3.2.2 и 3.9 угол падения ϕ_m световой волны на границу раздела «центр–оболочка» в СВ не может быть произвольным по двум причинам:

- угол ϕ_m заключен в интервале

$$\frac{\pi}{2} > \phi > \phi_{\text{ПР}}; \tag{3.46}$$

- угол φ_m квантуется согласно (3.45).

Условия (3.45) и (3.46) ограничивают предельное число мод, способных распространяться по СВ. Предельное число мод определяется выражением

$$N \approx \frac{V^2}{2} \frac{g}{g+2}, \quad (3.47)$$

где $V = ka\sqrt{n_c^2 - n_0^2}$; здесь k — модуль волнового вектора; a — радиус центральной части СВ; g — показатель степени в формуле (3.39).

Определим N для двух наиболее распространенных случаев. В градиентном волокне с параболическим профилем $g = 2$ и

$$N_{\text{пар}} = 0,25k^2a^2(n_c^2 - n_0^2).$$

В волокне со ступенчатым профилем $g = \infty$ и

$$N_{\text{СТ}} = \left(\frac{V^2}{2}\right) \frac{g}{g+2} = \left(\frac{V^2}{2}\right) \frac{1}{1+\frac{2}{g}} = \left(\frac{V^2}{2}\right) \frac{1}{1+0} = \frac{V^2}{2}; \quad N_{\text{СТ}} = 0,5k^2a^2(n_c^2 - n_0^2).$$

Очевидно, что при одинаковых a , n_c , n_0 число мод в ступенчатом СВ в два раза больше, чем в параболическом.

3.14. ВИДЫ ПОТЕРЬ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В СТЕКЛОВОЛОКНАХ

3.14.1. ПОТЕРИ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ МАТЕРИАЛЬНОЙ ДИСПЕРСИЕЙ

Материальная дисперсия представляет собой зависимость абсолютного показателя преломления диэлектрика (СВ) от частоты света, воздействующего на этот диэлектрик:

$$n(\omega) = \left[1 + \frac{\left(\frac{\rho e}{m\varepsilon_0} \right)}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2) + 4\omega^2\beta^2}} \right]^{1/2}, \quad (3.48)$$

где n — АПП СВ; ω — циклическая частота света; ρ — объемная плотность связанных зарядов в структуре СВ; m — масса электрона; ε_0 — электрическая постоянная; ω_0 — собственная частота колебаний валентного электрона в узле структуры СВ; β — коэффициент затухания вынужденных колебаний валентного электрона под воздействием света.

График зависимости (3.48) показан на рис. 3.22.

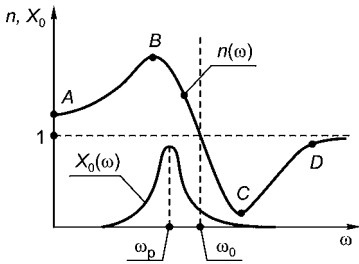


Рис. 3.22

Материальная дисперсия:

$n(\omega)$ — зависимость АПП от циклической частоты волны; $X_0(\omega)$ — зависимость амплитуды смещения центра масс валентного электрона стекловолокна от ω при резонансе.

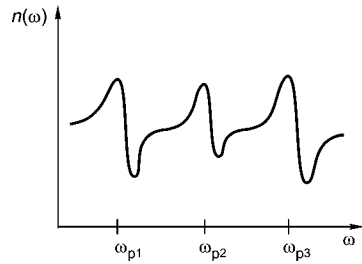


Рис. 3.23

Резонансное поглощение световой энергии валентными электронами структуры стекловолокна вблизи частот ω_{p1} , ω_{p2} , ω_{p3}

Участки AB и CD на рис. 3.22 называются областями нормальной дисперсии, где $(dn/d\omega) > 0$. BC — участок аномальной дисперсии, где $(dn/d\omega) < 0$.

В окрестности резонансной частоты

$$\omega_p = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$$

(внутри интервала BC) амплитуда смещения X_0 центра масс валентного электрона резко возрастает за счет резонансного поглощения этим электроном световой энергии и диапазон СВ становится непрозрачным для стекловолокна в области аномальной дисперсии.

Во всех стеклах, используемых для изготовления стекловолокон, число валентных электронов в узлах структуры больше единицы, поэтому кривая дисперсии $n(\omega)$ имеет сложную зависимость, определяемую по формуле

$$n(\omega) = \left[1 + \frac{e}{m\epsilon_0} \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i}{[(\omega_{0i}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2\beta^2]^{1/2}} \right]^{1/2} \quad (3.49)$$

и согласно рис. 3.23.

В заключение заметим, что в процессе изготовления СВ в исходную SiO_2 вводятся примеси, повышающие АПП = n_C (ZrO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , GeO_2 , P_2O_5) и понижающие АПП = n_0 (B_2O_3 , F). Каждая введенная примесь имеет свои валентные электроны в центральной части волокна, и число областей резонансного поглощения света увеличивается по сравнению с представленными на рис. 3.23.

3.14.2. ПОТЕРИ, СВЯЗАННЫЕ С РЭЛЕЕВСКИМ РАССЕЯНИЕМ СВЕТА В СТЕКЛОВОЛОКНЕ

В стекле при любой температуре $T \neq 0$ присутствуют *фононы* — тепловые колебания ионов в узлах структуры. Наличие фононов приводит к незначительным изменениям механической плотности ρ на величину $\Delta\rho$. Изменения ρ вызывают изменения АПП на величину Δn , пропорциональную амплитуде X_0 смещения ионов в узлах структуры стекла. Согласно экспериментальным данным $X_0 \ll \lambda$, где λ — длина световой волны в стекле.

В разделе 3.11.1 было показано, что любое изменение АПП приводит к рефракции света. В рассматриваемом случае Δn за счет фононов происходит беспорядочно, случайно. Следовательно, беспорядочна и микрорефракция света. Такую рефракцию называют рэлеевским рассеянием. Рэлеем было показано, что взаимосвязь интенсивности рассеянного света I_{VP} с интенсивностью нерассеянного света I_0 может быть представлена как

$$I_{VP} = I_0 \frac{\alpha}{\lambda^4}, \quad (3.50)$$

где α — коэффициент пропорциональности, зависящий от типа структуры стекла, типа связей между ионами, наличия примесей, температуры.

Анализ формулы (3.50) показывает, что использование СВ в магистральных трактах волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) на длинах волн $\lambda < 0,85$ мкм практически исключено в настоящее время и допустимо при $\lambda \geq 0,85$ мкм.

3.14.3. ПОТЕРИ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ НАЛИЧИЕМ ГИДРОКСИЛЬНЫХ ГРУПП ОН В СТЕКЛОВОЛОКНАХ

К особо опасным примесям следует отнести гидроксильную группу ОН, которая способна внедряться в СВ в процессе его роста как из расплава, так и из газовой фазы. Группа ОН образуется из паров H_2O , которые всегда присутствуют в воздухе. При высокой температуре роста СВ молекула H_2O теряет один ион водорода и превращается в гидроксильную группу. Группа ОН, внедряясь в СВ, обладает собственными частотами поглощения, соответствующими длинам волн 1,39; 1,24; 1,13; 0,95; 0,88; 0,72 мкм. Группы ОН способны вызывать поглощение света в СВ до 1 дБ/км и более. Способы борьбы с гидроксильными группами ОН очевидны — совершенствование технологии производства СВ.

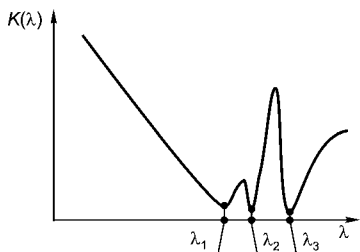


Рис. 3.24
 «Окна» прозрачности в СВ на основе SiO₂, легированного примесями:
 $\lambda_1 = 0,85$ мкм, $\lambda_2 = 1,31$ мкм, $\lambda_3 = 1,55$ мкм; $K(\lambda)$ — коэффициент суммарных потерь в условных единицах.

Анализ потерь, рассмотренных выше, показывает, что собственные резонансные частоты SiO₂, примесей и гидроксильных групп ОН оставляют для СВ лишь несколько «окон» прозрачности при их использовании в магистральных трактах ВОЛС.

Типичными являются длины волн в окрестности 0,85; 1,3 и 1,55 мкм, показанные на рис. 3.24.

3.14.4. ПОТЕРИ ЗА СЧЕТ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

В 1928 г. Раманом и независимо от него Ландсбергом был открыт эффект возникновения излучения света с частотами $\nu_0 - \Delta\nu$, $\nu_0 + \Delta\nu$ при условии введения в диэлектрик излучения частотой ν_0 и отсутствии какого-либо другого внешнего воздействия.

Поскольку в результате в диэлектрике вместо волны частотой ν_0 оказались три волны с частотами ν_0 , $\nu_0 - \Delta\nu$, $\nu_0 + \Delta\nu$, открытый авторами эффект получил название комбинационного рассеяния света. Природа комбинационного рассеяния заключается в фотон-фононном взаимодействии.

Максимальная энергия фонона в твердом теле (в том числе в СВ) определяется как

$$E_{\text{фон}} = K\Theta, \tag{3.51}$$

где K — постоянная Больцмана; Θ — характеристическая температура Дебая,

$$\Theta = \left[\frac{h}{K} \left(\frac{3pN\rho}{4\pi M} \right)^{1/3} \sqrt{\frac{E}{\rho}} + 273 \right];$$

h — постоянная Планка; p — число ионов, образующих устойчивую связь (в SiO₂ $p = 3$); M — масса киломоля диэлектрика (для SiO₂ $M = 60$ кг/кмоль); ρ — плотность диэлектрика; $E_{\text{Ю}}$ — модуль Юнга; $N_A = 6,022 \cdot 10^{26}$ 1/кмоль — число Авогадро.

По закону сохранения энергии и согласно формуле (3.51) $E_{\text{фон}} = K\Theta = h\nu_{\text{фон}}$, откуда максимальное изменение частоты фотона при комбинационном рассеянии

$$\Delta\nu_{\text{фон}} = \Delta\nu_{\text{фот}} = \frac{K\Theta}{h}. \quad (3.52)$$

Очевидно, что при комбинационном рассеянии света максимальная частота фотонов

$$\nu_{\text{max}} = \nu_0 + \frac{K\Theta}{h}, \quad (3.53)$$

а минимальная

$$\nu_{\text{min}} = \nu_0 - \frac{K\Theta}{h}. \quad (3.54)$$

Оптическое излучение с частотами типа ν_{max} получило название фиолетовых спутников (относительно ν_0), излучение с частотами ν_{min} называют красными спутниками. Очевидно, что комбинационное рассеяние ослабляет основной сигнал частоты ν_0 и ухудшает монохроматичность излучения. Потери оптического излучения за счет комбинационного рассеяния значительно меньше потерь за счет рэлеевского рассеяния и материальной дисперсии.

Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) света относится к классу нелинейно-оптических эффектов, в которых мощная световая волна индуцирует элементарные возбуждения в среде (оптические и акустические фононы, поляритоны, температурные волны и т. п.) и конкретным образом рассеивается на них. При ВКР речь идет о когерентном возбуждении оптических фотонов. Этот процесс есть вынужденный аналог спонтанного комбинационного рассеяния (СКР), при котором свет рассеивается на хаотических тепловых колебаниях среды. В рамках классической теории ВКР можно описать с помощью модели нелинейно связанных осцилляторов.

Собственные частоты колебаний электронов (ν_1) и колебаний ядер в молекуле (ν_2) рассчитываются по формулам

$$\nu_1 = \sqrt{\frac{\alpha}{m}}, \quad (3.55)$$

$$\nu_2 = \sqrt{\frac{\beta}{M}}, \quad (3.56)$$

где α и β — коэффициенты упругости связей в молекуле; m и M — приведенные массы электронного и атомного осцилляторов.

Для реальных молекул $\nu_1 \approx 10^{15}$ Гц, $\nu_2 \approx 10^{13}$ Гц. Если на молекулу воздействует световое поле частотой ν_0 , то возбуждаются электронные колебания этой же частоты. Одновременно проис-

ходят колебания ядер в молекуле (молекулярные колебания) частотой ν_2 . Это могут быть, например, тепловые колебания. Вследствие связи электронных и ядерных движений в молекуле на электронный осциллятор действует эффективная вынуждающая сила поля с комбинационными частотами $\nu_1 - \nu_2$ и $\nu_1 + \nu_2$. Иначе говоря, колебания ядер модулируют электронные колебания в молекуле. В результате молекула переизлучает свет не только на частоте ν_0 действующей на нее световой волны, но и на новых — комбинационных частотах $\nu_0 \pm \nu_2$. В этом и состоит объяснение явления комбинационного рассеяния света. Колебания на частоте $\nu_0 - \nu_2$, возбуждаемые рассеянным излучением, называются стоксовой компонентой. Одновременно создаются колебания на частоте собственных колебаний молекулы ν_2 . В результате комбинационного рассеяния света возникает резонансная сила, возбуждающая молекулярные колебания. Если эта сила достаточно велика, то в системе возникает положительная обратная связь: рассеяние света усиливает молекулярные колебания, а молекулярные колебания усиливают рассеяние света. В результате система самовозбуждается и переходит в режим вынужденного рассеяния, при котором интенсивность рассеяния скачком возрастает на много порядков и становится соизмеримой с интенсивностью лазерного луча.

Пара световых волн (накачка и стоксова компонента) не только резонансно раскачивает колебания, но и фазирует их в большом объеме среды.

Иначе говоря, при ВКР возникает волна когерентных молекулярных колебаний. Эта волна наведена световым полем и эффективно взаимодействует с ним, приводя к усилению излучения на стоксовой частоте. Таким образом, благодаря нелинейности в ансамбле классических осцилляторов появились принципиально новые эффекты: фазировка колебаний осцилляторов вследствие их взаимодействия через поле излучения и усиление света. В этом смысле ансамбль нелинейных классических осцилляторов близок ансамблю квантовых осцилляторов, обеспечивающему когерентность и усиление света лазера.

Вынужденное рассеяние света можно использовать для преобразования частично когерентного лазерного излучения в энергию полностью когерентного светового пучка на другой (стоксовой) частоте. Эксперименты показывают, что данный метод позволяет значительно (в 100 и более раз) уменьшить угловую расходимость излучения. При этом энергетическая эффективность преобразования составляет обычно 50%.

3.14.5.

ПОТЕРИ, СВЯЗАННЫЕ С ИЗГИБОМ СТЕКЛОВОЛОКОН

Различают микроизгибы (соизмеримые с диаметром сердцевины волокна D) и макроизгибы радиусом $R \gg D$. Первые приводят к образованию механического уплотнения в месте изгиба и соответственно к увеличению АПП, что вызывает микрорефракцию.

В случае макроизгиба СВ, показанного на рис. 3.25, область AB сжимается, область CD растягивается и сердцевина СВ перемещается в направлении стрелки \vec{S} , в сторону оболочки СВ.

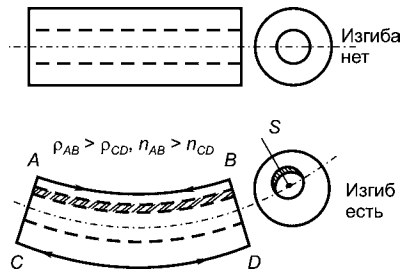


Рис. 3.25

Перевод света из сердцевины
стекловолокна в оболочку при
макроизгибе СВ

Световой пучок, распространяющийся по заштрихованной части сердцевины СВ, не возвращается к центру СВ после распрямления СВ и постепенно рассеивается в оболочке.

Потери, связанные с микроизгибами, уменьшаются за счет специальных конструкций СВ-кабелей. Потери, обусловленные макроизгибами, можно свести к минимуму за счет большого радиуса закругления кабеля при прокладке.

3.14.6.

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

Как уже отмечалось, для защиты от механического разрушения СВ покрывается тонкой пленкой полимера. Поскольку коэффициенты линейного и объемного расширения СВ и защитной пленки разные, при температурных колебаниях окружающей среды могут возникнуть локальные (местные) изменения механической плотности $\pm \Delta \rho$ и соответственно изменения АПП — $\pm \Delta n$, что приведет к микрорефракции и рассеянию света. Очевидно, что задача разработчиков СВ сводится к созданию таких защитных покрытий для СВ, температурные коэффициенты расширения и сжатия которых максимально близки к аналогичным коэффициентам СВ.

3.14.7.

ДИФРАКЦИОННЫЕ ПОТЕРИ

Если длина волны λ в сердцевине СВ примерно 1 мкм, а диаметр сердцевины $D = 5 \dots 50$ мкм, λ и D можно считать соизмеримыми. Известно, что в этом случае в процессе распространения

света по СВ возникает явление дифракции, т. е. расходимости светового пучка с переходом части световой энергии из сердцевины в оболочку. В результате условие ПВО перестает выполняться. Одним из эффективных методов борьбы с дифракционными потерями в СВ является создание нелинейной оптической среды. Нелинейная оптическая среда возникает в сердцевине СВ, если в него вводится свет повышенной интенсивности. При этом под воздействием света механическая плотность СВ симметрично возрастает от периферии к оси симметрии и возникает явление самофокусировки, сводящее дифрагирующие лучи к оси симметрии СВ и восстанавливающее режим ПВО.

3.14.8. ОЦЕНКА ПОЛНЫХ ПОТЕРЬ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СТЕКЛОВОЛОКНАХ

Из разделов 3.14.1–3.14.7 ясно, что экспериментальное определение конкретного вида потерь в СВ представляет достаточно сложную физико-техническую задачу. С точки зрения эксплуатации СВ-кабеля нас интересуют полные потери, безотносительно их происхождения.

Известно, что интенсивностью излучения света называется величина I , определяемая как

$$I = \frac{E}{St} = \frac{P}{S}, \quad \left(\frac{\text{Дж}}{\text{М}^2\text{С}} \right) = \frac{B_T}{\text{М}^2}, \quad (3.57)$$

где E — энергия оптического излучения, переносимая световой волной через площадь S за время t ; P — мощность излучения, соответствующая энергии E .

Если интенсивность излучения после входа в СВ равна I_0 , то интенсивность света, прошедшего в СВ путь L , уменьшается до величины $I < I_0$, как показано на рис. 3.26.

Выберем внутри СВ малый элемент толщиной dx (рис. 3.26). На входе в этот элемент интенсивность света равна I_x , а на выходе — $I_x - dI_x$, где dI_x — убыль интенсивности. Очевидно, что dI_x пропорциональна I_x и dx . Введя коэффициент пропорциональности β , получаем

$$dI = -\beta I_x dx. \quad (3.58)$$

Знак «минус» в формуле (3.58) означает убыль интенсивности dI_x .

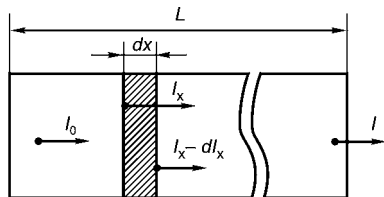


Рис. 3.26
К определению потерь в световоде

Разделяя переменные и интегрируя выражение (3.58), получаем

$$\int_{I_0}^I \frac{dI_x}{I_x} = -\beta \int_0^L dx, \quad \ln I - \ln I_0 = \beta L,$$

$$\ln \frac{I}{I_0} = -\beta L; \quad I = I_0 e^{-\beta L}. \quad (3.59)$$

Формула (3.59) носит название закона Бугера–Ламберта. Величина β , входящая в нее, называется коэффициентом полных потерь световой энергии в СВ. Уточним физический смысл этой величины. Потребуем выполнения условия

$$\frac{I}{I_0} = e^1 = e = 2,718282. \quad (3.60)$$

Из формул (3.59) и (3.60) следует

$$e^1 = e^{+\beta L}; \quad \beta L_1 = 1; \quad \beta = \frac{1}{L_1}, \quad (\text{м}^{-1}). \quad (3.61)$$

Согласно формуле (3.61) коэффициент полных потерь световой энергии в СВ есть физическая величина, обратная такой длине СВ L_1 , на которой интенсивность света убывает в $e = 2,718282$ раза.

Согласно формуле (3.59) β можно представить в виде

$$\beta = \frac{1}{L} \ln \frac{I_0}{I}. \quad (3.62)$$

Согласно формулам (3.57) и (3.62)

$$\beta = \frac{1}{L} \ln \frac{P_0}{P}. \quad (3.63)$$

Заменив натуральный логарифм на десятичный, получим из формулы (3.63)

$$\beta = \frac{2,3025}{L} \lg \frac{P_0}{P}. \quad (3.64)$$

Умножив правую и левую части выражения (3.64) на 10, получим

$$10\beta = \frac{2,3025}{L} 10 \lg \frac{P_0}{P}. \quad (3.65)$$

Величину

$$\alpha = 10 \lg \frac{P_0}{P} \quad (3.66)$$

назовем коэффициентом затухания света в стекловолокне, измеряемым в децибелах. Из формул (3.65) и (3.66) следует взаимосвязь между β и α :

$$\begin{aligned} 10\beta &= \frac{2,3025}{L}\alpha; \\ 10\beta L &= 2,3025\alpha; \\ \alpha &= 4,3431\beta L. \end{aligned} \tag{3.67}$$

Разделим выражение (3.66) на длину стекловолокна L , выраженную в километрах:

$$\frac{\alpha}{L} = \frac{10}{L} \lg \frac{P_0}{P}, \left[\frac{\text{дБ}}{\text{км}} \right]. \tag{3.68}$$

Единица измерения затухания дБ/км является широко распространенной в технике связи.

Методика практического определения коэффициента затухания β . Практическое определение интенсивностей I_0, I , входящих в формулу (3.62), согласно рис. 3.26 не представляется возможным, поскольку датчик интенсивности (или мощности) нельзя внедрить в стекловолокно.

На рис. 3.27 показано соотношение интенсивностей I_0, I и соответствующих им интенсивностей — на входе в СВ ($I_{\text{вх}}$) и на выходе из СВ ($I_{\text{вых}}$), а также интенсивностей света, отраженного от левого торца СВ ($I_{\text{отр1}}$) и правого ($I_{\text{отр2}}$).

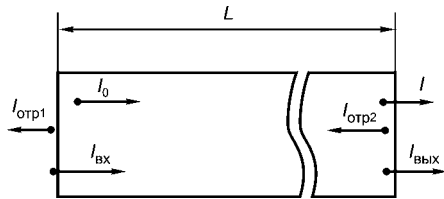


Рис. 3.27
К определению коэффициента затухания

В соответствии с рис. 3.27

$$I_0 = I_{\text{вх}} - I_{\text{отр1}} = I_{\text{вх}} - I_{\text{вх}}k_1 = I_{\text{вх}}(1 - k_1), \text{ т. е.}$$

$$I_0 = I_{\text{вх}}(1 - k_1). \tag{3.69}$$

$$\text{А } I_{\text{вых}} = I - I_{\text{отр2}} = I - k_2I = I(1 - k_2), \text{ т. е.}$$

$$I = \frac{I_{\text{вых}}}{1 - k_2}, \tag{3.70}$$

где k_1 — коэффициент отражения света от границы раздела «воздух–СВ»; k_2 — коэффициент отражения света от границы раздела «СВ–воздух».

Разделив почленно выражение (3.69) на выражение (3.70), получим

$$\frac{I_0}{I} = \frac{I_{\text{вх}}}{I_{\text{вых}}}(1 - k_1)(1 - k_2). \tag{3.71}$$

Подставив выражение (3.71) в выражение (3.62), имеем

$$\beta = \frac{1}{L} \ln \left[\frac{I_{\text{вх}}}{I_{\text{вых}}}(1 - k_1)(1 - k_2) \right]. \tag{3.72}$$

Поскольку $I_{\text{вх}} \sim P_{\text{вх}}$, $I_{\text{вых}} \sim P_{\text{вых}}$, получаем

$$\beta = \frac{1}{L} \ln \left[\frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых}}} (1 - k_1)(1 - k_2) \right]. \quad (3.73)$$

Коэффициенты отражения k_1 и k_2 зависят от углов падения и преломления светового пучка, вводимого в СВ через границу «воздух–СВ» и выводимого из СВ через границу «СВ–воздух». Значения коэффициентов k_1 и k_2 определяются по формулам Френеля.

При нормальном падении светового пучка на торец СВ

$$k_1 = k_2 = k = \left(\frac{n_C - n_B}{n_C + n_B} \right)^2, \quad (3.74)$$

где n_C , n_B — АПП стекла и воздуха соответственно.

В большинстве случаев световые пучки вводятся в СВ под углом γ (в соответствии с рис. 3.11), который квантуется согласно формуле (3.20). Наклонному падению светового пучка на границу раздела соответствуют коэффициенты отражения $k_{\text{ТЕ}}$ и $k_{\text{ТМ}}$, зависящие от типа поляризации волны:

$$k_{1\text{ТЕ}} = \left[\frac{\sin(\gamma - \beta)}{\sin(\gamma + \beta)} \right]^2; \quad (3.75)$$

$$k_{1\text{ТМ}} = \left[\frac{\text{tg}(\gamma - \beta)}{\text{tg}(\gamma + \beta)} \right]^2. \quad (3.76)$$

Аналогично определяются коэффициенты отражения волны $k_{2\text{ТЕ}}$ стекловолокна и $k_{2\text{ТМ}}$.

3.15. ВЛИЯНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕТЕЙ СВЯЗИ

Тип оптического волокна оказывает существенное влияние на характеристики сетей связи.

Спектральные характеристики различных оптических волокон приведены на рис. 3.28. Здесь кривая 1 соответствует обычному одномодовому волокну (SMF), позволяющему передавать до восьми каналов в полосах S , C и L .

Из-за гидроксильного пика область 1,4 мкм фактически исключается из использования для большинства сетевых приложений. Ионы OH^+ со временем проникают в обычное волокно SMF. Это не позволяет использовать это волокно в качестве волокна для сис-

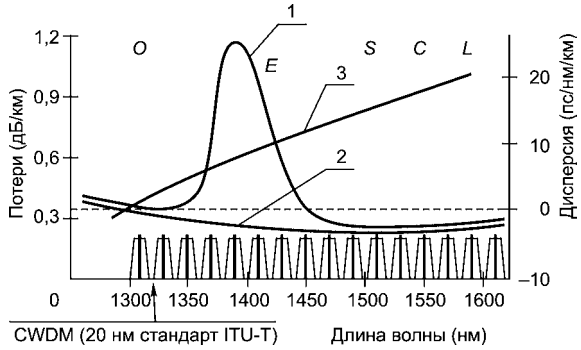


Рис. 3.28
Спектральные характеристики и дисперсия различных оптических волокон

тем полного спектрального диапазона, даже если начальное затухание в области водяного пика мало.

Волокну с нулевым водяным пиком (ZWPE) соответствует кривая 2.

Волокно ZWPE обладает лучшими характеристиками по затуханию по сравнению с обычным SMF-волоком. Однако это волокно имеет относительно высокую дисперсию (-17 пс/нм/км при $\lambda = 1,55$ мкм), что иллюстрирует кривая 3 на рис. 3.28. Это ограничивает длину пролета, перекрываемого без регенерации при небольшом числе используемых каналов. Если же требуется большое число каналов, то приходится использовать компенсацию дисперсии. Использование компенсации дисперсии увеличивает потери, что требует увеличения коэффициента усиления усилителей и ведет к росту величины поляризационной модовой дисперсии.

Относительно дешевое магистральное волокно — это волокно с ненулевой смещенной дисперсией NZDSF. Это волокно имеет малую дисперсию и малый наклон дисперсионной характеристики.

Уровень дисперсии волокна NZDSF в 34 раза меньше, чем обычного волокна SMF, как показано на рис. 3.29, что позволяет в 3–4 раза увеличить длину некомпенсируемого участка на скоростях 2,5–10 Гбит/с. Умеренная дисперсия волокна NZDSF обеспечивает не только большую длину пролета при существующем оборудовании, но и экономию средств при реализации сетей.

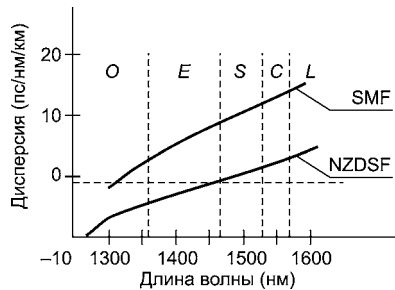


Рис. 3.29
Зависимость дисперсии от длины волны оптических волокон

3.16. ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО

Создание оптического волокна (ОВ) на основе кварцевого стекла стало поворотным моментом в развитии среды передачи, так как позволило системам магистральной связи не только снять ограничения на скорость передачи и ширину полосы пропускания, но и снизить затухание сигнала настолько, чтобы иметь возможность передавать его без регенерации на многие сотни километров. В настоящее время ведется поиск новых, более перспективных волокон, в том числе фотонно-кристаллических [44, 46].

Эти волокна, наследуя свойства фотонных кристаллов, позволяют формировать фотонные запрещенные зоны, что открывает новые возможности управления свойствами ОВ. Так, можно управлять волноводной дисперсией, сдвигая длину волны нулевой дисперсии в область видимого спектра; эффективным показателем преломления оболочки, формируя «бесконечно» одномодовые волокна, в том числе и волокна с большой эффективной площадью сердцевины, необходимые для пропуска больших мощностей светового потока; кроме того, можно формировать воздушные каналы не только в оболочке (что делает волокно более легким), но и в сердцевине, создавая большие перспективы для уменьшения затухания в волокне.

Исторически первые ОВ появились примерно сорок лет назад и имели затухание более 20 дБ/км. С тех пор ОВ используются как среда передачи сигналов в волоконно-оптических системах передачи, локальных вычислительных системах (ЛВС), внутриобъектовых системах связи и др.

Волокна изготавливаются из кварцевого стекла — аморфной однородной изотропной среды, в которой могут распространяться продольные и поперечные упругие волны.

Свет, отражаясь от границы раздела «сердцевина–оболочка», в результате полного внутреннего отражения распространяется вдоль сердечника, как волна по оптическому волноводу. Световая волна, как электромагнитное колебание, распространяется по волокну с фазовой скоростью, обратно пропорциональной показателю преломления, и состоит из многих типов колебаний, называемых модами.

Моды определяются решением уравнения Максвелла и существуют в виде четырех типов колебаний: поперечных T и продольных электрических E , магнитных H и смешанных EH и HE .

Чем меньше диаметр сердцевины, тем меньше число возникающих в нем мод. Для магистральной связи целесообразно использовать одномодовые волокна с малым затуханием — 0,2...0,7 дБ/км.

Для ВОСП важно то, что полоса пропускания одномодового волокна очень велика (примерно 100 ТГц), поскольку наиболее широкополосные такие системы передачи уже достигли ширины полосы частот 10 ТГц (системы DWDM — многоканальные системы с мультиплексированием по длине волны). Однако основной недостаток одномодовых волокон — очень маленькая площадь поперечного сечения сердцевины. Мощность оптического потока в первых системах с синхронной цифровой иерархией (SDH) не превышала 3 дБм, в системах настоящего времени она достигает +12 дБм, а в многоканальных системах WDM — более +23 дБм.

Увеличение плотности мощности оптического потока приводит к появлению в ОВ заметных нелинейных эффектов различного рода. Их действие деструктивно в целом и сводится к увеличению числа ошибок, уменьшению длины секции, снижению допустимой скорости передачи в одноканальных системах, росту шага несущих частот в многоканальных системах и т. д.

Для решения перечисленных выше проблем разрабатываются волокна на основе фотонных кристаллов. Фотонно-кристаллическое волокно представляет собой структуры двумерного фотонного кристалла на основе композиции кварцевого стекла и воздуха, формируемой в оболочке ОВ.

Фотонно-кристаллическое волокно (ФКВ) — это волокно с поперечным сечением постоянной длины, представляющее собой двумерный фотонный кристалл с точечным дефектом, расположенным, как правило, в центре симметрии ОВ.

Структура двумерного фотонного кристалла формируется в оболочке с помощью симметрично расположенных вокруг сердцевины полых капилляров в виде круглых или шестигранных плотно упакованных диэлектрических трубок, создающих периодическую двумерную микрорешетку, как показано на рис. 3.30.

Основная особенность ФКВ состоит в том, что распространение энергии световой волны происходит вдоль линейного дефекта (которым является, как правило, область сердцевины), а сама волна существует в виде поперечной моды TE₀₁ или TM₀₁, т. е. в поперечном сечении волокна (или в плоскости решетки фотонного кристалла).

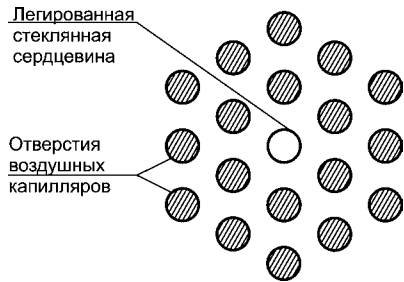


Рис. 3.30
Структуры двумерного ФКВ с точечным дефектом на примере простой 6-гранной центрированной ячейки

Одной из первых и востребованных областей применения ФКВ стало создание световодов с большой эффективной площадью для стыков с мощными лазерами. Они используются в высокоэффективных шнурах коммутации лазерного и оптического усилительного оборудования, а также в сплавных разветвителях.

ФКВ являются перспективными элементами для волоконно-оптических усилителей, в которых они применяются в качестве отрезков волокон, легированных эрбием. Последним усовершенствованием стало использование нескольких концентрических слоев воздушных отверстий в оболочке с большим внутренним диаметром (52 мкм), позволяющей практически полностью задействовать световой поток мощных лазерных диодов накачки, направляя его через воздушные каналы оболочки ФКВ. Такие усилители позволяют не только достигать высокой мощности (примерно 33 дБм) и эффективности преобразования энергии накачки (свыше 21%), но и сохранять линейный режим для входного информационного сигнала.

3.17. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОАКСИАЛЬНЫХ МЕДНЫХ КАБЕЛЕЙ И СТЕКЛОВОЛОКОН

В заключение главы 3 приведем основные параметры коаксиальных медных кабелей, ранее используемых в магистральных сетях связи, и стекловолокон на основе SiO_2 , сведенные в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Сравнительная характеристика коаксиальных медных кабелей и стекловолокон

Параметры	Коаксиальный медный кабель	Стекловолокно
Несущая частота, Гц	$0,7 \cdot 10^7$	10^{14}
Скорость передачи информации, бит/с	10^7	10^{12}
Число телефонных каналов на один коаксиал или стекловолокно	$3,6 \cdot 10^3$	10^6
Расстояние между пунктами усиления в линии связи, км	3	100
Вероятность защиты от искровых разрядов и разрушения молнией	≥ 0	1
Вероятность использования в магистральных линиях связи любого назначения	0	1
Вероятность использования в бортовых системах связи пилотируемых космических кораблей, баллистических ракет, межконтинентальных баллистических ракет и атомных подводных лодок	0	1
Вероятность использования в кольцевой системе связи планеты Земля	0	1

3.18. РАЗРУШЕНИЕ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В связи с широким использованием волоконных оптических усилителей мощности излучения, передаваемые по одному волоконному световоду, приближаются к уровню одного ватта. Этого оказывается достаточно для поддержания распространения волны разрушения по волоконным световодам.

В волоконных световодах на основе кварцевого стекла под действием лазерного излучения по сердцевине распространяется волна оптического разряда. Это явление выглядит следующим образом: при определенных условиях в области сердцевины световода возникает область белого или голубоватого свечения (маленькая «звездочка» — волна оптического разряда), которая движется по световоду навстречу лазерному излучению со скоростью примерно 1 м/с. После прохождения волны световод внешне кажется неповрежденным, однако в его сердцевине образуются полости (или пузыри) размером около нескольких микронов. Процесс может быть инициирован загрязнением торца световода, контактом торца световода с металлической поверхностью, нагреванием участка световода в электрической дуге. Пороговая интенсивность лазерного излучения, при которой возникает волна оптического разряда, зависит от диаметра сердцевины оптического световода и длины волны излучения.

Иным образом выглядит процесс разрушения волоконных световодов на основе халькогенидного и флюоридного стекол. После инициирования разрушения не наблюдается формирования волн оптического разряда, а происходит полное разрушение этих световодов (включая сердцевину, оболочку и иногда защитную полимерную оболочку) по всему поперечному сечению. При мощностях лазерного излучения, близких к пороговым, полимерная оболочка не разрушается и продукты разрушения сердцевины и оболочки остаются в ней. При повышении мощности оптического излучения температура на поверхности световода повышается и может достигать температуры стеклования для халькогенидного (185°C) и флюоридного (265°C) стекол, что приводит к снижению механической прочности световодов и нарушению работоспособности ВОЛС разряда.

Разрушение световодов под действием лазерного излучения ограничивает максимальную мощность излучателей в волоконных линиях связи. В одномодовых световодах на основе кварцевых стекол с диаметром сердцевины 10 мкм максимальная мощность ограничена 1,5 Вт, а у световодов на основе халькогенидного и флюоридного стекол мощность излучателей на порядок ниже.

Тестовые вопросы к главе 3
«ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДЫ»

- 3.1. Какой параметр характеризует среду распространения электромагнитной волны:
- длина волны;
 - показатель преломления;
 - напряженность электрического поля;
 - начальная фаза?
- 3.2. Какова скорость света в вакууме:
- 340 м/с;
 - $3 \cdot 10^8$ м/с;
 - $3 \cdot 10^6$ м/с;
 - $3 \cdot 10^9$ м/с?
- 3.3. Какова скорость распространения электромагнитной волны в световоде, имеющем показатель преломления $n = 3$:
- 340 м/с;
 - $3 \cdot 10^8$ м/с;
 - 10^8 м/с;
 - 10^5 м/с?
- 3.4. Каким должен быть показатель преломления сердцевинки оптического волокна n_c :
- $n_c = 1$;
 - $n_c > n_0$;
 - $n_c < n_0$;
 - $n_c = n_0$?
- 3.5. Что называется модой оптического излучения:
- электромагнитная волна;
 - частота излучения;
 - степень когерентности;
 - поляризация излучения?
- 3.6. Что называется числовой апертурой:
- диаметр сердцевинки волокна;
 - диаметр оболочки волокна;
 - корень квадратный из суммы квадратов показателей преломления сердцевинки и оболочки;
 - корень квадратный из разности квадратов показателей преломления сердцевинки и оболочки?
- 3.7. Что характеризует числовая апертура оптического волокна:
- эффективность ввода излучения в световод;
 - эффективность вывода излучения из световода;
 - диаметр сердцевинки оптического волокна;
 - диаметр оболочки оптического волокна?
- 3.8. Какого типа волокно обеспечивает максимальную широкополосность:
- одномодовое градиентное;
 - многомодовое градиентное;
 - многомодовое со ступенчатым изменением показателя преломления;
 - одномодовое со ступенчатым изменением показателя преломления?
- 3.9. От чего зависит уширение импульсного оптического сигнала:
- от мощности вводимого в световод оптического сигнала;
 - от значения цифровой апертуры;
 - от типа оптического волокна;
 - от диаметра оболочки оптического волокна?
- 3.10. Какие значения затухания на километр имеют современные оптические волокна для систем магистральной связи:
- около 10 дБ/км;
 - около 5 дБ/км;
 - около 2 дБ/км;
 - около 0,5 дБ/км?

ПРИБОРЫ НЕКОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

4.1. ИСТОЧНИКИ ИСКУССТВЕННОГО СВЕТА

В прошлом к источникам искусственного света для бытового освещения и промышленного оборудования относили электрические лампы накаливания, люминесцентные лампы, газоразрядные источники света, наполненные парами, и неоновые лампы.

Излучение этих источников лежит в широком диапазоне длин волн спектра, значительная часть которого выходит за пределы видимой области.

Достижения полупроводниковой электроники за последнее десятилетие позволяют включить в перечень искусственных источников света еще один — светодиоды (СД). Отличительной особенностью этих полупроводниковых приборов является весьма узкий спектральный диапазон создаваемого ими излучения [30], показанный на рис. 4.1.

В табл. 4.1 приведены используемые в оптоэлектронике единицы измерения длины волны λ . Наиболее распространенной является нанометр.

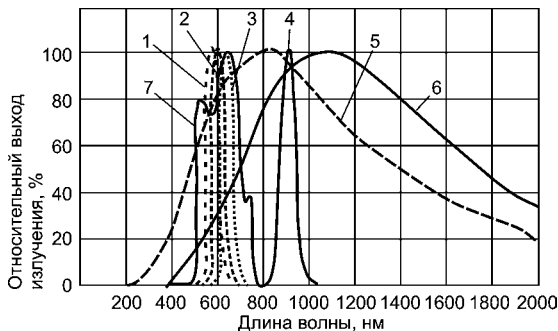


Рис. 4.1
Нормализованные спектры некоторых источников излучения:
1 — зеленый СИД; 2 — желтый СИД; 3 — красный СИД; 4 — инфракрасный СИД; 5 — лампа накаливания с вольфрамовой нитью, температура 2500 К; 6 — лампа накаливания с вольфрамовой нитью, температура 3400 К; 7 — неоновая лампа.

Таблица 4.1

Единицы измерения длины волны

Наименование	Обозначение	Значение в метрах	Эквивалент
Микрон	мкм	$1 \cdot 10^{-6}$	1 мкм = 1000 нм
			1 мкм = 10 000 А
Нанометр	нм	$1 \cdot 10^{-9}$	1 нм = 10 А
Ангстрем	А	$1 \cdot 10^{-10}$	1 А = 0,1 нм

Согласно теории проводимости твердого тела при прохождении тока через p - n -переход в результате рекомбинации дырок или электронов с носителями заряда противоположного знака всегда выделяется световая (фотоны) или тепловая (фононы) энергия.

Одним из положений квантовой теории является то, что в твердых кристаллах электроны могут иметь только определенную энергию; запрещенная энергетическая зона представляет собой промежуток между верхом валентной зоны и дном зоны проводимости. Эта зона характеризует полупроводник, а ее ширина, выраженная в электрон-вольтах (эВ), определяет длину волны испускаемого излучения. Проведенный изготовителями анализ различных полупроводниковых материалов с точки зрения их пригодности для производства светодиодов по таким параметрам, как длина волны, эффективность преобразования энергии и легкость легирования, позволил остановить выбор на арсениде галлия (GaAs), фосфиде галлия (GaP) и арсениде-фосфориде галлия (GaAsP).

4.2.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
И ПАРАМЕТРЫ СВЕТОДИОДОВ

4.2.1.

ПАРАМЕТРЫ СВЕТОДИОДОВ

Сила света I_V — излучаемый диодом световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в направлении, перпендикулярном плоскости излучающего кристалла. Указывается при заданном значении прямого тока и измеряется в канделах.

Яркость излучения L — величина, равная отношению силы света к площади светящейся поверхности. Она измеряется в канделах на квадратный метр (кд/м²) при заданном значении прямого тока, протекающего через диод.

Постоянное прямое напряжение $U_{пр}$ — напряжение на светодиоде при протекании постоянного прямого тока.

Таблица 4.2

Параметры светодиодов видимого диапазона длин волн

Тип прибора	Цвет свечения	Значения параметров при $T = 25^{\circ}\text{C}$, $I_{\text{пр. ном}}$, мА				Предельные значения параметров при $T = 25^{\circ}\text{C}$		$T_{\text{к макс}}$, $^{\circ}\text{C}$
		$I_{\text{У, МККЛ}} (L)$, кД/м ²	$U_{\text{пр}}$, В	$I_{\text{пр. ном}}$, мА	λ_{max} , МКМ	$I_{\text{пр. max}}$, мА	$U_{\text{обр. max}} (U_{\text{обр. и max}})$, В	
КЛ101А	Желтый	(10)	5,5	10	0,64	10	(2,0)	70
КЛ101Б	Желтый	(15)	5,5	20	0,64	20	(2,0)	70
КЛ101В	Желтый	(20)	5,5	40	0,64	40	(2,0)	70
2Л101А	Желтый	(10)	5	10	0,64	10	(2,0)	70
2Л101Б	Желтый	(15)	5	20	0,64	20	(2,0)	70
АЛ102А	Красный	40	2,8	5	0,69	10	(2,0)	70
АЛ102Б	Красный	100	2,8	10	0,69	20	(2,0)	70
АЛ102В	Зеленый	200	2,8	20	0,53	22	(2,0)	70
АЛ102Г	Красный	250	2,8	10	0,69	20	(2,0)	70
АЛ102Д	Зеленый	400	2,8	20	0,53	22	(2,0)	70
3Л102А	Красный	20	3	5	0,69	20	(2,0)	70
3Л102Б	Красный	100	3	10	0,69	20	(2,0)	70
3Л102В	Зеленый	250	2,8	20	0,53	22	(2,0)	70
3Л102Г	Красный	60	3	10	0,69	20	(2,0)	70
3Л102Д	Красный	200	3	10	0,69	20	(2,0)	70
АЛ112А	Красный	(1000)	2	10	0,68	12	(2,0)	70
АЛ112Б	Красный	(600)	2	10	0,68	12	(2,0)	70
АЛ112В	Красный	(250)	2	10	0,68	12	(2,0)	70
АЛ112Г	Красный	(350)	2	10	0,68	12	(2,0)	70
АЛ112Д	Красный	(150)	2	10	0,68	12	(2,0)	70
АЛ112Е	Красный	(1000)	2	10	0,68	12	(2,0)	70
АЛ112Ж	Красный	(600)	2	10	0,68	12	(2,0)	70
АЛ112И	Красный	(250)	2	10	0,68	12	(2,0)	70
АЛ112К	Красный	(1000)	2	10	0,68	12	(2,0)	70
АЛ112Л	Красный	(600)	2	10	0,68	12	(2,0)	70
АЛ112М	Красный	(250)	2	10	0,68	12	(2,0)	70

Продолжение табл. 4.2

Тип прибора	Цвет свечения	Значения параметров при $T = 25^\circ\text{C}$, $I_{\text{пр. ном}}$, мА				Предельные значения параметров при $T = 25^\circ\text{C}$		$T_{\text{к. макс.}}$, $^\circ\text{C}$
		$I_{\text{ср. макс.}}$ ($I_{\text{ср. макс.}}$), кД/м ²	$U_{\text{пр}}$, В	$I_{\text{пр. ном}}$, мА	λ_{max} , мкм	$I_{\text{пр. макс}}$, мА	$U_{\text{обр. макс.}}$ ($U_{\text{обр. макс.}}$), В	
АЛ301А-1	Красный	25	2,8	5	0,7	11	(2,0)	70
АЛ301Б-1	Красный	100	2,8	10	0,7	11	(2,0)	70
АЛ307А	Красный	150	2	10	0,666	20	2,0	70
АЛ307АМ	Красный	150	2	10	0,666	20	2,0	70
АЛ307Б	Красный	900	2	10	0,666	20	2,0	70
АЛ307БМ	Красный	900	2	10	0,666	20	2,0	70
АЛ307В	Зеленый	400	2,8	20	0,566	22	2,0	70
АЛ307ВМ	Зеленый	400	2,8	20	0,566	22	2,0	70
АЛ307Г	Зеленый	1500	2,8	20	0,566	22	2,0	70
АЛ307ГМ	Зеленый	1500	2,8	20	0,566	22	2,0	70
АЛ307Д	Желтый	400	2,8	10	0,56...0,7	22	2,0	70
АЛ307ДМ	Желтый	400	2,5	10	0,56...0,7	22	2,0	70
АЛ307Е	Желтый	1500	2,8	10	0,56...0,7	22	2,0	70
АЛ307ЕМ	Желтый	1500	2,5	10	0,56...0,7	22	2,0	70
АЛ307ЖМ	Желтый	3500	2,5	10	0,56...0,7	22	2,0	70
АЛ307И	Оранжевый	400	2,8	10	0,56	22	2,0	70
АЛ307Л	Оранжевый	1500	2,8	10	0,56	22	2,0	70
АЛ310А	Красный	610	2	10	0,67	12	2,0	70
АЛ310Б	Красный	250	2	10	0,67	12	2,0	70
АЛ316А	Красный	800	2	10	0,67	20	2,0	70
АЛ316Б	Красный	250	2	10	0,67	20	2,0	70
АЛС331А	Переменный	600	4	20	0,56...0,7	20	2	70
АЛ341А	Красный	150	2,8	10	0,69...0,71	20	2,0	70
АЛ341Б	Красный	500	2,8	10	0,69...0,71	20	2,0	70
АЛ341В	Зеленый	150	2,8	10	0,55...0,56	22	2,0	70
АЛ341Г	Зеленый	500	2,8	10	0,55...0,56	22	2,0	70

Продолжение табл. 4.2

Тип прибора	Цвет свечения	Значения параметров при $T = 25^{\circ}\text{C}$, $I_{\text{пр. ном}}$, мА				Предельные значения параметров при $T = 25^{\circ}\text{C}$		$T_{\text{к макс.}}^{\circ}\text{C}$
		$I_{\text{л}}$, МККЛ (L), КД/м ²	$U_{\text{пр}}$, В	$I_{\text{пр. ном}}$, мА	λ_{max} , МКМ	$I_{\text{пр. max}}$, мА	$U_{\text{обр. max}}$ ($U_{\text{обр}}$ и max), В	
АЛ341Д	Желтый	150	2,8	10	0,55...0,7	22	2,0	70
АЛ341Е	Желтый	500	2,8	10	0,55...0,7	22	2,0	70
АЛ341И	Красный	300	2	10	0,67	30	2,0	70
АЛ341К	Красный	700	2	10	0,67	30	2,0	70
КЛ360А	Зеленый	300	1,7	10	0,566	20	2,0	85
КЛ360Б	Зеленый	600	1,7	10	0,566	20	2,0	85
ЗЛ360А	Зеленый	300	1,7	10	0,566	20	2,0	85
ЗЛ360Б	Зеленый	600	1,7	10	0,566	20	2,0	85
КЛД901А	Синий	150	12	3	0,466	6	2,0	70
КИПД01А-1Л	Зеленый	800	7	10	0,55...0,56	12	8,0	70
КИПД01Б-1Л	Зеленый	600	7	10	0,55...0,56	12	8,0	70
КИПД02А-1К	Красный	400	1,8	5	0,7	20	3,0	70
КИПД02Б-1К	Красный	900	1,8	5	0,7	20	3,0	70
КИПД02В-1Л	Зеленый	250	2,5	5	0,55	20	3,0	70
КИПД02Г-1Л	Зеленый	500	2,5	5	0,55	20	3,0	70
КИПД02Д-1Ж	Желтый	250	2,5	5	0,63	20	3,0	70
КИПД02Е-1Ж	Желтый	650	2,5	5	0,63	20	3,0	70
КИПД03А-1К	Красный	60	2	5	0,65	8,0	5,0	70
КИПД03А-1Ж	Желтый	30	2,5	5	0,6	8,0	5,0	70
КИПД03А-1Л	Зеленый	32	3	5	0,57	8,0	5,0	70
КИПД04А-1К	Красный	15 000	2	10	0,7	30	2,0	70
КИПД04Б-1К	Красный	10 000	2	10	0,7	30	2,0	70
КИПД05А-1К	Красный	200	1,8	5	0,7	6,0	6,0	70
КИПД05Б-1Л	Зеленый	100	2,5	5	0,55	6,0	6,0	70
КИПД05В-1Ж	Желтый	100	2,5	5	0,63	6,0	6,0	70
КИПД06А-1К	Красный	4000	5,5	25	0,7	25	10,0	55
КИПД06Б-1К	Красный	6000	5,5	25	0,7	25	10,0	55

Продолжение табл. 4.2

Тип прибора	Цвет свечения	Значения параметров при $T = 25^{\circ}\text{C}$, $I_{\text{пр. ном}}$, мА				Предельные значения параметров при $T = 25^{\circ}\text{C}$		$T_{\text{к max}}$, $^{\circ}\text{C}$
		$I_{\text{ср. макс}}$ (L), кД/м ²	$U_{\text{пр}}$, В	$I_{\text{пр. ном}}$, мА	λ_{max} , мкм	$I_{\text{пр. макс}}$, мА	$U_{\text{обр. макс}}$ ($U_{\text{обр. л макс}}$), В	
КИПД06В-1Л	Зеленый	3000	7,5	25	0,55	25	10,0	55
КИПД06Г-1Л	Зеленый	5000	7,5	25	0,55	25	10,0	55
КИПМ01А-1К	Красный	400	2	10	0,65...0,675	30	5,0	70
КИПМ01Б-1К	Красный	1000	2	10	0,65...0,675	30	5,0	70
КИПМ01В-1Л	Желто-зеленый	400	2,8	20	0,55...0,57	30	5,0	70
КИПМ01Г-1Л	Желто-зеленый	1000	2,8	20	0,55...0,57	30	5,0	70
КИПМ01Д-1Л	Желто-зеленый	2000	2,8	20	0,55...0,57	30	5,0	70
КИПМ02А-1К	Красный	400	2	10	0,65...0,675	30	5,0	70
КИПМ02Б-1К	Красный	1000	2	10	0,65...0,675	30	5,0	70
КИПМ02В-1Л	Желто-зеленый	400	2,8	20	0,55...0,57	30	5,0	70
КИПМ02Г-1Л	Желто-зеленый	1000	2,8	20	0,55...0,57	30	5,0	70
КИПМ02Д-1Л	Желто-зеленый	2000	2,8	20	0,55...0,57	30	5,0	70
КИПМ03А-1К	Красный	400	2	10	0,65...0,675	30	5,0	70
КИПМ03Б-1К	Красный	1000	2	10	0,65...0,675	30	5,0	70
КИПМ03В-1Л	Желто-зеленый	400	2,8	20	0,55...0,57	30	5,0	70
КИПМ03Г-1Л	Желто-зеленый	1000	2,8	20	0,55...0,57	30	5,0	70
КИПМ03Д-1Л	Желто-зеленый	2000	2,8	20	0,55...0,57	30	5,0	70
КИПМ04А-1К	Красный	400	2	10	0,65...0,675	30	5,0	70
КИПМ04Б-1К	Красный	1000	2	10	0,65...0,675	30	5,0	70
КИПМ04В-1Л	Желто-зеленый	400	2,8	20	0,55...0,57	30	5,0	70
КИПМ04Г-1Л	Желто-зеленый	1000	2,8	20	0,55...0,57	30	5,0	70
КИПМ04Д-1Л	Желто-зеленый	2000	2,8	20	0,55...0,57	30	5,0	70

Параметры, приведенные в таблице: I_V — сила света светодиода; L — яркость светодиода; $U_{пр}$ — прямое падение напряжения на светодиоде при токе $I_{пр. ном}$; $I_{пр. ном}$ — номинальный прямой ток светодиода; λ_{max} — максимум спектрального распределения светодиода; $I_{пр. max}$ — максимально допустимый прямой ток через светодиод; $U_{обр. и max}$ — максимально допустимое импульсное обратное напряжение светодиода; $T_{к max}$ — максимально допустимая температура корпуса светодиода.

Максимально допустимый постоянный прямой ток $I_{пр. max}$ — максимальное значение постоянного прямого тока, при котором обеспечивается заданная надежность при длительной работе диода.

Максимально допустимое обратное напряжение $U_{обр. max}$ — максимальное значение постоянного напряжения, приложенного к диоду, при котором обеспечивается заданная надежность при длительной работе.

Максимально допустимое обратное импульсное напряжение $U_{обр. и max}$ — максимальное пиковое значение обратного напряжения на светодиоде, включая как однократные выбросы, так и периодически повторяющиеся.

Максимум спектрального распределения λ_{max} — длина волны излучения, соответствующая максимуму спектральной характеристики излучения светодиода.

В табл. 4.2 приведены параметры светодиодов видимого диапазона длин волн.

4.2.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕТОДИОДОВ

Цвет свечения характеризуется спектральными характеристиками излучения диодов. Диоды на основе фосфида галлия имеют спектральные характеристики с двумя выраженными максимумами в красном и зеленом участках спектра. В зависимости от количества активирующих примесей, внедренных в структуру излучающего кристалла при изготовлении, соотношение значений максимумов изменяется в сторону красного или зеленого цвета. При соотношении 10 : 1 и выше получают красный или зеленый цвет излучения. При соотношении максимумов 10 : 4 получают светодиоды желто-оранжевого цвета свечения.

Излучение диода характеризуется диаграммой направленности, которая определяется конструкцией диода, наличием линзы, оптическими свойствами защищающего кристалл материала. Излучение светодиода может быть узконаправленным или рассеянным.

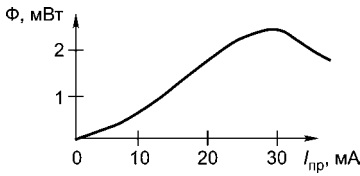


Рис. 4.2
Излучательная характеристика светодиода

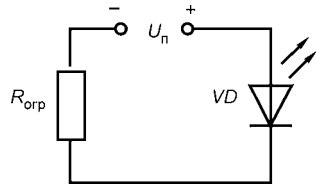


Рис. 4.3
Схема включения светодиода

Эффективность работы светодиода характеризуется зависимостями параметров оптического излучения от прямого тока через элемент от длины волны излучения. Зависимость потока излучения Φ [Вт] от прямого тока $I_{пр}$, показанная на рис. 4.2, есть излучательная (яркостная) характеристика.

В справочной литературе излучательной характеристикой называют также зависимость яркости L [кд/м²] от прямого тока. А зависимость силы света от прямого тока называют световой характеристикой.

В качестве параметра электрического режима выбран прямой ток через светодиод, а не напряжение на нем. Это связано с тем, что у светодиода p - n -переход включают в прямом направлении и его электрическое сопротивление мало. Обычно прямой ток через светодиод задается внешней цепью, например соответствующим выбором сопротивления $R_{опр}$, ограничивающим ток, как на рис. 4.3.

При низком токе $I_{пр}$ велика доля рекомбинации составляющей тока и мал коэффициент инжекции. С ростом прямого тока поток излучения сначала быстро увеличивается, до тех пор пока в токе диода не становится преобладающей диффузионная составляющая. Дальнейшее увеличение $I_{пр}$ приводит к постепенному насыщению центров люминесценции и сопровождается ростом ударной рекомбинации. Поэтому при определенном токе излучательная характеристика достигает максимума. Максимальная сила излучения зависит от площади и геометрии излучающего p - n -перехода и размеров электрических контактов.

4.2.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СВЕТОДИОДОВ

Параметры светодиодов как элементов цепей постоянного тока определяются их вольт-амперными характеристиками (ВАХ). Типичные ВАХ светодиодов изображены на рис. 4.4. Различия прямых ветвей ВАХ, показанные на рис. 4.5, связаны с разницей в ширине запрещенной зоны применяемых материалов. Чем мень-

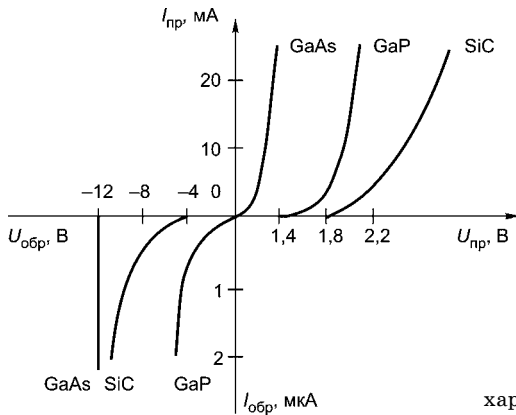


Рис. 4.4
Вольт-амперные
характеристики диодов

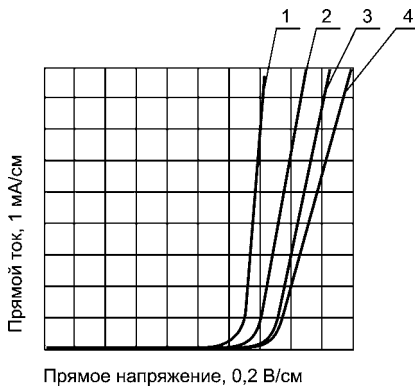


Рис. 4.5
Зависимость тока $I_{пр}$ от
напряжения $U_{пр}$:
1 — красный СИД $GaAs_{60}P_{40}$; 2 —
оранжевый СИД $GaAs_{35}P_{65}N$;
3 — желтый СИД $GaAs_{14}P_{86}N$;
4 — зеленый СИД $GaPN$.

ше длина волн излучения, тем больше прямое падение напряжения на светодиоде и потери электрической энергии в нем. Обратные ветви ВАХ имеют малое допустимое обратное напряжение, так как ширина $p-n$ -перехода в светодиодах невелика. При работе в схемах с большим обратным напряжением последовательно со светодиодом необходимо включать обычный диод.

Основные параметры диодов зависят от температуры. Зависимость яркости (силы света) от температуры практически линейная. С увеличением температуры яркость (сила света) уменьшается. В интервале рабочих температур возможны 2–3-кратные изменения яркости.

Светодиоды обладают высоким быстродействием. Излучение нарастает менее чем через 10 нс после передачи импульса прямого тока. Однако для устройств отображения, в которых обычно используются светодиоды, быстродействие не является критичным.

Поэтому для серийных светодиодов временные параметры не приводятся.

Светодиоды широко применяются в радиоэлектронной аппаратуре в устройствах индикации: включения, готовности к работе, наличия напряжения, аварийной ситуации, достижения температурного порога, выполнения функционального задания.

Когда через светодиоды протекает электрический ток, они излучают свет видимого спектра. Приборы в металлическом корпусе со стеклянной линзой обеспечивают направленное излучение света, а изготовленные в пластмассовых корпусах, выполненных из оптически прозрачного компаунда, создают рассеянное излучение.

Хотя цвет (длина волны) излучения определяется используемым материалом, количество света, испускаемого светодиодом,

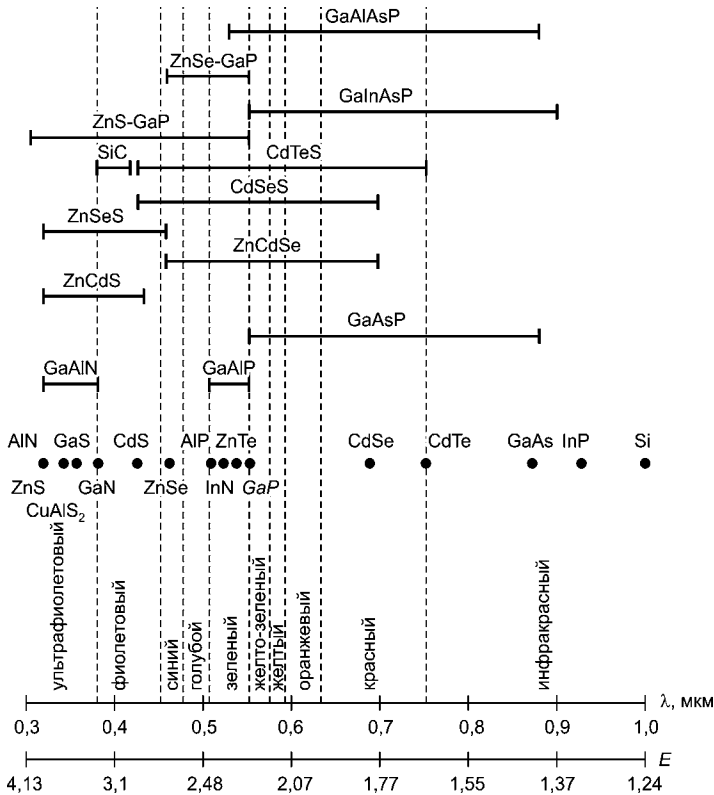


Рис. 4.6

Спектральные диапазоны излучения и максимальной фоточувствительности полупроводниковых материалов и структур

зависит от тока возбуждения и быстро увеличивается с ростом плотности тока.

Положение точек перегиба кривых, изображенных на рис. 4.5, непосредственно связано с шириной запрещенной зоны и для красных светодиодов соответствует меньшему прямому падению напряжения. Согласно рис. 4.5 динамическое сопротивление красных светодиодов равно 1...2 Ом, в то время как для материалов, дающих более коротковолновое излучение, оно составляет 7...15 Ом.

По мере роста плотности тока, протекающего через $p-n$ -переход, все большее число электронов и дырок инжектируются в запрещенную зону. При их движении возникают вторичные эффекты, повышающие число дырок и электронов, которые могут излучательно рекомбинировать. В результате световая эффективность светодиодов увеличивается. На рис. 4.6 показаны зависимости светового потока от тока возбуждения светодиодов для ряда материалов. Следует отметить, что красные GaP-светодиоды начинают излучать при низкой плотности тока, однако их излучение по сравнению с излучением светодиодов из других материалов достигает насыщения при относительно низкой плотности тока.

4.2.4. СХЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ВЫСОКУЮ СВЕТОВУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СВЕТОДИОДОВ

Наклон кривых для $\text{GaAs}_{60}\text{P}_{40}$, изображенных на рис. 4.6, показывает, что удвоение тока возбуждения приводит к более чем двукратному увеличению светового потока.

Это говорит о росте световой эффективности таких светодиодов при больших возбуждающих токах и указывает на то, что импульсные схемы возбуждения позволяют получить больший световой поток по сравнению со статическим. Достижимое таким образом повышение световой эффективности иллюстрируется числовым примером, относящимся к характеристике красного GaAsP-светодиода и к форме импульсов возбуждающего тока, изображенной на рис. 4.7а.

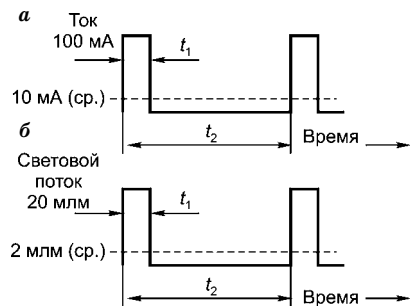


Рис. 4.7
Временные диаграммы:

а — возбуждающего тока; б — светового потока; коэффициент заполнения $t_1/t_2 = 10\%$, частота регенерации $1/t_2$.

Как видно из рис. 4.7б, при возбуждении постоянным током 10 мА создается световой поток около 0,7 мЛм, а при импульсном возбуждении средний световой поток составляет 2,0 мЛм (~10% от 20 мЛм).

При возбуждении большими токами длительность и коэффициент заполнения импульса влияют на температуру перехода. Возникающие при этом явления обсуждаются в следующем разделе. Если светодиоды возбуждаются импульсами с частотой, значительно превышающей 30 Гц, то не возникает ни мельканий, ни других ощущений вспышки, заметных человеческому глазу.

4.2.5. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПАРАМЕТРЫ СИД

С ростом температуры напряжение на светодиоде падает, соответствующий коэффициент составляет $-1,3...-2,5$ мВ/°С. Длина волны максимальной интенсивности излучения увеличивается с ростом температуры, коэффициент равен приблизительно $0,2$ нм/°С, иногда меньше — в зависимости от материала светодиода. Кроме того, излучение светодиода ослабевает с ростом температуры, типичное значение отрицательного температурного коэффициента приблизительно 1% /°С.

4.2.6. СРОК СЛУЖБЫ СИД

Поскольку светодиод является твердотельным прибором, срок его службы должен превышать долговечность оборудования, на котором он установлен. Однако чрезвычайно медленная естественная диффузия примесей в кристаллическое полупроводниковое соединение наряду с другими, не совсем ясными механизмами приводит к тому, что с течением времени световой поток несколько уменьшается.

Из кривых испытаний на срок службы, приведенных на рис. 4.7, видно, что спад светового потока больше при больших токах, однако, как правило, он меньше 10% даже после 1000 ч непрерывной работы светодиода.

Обычно срок службы светодиода определяется как время, за которое световой поток понижается до 50% первоначального значения. Для светодиодов с излучением в видимом диапазоне обычно указывается срок службы 100 000 ч (свыше 11 лет) для нормальных рабочих условий. Скорость деградации также зависит от выбранного рабочего тока — его снижение ослабляет деградацию и увеличивает срок службы.

4.2.7. ОГРАНИЧЕНИЕ ТОКА СИД

На кривых зависимости $I_{\text{пр}}$ от $U_{\text{пр}}$, изображенных на рис. 4.8, видно, что после достижения точки перегиба ток $I_{\text{пр}}$ резко возрастает при небольшом увеличении прямого падения напряжения $U_{\text{пр}}$. Для ограничения тока последовательно со светодиодом должен быть включен резистор (в соответствии с рис. 4.3).

Этим обеспечивается эксплуатация светодиода при токе, равном току $I_{\text{пр. max}}$ (или меньшем), задаваемому техническими условиями. Величина сопротивления резистора определяется из уравнения

$$R_{\text{огр}} = \frac{U_{\text{п}} - U_{\text{пр}}}{I_{\text{пр}}}, \quad (4.1)$$

где $U_{\text{п}}$ — напряжение питания.

Уравнение выполняется для всех вариантов применения светодиодов (в качестве индикаторов, осветителей, шкальных индикаторов, буквенно-цифровых индикаторов или оптронов).

Если несколько светодиодов подсоединяются параллельно (через общий резистор) непосредственно к одному и тому же стабилизированному источнику питания, то прибор с наименьшим пороговым напряжением $U_{\text{пор}}$ будет отбирать большую часть тока, в результате чего его световой поток заметно превысит световой поток других светодиодов. Для того чтобы избежать этого, необходимо с каждым светодиодом последовательно включить токоограничивающий резистор.

В качестве эмпирического правила можно ориентироваться на следующее: силы света 4...5 мкд достаточно для того, чтобы четко различать свечение светодиода в условиях ярко освещенного помещения (освещенность около 1000 лк). Для высокоэффективных красных светодиодов видимого диапазона излучения обычно требуемый ток $I \sim 10$ мА, для других цветов — $I \sim 20$ мА.

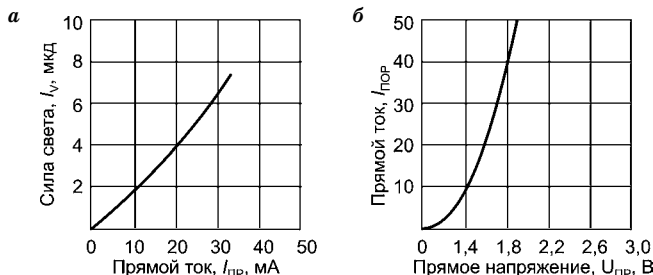


Рис. 4.8

Зависимость силы света от тока $I_{\text{пр}}$ (а) и тока $I_{\text{пр}}$ от напряжения $U_{\text{пр}}$ (б)

Пример 1. Расчет тока возбуждения светодиода. Красный светодиод должен питаться от источника +5 В, и его сила света будет 15 мкд. Рассчитать сопротивление токоограничивающего резистора.

Решение. На рис. 4.5 показаны характеристики этого светодиода. По ним можно найти, что ток $I_{\text{пр}} = 10$ мА необходим для получения силы света 15 мкд; при этом токе напряжение $U_{\text{пр}} = 1,8$ В. Используя эти параметры, получим

$$R_{\text{огр}} = \frac{U_{\text{п}} - U_{\text{пр}}}{I_{\text{пр}}} = \frac{5 - 1,8}{0,01} = \frac{3,2}{0,01} = 320 \text{ Ом.}$$

Ближайший номинал резистора равен 330 Ом (0,5 Вт).

4.2.8.

ДОСТОИНСТВА ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Поскольку рабочее напряжение, ток и потребляемая мощность светодиодов низки, сопряжение их с электронными схемами возбуждения проще, чем ламп накаливания или газоразрядных источников света. Жесткие герметичные корпуса обеспечивают высокую ударную и вибрационную прочность СИД, что позволяет использовать светодиоды в таких тяжелых условиях воздействия окружающей среды, которые не выдерживают другие источники света. Применение твердотельных материалов для изготовления светодиодов обеспечивает их большой срок службы, что увеличивает общую надежность и уменьшает расходы на эксплуатацию оборудования, на котором светодиоды установлены. Широкая гамма цветов излучения светодиодов — от красного до оранжевого, желтого и зеленого — открывает разработчикам разнообразные возможности их применения. Светодиоды отличаются низким уровнем собственных шумов и высокой помехоустойчивостью, быстротой и стабильностью отклика на воздействие управляющей схемы; при этом они не создают бросков тока и у них нет периода разогрева, характерного для источников света с нитями накаливания.

4.3.

КОНСТРУКЦИИ СВЕТОДИОДОВ

Излучающая активная область может быть по-разному размещена в кристалле (в соответствии с рис. 4.9). Обычно ее площадь стремятся сделать минимальной, чтобы достичь требуемых значений параметров при меньших значениях инжектируемого тока.

Для уменьшения потерь при выходе излучения из кристалла и улучшения диаграммы направленности иногда используют кри-

сталь, отличный по форме от параллелепипеда. Поскольку полупроводник оптически значительно плотнее воздуха, большая часть световых лучей не выходит наружу, а отражается от поверхности внутрь кристалла и в конечном счете поглощается. Так, для поверхности раздела «арсенид галлия — воздух» лишь лучи, отклоняющиеся от нормали менее чем на 17° , выходят наружу. По сравнению с плоским кристаллом можно получить выигрыш по $\eta_{\text{опт}}$ при использовании полупроводниковой полусферы (рис. 4.9*д, е*) в 15...25 раз, пластмассовой линзы — в 3...4 раза (рис. 4.9*б, е*), усеченного конуса (рис. 4.9*ж*) — в 4...6 раз.

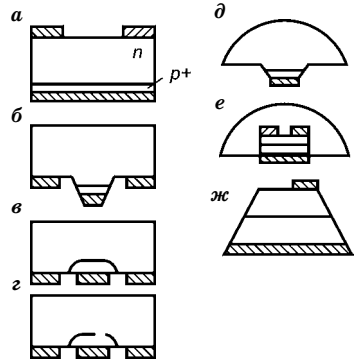


Рис. 4.9
Виды конструкций светодиодов:

а, б, в, г — с плоской излучающей поверхностью; *д, е* — с полусферической излучающей поверхностью; *ж* — с торцевой излучающей поверхностью.

Конус, изображенный на рис. 4.9*ж*, улучшает диаграмму направленности торцевого излучения структур с широкой активной областью. Конструкции, приведенные на рис. 4.9*д, ж*, сложны, дорогостоящи и непригодны для многих микроэлектронных устройств из-за больших габаритов.

4.4. ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ СВЕТОДИОДОВ

На рис. 4.10 показаны две основные схемы возбуждения светодиодов, пригодные независимо от того, являются ли последние излучателями, осветителями, сегментами, шкалами, буквенно-цифровыми индикаторами или входными каскадами оптронов.

В схеме с активным низким уровнем с проводящим транзистором светодиод смещен в прямом направлении и испускает свет.

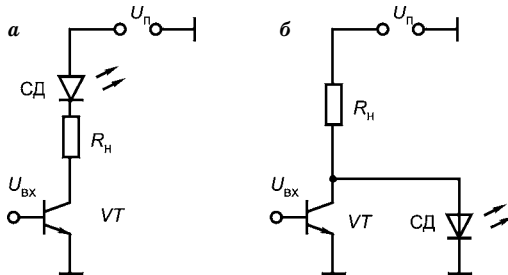


Рис. 4.10
Схема формирователя с активным низким (*а*) и высоким (*б*) уровнем

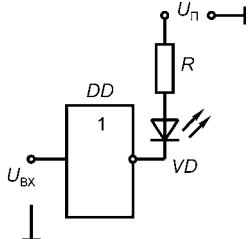
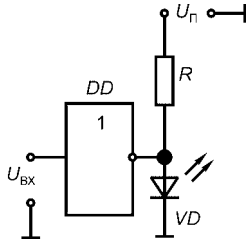
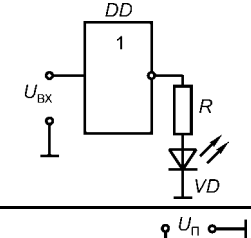
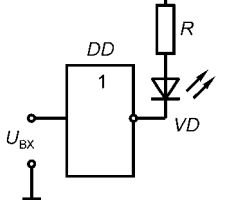
Сопротивление токоограничивающего резистора можно рассчитать по формуле

$$R_{\text{огр}} = \frac{U_R}{I_{\text{сд}}} = \frac{U_{\text{п}} - (U_{\text{сд}} + U_{\text{к.н}})}{I_{\text{сд}}}, \quad (4.2)$$

где $U_{\text{к.н}}$ — напряжение насыщения транзистора.

Таблица 4.3

Состояние ТТЛ-формирователей и светодиодов с открытым коллектором (1, 2) и с активным высоким выходным уровнем (3, 4)

№	Схема ТТЛ-формирователя	Уровень $U_{\text{вх}}$	Состояние светодиода
1		Высокий	Включен
		Низкий	Выключен
2		Высокий	Выключен
		Низкий	Включен
3		Высокий	Выключен
		Низкий	Включен
4		Высокий	Включен
		Низкий	Выключен

В схеме с активным высоким уровнем светодиод излучает, когда транзистор выключен (не проводит). В этом случае резистор должен удовлетворять двум критериям: гарантировать прохождение через светодиод тока $I_{\text{СД}}$, достаточного для создания требуемого светового выхода при выключенном транзисторе, и обеспечивать насыщение проводящего транзистора. При выключенном транзисторе уравнение для $R_{\text{огр}}$ имеет вид

$$R_{\text{огр}} = \frac{U_{\text{п}} - U_{\text{СД}}}{I_{\text{СД}}}, \quad (4.3)$$

а когда транзистор проводит,

$$R_{\text{огр}} = \frac{U_{\text{п}} - U_{\text{СД}}}{I_k}, \quad (4.4)$$

где I_k — ток насыщения транзистора.

В табл. 4.3 представлено несколько ТТЛ-формирователей возбуждающих напряжений, а также приведены соотношения включенных и выключенных состояний СД и соответствующих логических входных уровней.

4.5. ВЫБОР ТИПА СВЕТОДИОДА

4.5.1. ОСНОВЫ ВЫБОРА ТИПА СВЕТОДИОДА

Выбор конкретного типа светодиода для данного применения может зависеть не только от требуемого светового выхода и тока возбуждения, но и от других важных факторов. К их числу относятся: сочетание линзы с корпусом, место расположения и цвет излучения светодиода, условия освещенности окружающей среды, угол обзора, контраст с окружающим фоном и расстояние наблюдения.

Изготовители выпускают светодиоды в корпусах, заимствованных у ламп накаливания (стандартных и укороченных корпусах Т-3/4, Т-1, Т-1 3/4), а также предлагают втулки и оправки для монтажа светодиодов на плоских панелях. Светодиоды также могут поставляться в транзисторных корпусах ТО-18 и в корпусах с осевым расположением выводов для низкопрофильного монтажа непосредственно на печатных схемных платах. Кроме того, светодиоды выпускаются с прямоугольными, квадратными и другой конфигурации корпусами. Профилированный излучатель имеет форму стрелки, указывающей в светящемся состоянии направление; квадратные и прямоугольные излучатели могут иметь надписи непосредственно на подсвечиваемой поверхности корпусов.

Таблица 4.4

Значения освещенности в разных условиях

Окружающие условия	Освещенность, лк	Окружающие условия	Освещенность, лк
Дневной свет:		Производство:	
ясно	85 000	электрические испытания и монтаж	1000
облачно	15 000	грубая слесарная обработка	500
Учреждение:		Квартира:	
обычные условия	1000	кухня	1500
работа на пишущей машинке или за компьютером	1500	кабинет	700
		гостиная	100

Типичные места расположения светодиодов — это внутренние части или края печатных схемных плат, где они используются для отображения логических состояний или диагностической информации; внешние поверхности (например, лицевые панели или подсвет светофильтров) индикаторов карманных калькуляторов, автономных электронных игр или консолей дистанционного управления.

Помимо светящегося или несветящегося состояния светодиода, для передачи информации может быть дополнительно использован цвет (например, красный — обозначение опасности, желтый — предупреждающий, зеленый — указатель нормальных условий). Окружающее освещение может изменяться от яркого солнечного света в наружных условиях до характерного для закрытых помещений в учреждениях и домах или даже слабо освещенных помещений с радиолокационным оборудованием. Данные по освещенности для ряда типичных случаев сведены в табл. 4.4.

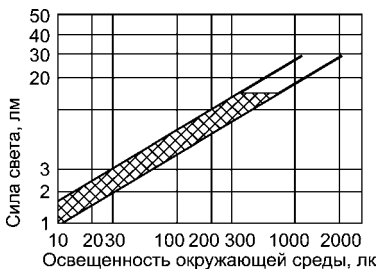


Рис. 4.11

Зависимость, определяющая условия хорошей читаемости СИД при различных уровнях освещенности окружающей среды

при любых условиях освещенности окружающей среды должна быть задана минимальная сила света, позволяющая оператору четко различать включенное и выключенное состояние светодиода (рис. 4.11).

При постоянных условиях на поверхности расположения индикатора (т. е. неизменных типах све-

одиодов и линзы, угле, расстоянии наблюдения и т. д.) сила света должна быть тем больше, чем выше освещенность окружающей среды. Для одного и того же кристалла светодиода узкофокусирующая линза дает высокую силу света вдоль главной оси, но малый угол обзора — от 5 до 10°. В то же время линза с широкой диаграммой направленности обеспечивает большой угол обзора, но при значительно меньшей силе света. На восприятие человека сильное влияние может оказывать фон вокруг светодиода. Воспринимаемая яркость фона зависит от количества падающего света, коэффициента отражения и текстуры поверхности, а также от цветового контраста с излучением светодиода. Визуальное восприятие можно улучшить за счет усиления контраста между светящимся светодиодом и его фоном с помощью механических средств (козырьков, жалюзи, утопленного расположения индикатора) или введения оптических фильтров (последние эффективны, несмотря на то что несколько ослабляют силу света светодиода). Расстояние наблюдения влияет на выбор минимального размера кажущейся излучающей поверхности светодиода. Субминиатюрные корпуса (подобные Т-3/4) пригодны, когда расстояние наблюдения около метра; большие прямоугольные или профилированные излучатели могут потребоваться при значительном удалении светодиода от наблюдателя.

В некоторых применениях в результате выбора светодиода может первоначально оказаться, что предъявляемым требованиям не удовлетворяют никакие серийные светодиоды. В такой ситуации разработчик должен проанализировать различные компромиссные варианты конструкции и найти доступный светодиод, который удовлетворяет, по крайней мере, большинству важнейших требований применения.

Можно, например, сделать фон более темным, используя анодированный черненый алюминий, и выбрать светодиод с большей силой света, взяв красный, имеющий более высокую световую эффективность, чем зеленый, и т. д.

4.5.2. ПАМЯТКА РАЗРАБОТЧИКУ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИД

Приведем перечень критериев для правильного выбора светодиода — так называемую памятку разработчику [30].

1. Тип оборудования.
2. Наружное или внутреннее расположение индикатора.
3. Метод монтажа.
4. Освещенность окружающей среды.

5. Цвет светодиода.
6. Окружающий фон.
7. Угол обзора.
8. Расстояние наблюдения.
9. Тип фильтра (если он применяется).
10. Другие используемые методы повышения контраста.
11. Другие критерии конструирования.
12. Типы потенциально используемых светодиодов.
13. Необходимая сила света.
14. Ток $I_{\text{пр}}$, требуемый для получения необходимой силы света.
15. Постоянный или импульсный ток возбуждения.
16. Напряжение $U_{\text{пр}}$, соответствующее току $I_{\text{пр}}$.
17. Тип схемы возбуждения.
18. Сопротивление токоограничивающего резистора.

4.6.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СВЕТОДИОДА

Эквивалентная схема светодиода приведена на рис. 4.12.

Время включения и время выключения излучения p - n -перехода из арсенида галлия определяется временем жизни неосновных носителей в p -слое и составляет около 1 нс. Однако в реальных излучателях время световой реакции несколько больше и зависит от уровня возбуждения и приложенного напряжения.

Светодиод из арсенида-фосфида галлия ($\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$), полученного диффузией цинка в эпитаксиальную пленку n -типа с концентрацией носителей $2,7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и удельным сопротивлением 0,014 Ом·см, имеет $C_{\text{д}} = 185 \text{ пФ}$ при площади диода $0,25 \text{ мм}^2$, а последовательное сопротивление $r_{\text{п}} \sim 1 \text{ Ом}$.

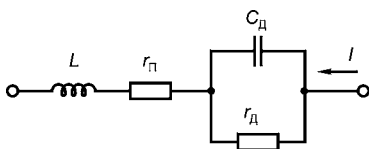


Рис. 4.12

Электрическая модель светодиода

Для светодиодов время задержки определяется как время, требуемое для достижения интенсивности излучения, соответствующей половине интенсивности для установившегося процесса. Оно составляет 5...10 нс при токе возбуждения 10 мА и уменьшается до

2...3 нс при токе возбуждения 100 мА. Увеличение времени задержки по сравнению с временем жизни неосновных носителей в несколько раз связано с емкостью $C_{\text{д}}$, индуктивностью L (обусловленной подводящими проводниками) и активным сопротивлением диода $r_{\text{п}}$. Сопротивление равно сумме сопротивления внешней цепи и последовательного сопротивления диода.

Емкость диода зависит от приложенного напряжения

$$C_D = \frac{C_0}{(U_K - U_{\text{ПР}})^\alpha}, \quad (4.5)$$

где C_0 — емкость при нулевом смещении; $U_{\text{ПР}}$ — прямое напряжение смещения; U_K — напряжение контактной разности потенциалов; α — коэффициент, зависящий от характера распределения примесей в диоде.

Диффузионная емкость составляет примерно 200 пФ при максимальном токе и быстро уменьшается при уменьшении тока. Ею можно пренебречь по сравнению с емкостью запорного слоя, составляющей примерно 1000 пФ. В соответствии с электрической моделью, полный ток через диод равен сумме реактивного тока I_C через емкость и тока I_D через резистор r_D . Ток через p - n -переход в стационарном режиме, равный току I_D , состоит из диффузионного тока $I_{\text{диф}}$, определяющего величину излучения и рекомбинационного тока $I_{\text{рек}}$ в области объемного заряда:

$$I_{\text{диф}} = I_{01} \exp \frac{qU_{\text{пр}}}{KT}; \quad (4.6)$$

$$I_{\text{рек}} = I_{02} \exp \frac{qU_{\text{пр}}}{mKT}, \quad (4.7)$$

где m — коэффициент, зависящий от механизма рекомбинации.

Дифференциальное уравнение для напряжения на p - n -переходе при подключении напряжения $U_0(t)$ имеет вид

$$-LC_D d^2 U_{\text{пр}} / dt^2 = (r_{\text{п}} C_D - L dI_D / dU_{\text{пр}}) dU_{\text{пр}} / dt + r_{\text{п}} I_{\text{п}} + U_{\text{пр}} = U_0(t), \quad (4.8)$$

где I_D — ток диода в стационарном режиме.

Так как излучение из p - n -перехода пропорционально диффузионному току, переходная характеристика интенсивности света при любом зависящем от времени напряжении $U_0(t)$ может быть получена при решении уравнения (4.8) при подстановке в него значения $U_{\text{пр}}(t)$.

Рассчитанные параметры СИД согласно [1]:

$$C_0 = 230 \text{ пФ}; \quad U_K = 1,65 \text{ В}; \quad \alpha = 0,5; \quad I_{01} = 2,2 \cdot 10^{-28} \text{ А}; \\ I_{02} = 2,2 \cdot 10^{-14} \text{ А}; \quad r_{\text{п}} = 51 \text{ Ом}; \quad L = 8 \text{ нГн}; \quad T = 300 \text{ К}.$$

Оценки показывают, что влияние индуктивности на время переходного процесса сказывается, если это время меньше 1 нс. Переходный процесс аналогичен переходному процессу в линейной

цепи емкостью C_d и сопротивлением $r_{\text{п}}$. Экспериментально определенные задержки превышают теоретические, что объясняется влиянием диффузионной емкости, которая не учтена в расчете. Анализ показывает, что для повышения быстродействия необходимо уменьшить внешнее сопротивление, площадь излучающей поверхности, увеличивать плотность тока и напряжение смещения.

4.7. СВЕТОДИОДЫ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Эти полупроводниковые приборы отличаются от обычных светодиодов тем, что при протекании прямого тока излучают электромагнитную энергию в инфракрасном спектре, не видимом человеческим глазом. Такой светодиод работает в паре с фотоприемником. Поэтому его важными характеристиками являются узкая диаграмма направленности излучения и стабильность λ_{max} .

При спектральном согласовании светодиода с соответствующим фотоприемником используют параметр $\Delta\lambda_{0,5}$, определяющий

Таблица 4.5

Параметры ИК-светодиодов

Тип прибора	$P_{\text{изл}}$, мВт	$U_{\text{пр}}$, В	λ_{max} , мкм	$\Delta\lambda_{0,5}$, мкм	$I_{\text{пр. max}}$, мА	$U_{\text{обр. и max}}$, В
АЛ103А	1	1,6	0,95	0,05	52	2
АЛ103Б	0,6	1,6	0,95	0,05	52	2
АЛ106А	0,2	1,7	0,92		100	
АЛ106Б	0,4	1,7	0,92		100	
АЛ106В	0,6	1,7	0,92		100	
АЛ106Г	1,0	1,7	0,92		100	
АЛ106Д	0,5	1,7	0,92		100	
АЛ107А	6	2	0,95	0,03	80	
АЛ107Б	10	2	0,95	0,03	80	
АЛ108А	1,5	1,35	0,94	0,04	110	2
АЛ109А	0,2	1,2	0,94	0,04	22	
АЛ115А	10	2	0,95	0,05	50	
АЛ118А	2 (10*)	1,7	1,0	0,04	500	1
АЛ119А	40	3	0,94		200	
АЛ119Б	40	3	0,94		200	

* Импульсная мощность.

полосу наивысшей спектральной плотности инфракрасных лучей данного диода (эффективная взаимная работа элементов прибора достигается при совпадении значения $\Delta\lambda_{0,5}$ излучения и фоточувствительности приемника). У диодов в металlostеклянных корпусах инфракрасные лучи испускает полусферическая поверхность, на которую нанесено диэлектрическое просветляющее покрытие. Приборы в миниатюрных пластмассовых корпусах имеют излучательную головку выпуклого профиля, из прозрачного компаунда. Бескорпусные светодиоды поставляются в индивидуальной таре-спутнике или в групповой упаковке. При монтаже их крепят с помощью клея.

Светодиоды инфракрасного излучения применяются в фотоэлектронной автоматике, внешних устройствах вычислительной техники, системах преобразования «угол–код», оптронных коммутационных устройствах, фотонных линиях связи и др. Основные параметры этих полупроводниковых приборов приведены в табл. 4.5.

4.8. СВЕТОДИОДНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПОВЫШЕННОЙ ЯРКОСТИ И БЕЛОГО СВЕТА

Острая потребность в широкой номенклатуре информационных экранов, дисплеев, осветительных приборов обуславливает необходимость создания особо ярких светодиодов (ОЯ СИД) различной цветовой гаммы, в том числе белого свечения.

Зеленые, белые, синие ОЯ СИД изготавливаются на структурах, состоящих из нитрида индия-галлия (InGaN). У них существенно большие прямые падения напряжения на $U_{пр}$ по сравнению с красными, желтыми и оранжевыми, как следует из табл. 4.6. Необходимость ограничения прямого тока объясняет целесообразность питания СИД от источников тока.

Для каждой конструкции СИД характерна определенная диаграмма излучения. Некорректно говорить о силе света, не определяя угол излучения, и наоборот. Следует обращать внимание, на каком уровне от $I_{V_{max}}$ фиксируется полный угол излучения.

Дисперсия излучения не измеряется для каждого светодиода, поскольку это трудоемкий процесс. В реальности наблюдаются значительные отклонения от справочных данных, особенно в случае узконаправленных СИД ($2\Theta_{1/2} < 100$). Типичная дисперсия для СИД типов КИПД87, КИПД89 и КИПД91 приведена на рис. 4.13.

Таблица 4.6

Типичные и максимальные значения $U_{пр}$ при токе 20 мА
для СИД всех длин волн

Длина волны излучения λ , нм	Цвет свечения	$U_{пр}$, В		Примечание
		тип.	макс.	
470	Белый	3,5	4,0	Синий кристалл + люминофор
	Зеленый			—
505	Alpen green	1,95	2,5	—
525	Зеленый			—
565	Желто-зеленый	1,95	2,5	—
570	Желтый			AS AlinGap
590	Желто-оранжевый	2,1	2,6	TS AlinGap
		1,95	2,5	AS AlinGap
605	Оранжевый	2,1	2,6	TS AlinGap
		1,95	2,5	AS AlinGap
615	Красный	1,95	2,5	TS AlinGap
625		1,95	2,5	TS AlinGap
		2,1	2,6	—
640		1,95	2,5	—
660		1,95		

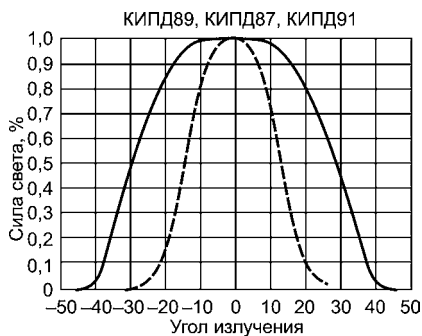


Рис. 4.13
Типичная диаграмма
излучения

При выборе ОЯ СИД особое внимание уделяют типу колбы и конструкции. Колба должна быть прозрачной, если:

- нужна максимальная сила света при сравнительно небольшом угле излучения (30°);
- СИД используется с вторичной оптикой (цветными и матовыми фильтрами) или в качестве локального исправления источника света, например как фонарик;
- прозрачная колба используется в СИД всевозможных подсветок и светодиодов.

Колба должна быть матовой, если СИД мультицветный. Колба должна быть окрашенной в цвет свечения кристаллов для всех сигнальных СИД, а также для ОЯ СИД, применяемых в изготовлении табло бегущих строк и других, использующих эффект контраста СИД на темном фоне. В случае матовых СИД возможен эффект паразитной засветки солнечными лучами (фантом-эффект) (табл. 4.7).

Таблица 4.7

Основные характеристики сигнальных светодиодов

Конструктив, диаметр, наименование	Цвет свечения (λ, нм)	Сила света, мкд	Рабочий ток, мА	Угол обзора, град		
∅ 3 мм (КИПД42)	Красный (660)	5...100	1...20	40		
	Желтый (590)					
	Желто-зеленый (570)					
	Зеленый (565)					
Низкопрофильные СИД ∅ 5 мм (КИПД88)	Красный (660)	10...100		1...20	60	
	Желтый (590)					
	Желто-зеленый (570)					
	Зеленый (565)					
∅ 5 мм (КИПД40)	Красный (660)	10...100			1...20	40
	Желтый (590)					
	Желто-зеленый (570)					
	Зеленый (565)					
Плоские СИД ∅ 10 мм (КИПМ15)	Красный (660)	1...100	1...20			30
	Желтый (590)					
	Желто-зеленый (570)					
	Зеленый (565)					
Прямоугольные СИД 2,2×5 мм	Красный (660)	1...100		1...20		50
	Желтый (590)					
	Желто-зеленый (570)					
	Зеленый (565)					
Многокристалльные СИД ∅ 6 мм (КИПМ25)	Красный (660)	1...100			1...20	120
	Желтый (590)					
	Желто-зеленый (570)					
	Зеленый (565)					
Двухцветные СИД ∅ 5 мм (КИПД41)	Красно-зеленые (660/565), любые другие варианты	1...50	10, 20			60
	∅ 20 мм 1-, 2-, 4-, 6-кристалльные (КИПМ 20)	Красный (660)				1...100
Желтый (590)						
Желто-зеленый (570)						
Зеленый (565)						

Таблица 4.8

**Основные характеристики ярких светодиодов красного
и желтого цветов свечения в матовом окрашенном корпусе**

Шифр сигнала	Цвет свечения (λ , нм)	Структура	Прямое напряжение, $U_{пр}$, В		Сила света, кд, при токе 20 мА (10 мА)	Угол обзора, град
			тип.	макс.		
КИПМ45Н30	Красный (625)	TS AlinGap	2,1	2,8	1,0...1,5	30
КИПМ45П30					1,5...2,0	
КИПМ45Р30					2,0...3,0	
КИПМ45Н30	Желтый (590)				1,0...1,5	
КИПМ45П30					1,5...2,0	
КИПМ45Р30					2,0...3,0	
КИПМ45Н30	Красный (625)		2,0	2,5	(1,0...1,5)	
КИПМ45П30					(1,5...2,0)	
КИПМ45Р30					(2,0...3,0)	
КИПМ45Н30	Желтый (590)				(1,0...1,5)	
КИПМ45П30					(1,5...2,0)	
КИПМ45Р30					(2,0...3,0)	

В табл. 4.8 приведены параметры распространенных сигнальных СИД. С точки зрения экономии места на лицевой панели прибора или устройства выгодно вместо нескольких СИД, например красного и зеленого, применять один мультицветный СИД круглой или прямоугольной формы.

Параметры ярких СИД красного и желтого цветов свечения в матовом окрашенном корпусе приведены в табл. 4.8. В светодиодах применяются окрашенные рассеивающие линзы, излучающие световой поток, достаточный для изготовления недорогих информационных табло. Потенциальные возможности высокоэффективных структур позволяют получать силу света около 2 кд при токе не только 20 мА, но и 10 мА, что увеличивает надежность изделий на СИД.

Совершенствование светодиодов проходило по двум направлениям: увеличение внешнего квантового выхода и расширение спектра излучения. Велик вклад в эту работу и российских ученых, в частности Ж. И. Алферова, еще в 1970-е гг. разработавшего так называемые многопроходные двойные гетероструктуры, позволяющие значительно увеличить внешний квантовый выход за счет ограничения активной области рекомбинации. Использовались гетероструктуры на основе арсенидов галлия-алюминия, при этом

был достигнут внешний квантовый выход до 15% для красной части спектра (световая отдача до 10 лм/Вт) и более 30% — для инфракрасной. Показателен факт присуждения Жюресу Ивановичу Алферову Нобелевской премии в 2000 г., когда стали очевидными важность и огромное значение его работ для развития науки и техники.

Исследования других гетероструктур привели к созданию эффективных светодиодов, излучающих в других областях спектра. Так, светодиоды, на основе фосфидов алюминия-галлия-индия (разработка компании Hewlett Packard) излучали красно-оранжевый, желтый и желто-зеленый свет. Они имели световую отдачу до 30 лм/Вт (и внешний квантовый выход до 55%), превосходя лампы накаливания. При этом необходимо понимать, что, в отличие от ламп накаливания, светодиоды излучают свет в относительно узкой полосе спектра, ширина которой составляет 20...50 нм. Они занимают промежуточное положение между лазерами, свет которых монохроматичен (излучение со строго определенной длиной волны), и лампами различных типов, излучающих белый свет (смесь излучений различных спектров). Иногда такое узкополосное излучение называют квазимонохроматическим.

Современный уровень технологий производства ОЯ СИД в мире позволяет повсеместно заменять лампы накаливания более надежными и потребляющими мало энергии источниками света. Мировые лидеры по производству СКД, такие как Nichia и Lumileds, заявляют, что век ламп накаливания на исходе (им осталось существовать меньше десяти лет).

Так, световая отдача лампы накаливания с красным светофильтром составляет всего 30 лм/Вт, в то время как красные светодиоды сегодня дают 30 лм/Вт и более. Например, новейшие приборы Luxeon производства американской компании Lumileds (совместное предприятие Agilent Technologies и Philips Lighting) обеспечивают 50 лм/Вт для красной и даже 65 лм/Вт для оранжево-красной части спектра. Впрочем, и это не рекорд — желто-оранжевыми светодиодами планка 100 лм/Вт уже взята.

Долгое время развитие светодиодов сдерживалось отсутствием приборов, излучающих в синем диапазоне. Эту проблему решил в 1990-х гг. Ш. Накамура из компании Nichia Chemical (а позднее и специалисты Hewlett Packard) с помощью гетероструктуры на основе нитрида индия-галлия InGaN.

В сине-зеленой области спектра удалось добиться внешнего квантового выхода до 20% и вплотную приблизиться по эффективности к люминесцентным лампам (световая отдача 70...90 лм/Вт.)

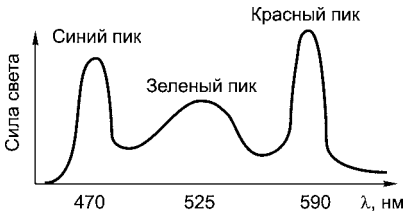


Рис. 4.14
Получение белого света

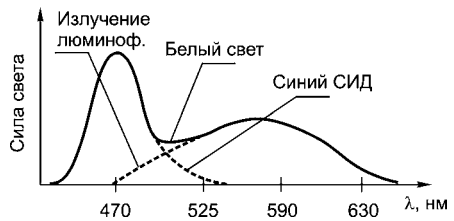


Рис. 4.15
Получение белого света с помощью кристалла синего светодиода, покрытого слоем желтого люминофора

Изобретение синих светодиодов замкнуло RGB-круг и сделало возможным создание светодиодов белого света. На данный момент существуют три способа получения белого света с помощью светодиодов. Первый — смешивание в определенной пропорции излучения красного, зеленого и синего светодиодов. При этом могут быть использованы как отдельные светодиоды разных цветов, так и трехкристальные светодиоды, объединяющие кристаллы красного, синего и зеленого свечения в одном корпусе.

На рис. 4.14 показана зависимость спектральной плотности излучения от длины волны, необходимая для получения белого света путем смешивания в определенной пропорции излучений красного, зеленого и синего светодиодов.

Основой более дешевого и распространенного светодиода белого света является полупроводниковый кристалл структуры InGaN, излучающий на длине волны 460...470 нм (синий свет), с нанесенным на его поверхность люминофором на основе YAG (иттрий-гадолиниевых грантов), активизированных GeZ^+ , излучающим в широком диапазоне видимого спектра с максимумом в его желтой части.

Получение белого света с помощью кристалла синего светодиода, покрытого слоем желтого люминофора, представлено на рис. 4.15.

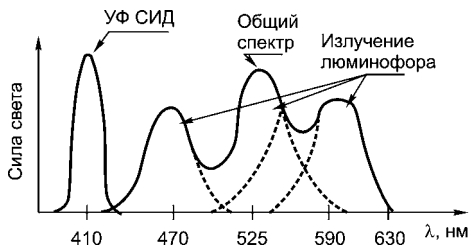
Человеческий глаз комбинацию такого рода воспринимает как белый цвет.

Подобные светодиоды намного дешевле трехкристальных, отличаются хорошей цветопередачей, а по светоотдаче (до 30 лм/Вт) уже обогнали лампы накаливания (15 лм/Вт).

Еще один метод получения белого света — возбуждение трехслойного люминофора светодиодом ультрафиолетового спектра (УФ-СИД).

На рис. 4.16 показано получение белого света с помощью светодиода и RGB-люминофора.

Рис. 4.16
Получение белого света с помощью светодиода и RGB-люминофора



Кристалл светодиода — практически точечный источник света, поэтому его корпус может быть весьма миниатюрным. Конструкция корпуса светодиода должна обеспечить минимальные потери излучения при выходе во внешнюю среду и фокусирование света в заданном телесном угле. Кроме того, необходим эффективный отвод тепла от кристалла. Самая распространенная конструкция светодиода — традиционный пятимиллиметровый корпус.

Световая отдача белого светодиода Luxeon III при номинальном прямом токе 0,7 А составляет 25 лм/Вт, световой поток при этом равен 65 лм.

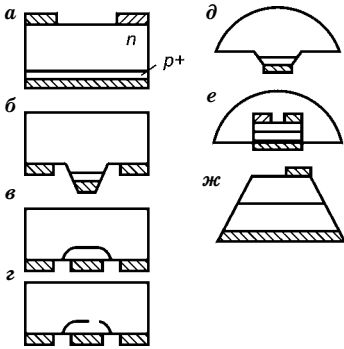
Светоотдача Luxeon III уже превосходит светоотдачу классических и галогенных ламп накаливания, и в ближайшее время Lumileds Lighting планирует вплотную подойти к созданию люминесцентных ламп со светоотдачей 80...100 лм/Вт.

Тестовые вопросы к главе 4
«ПРИБОРЫ НЕКОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ»

- | | |
|--|--|
| <p>4.1. Какая длина волны соответствует видимой области света:
а) 0,1 мкм;
б) 0,5 мкм;
в) 1 мкм;
г) 2 мкм?</p> <p>4.2. Какое напряжение пробоя $U_{\text{проб}}$ типично для светодиодов:
а) 2 В;
б) 15 В;
в) 20 В;
г) 40 В?</p> <p>4.3. От чего зависит частота излучения светодиода:
а) от напряжения;
б) от прямого тока;
в) от ширины запрещенной зоны;
г) от обратного напряжения?</p> | <p>4.4. При каком напряжении светодиод эффективно излучает свет:
а) $U_{\text{обр}} = 5 \text{ В}$;
б) $U_{\text{пр}} = 5 \text{ В}$;
в) $U_{\text{обр}} = 2 \text{ В}$;
г) $U_{\text{пр}} = 2 \text{ В}$?</p> <p>4.5. Укажите характеристику, которая соответствует красному СИД:
а) $\text{GaAs}_{60}\text{P}_{40}$;
б) $\text{GaAs}_{35}\text{P}_{65}\text{N}$;
в) $\text{GaAs}_{14}\text{P}_{86}\text{N}$;
г) GaPN.</p> <p>4.6. Укажите характеристику, которая соответствует оранжевому СИД:
а) $\text{GaAs}_{60}\text{P}_{40}$;
б) $\text{GaAs}_{35}\text{P}_{65}\text{N}$;
в) $\text{GaAs}_{14}\text{P}_{86}\text{N}$;
г) GaPN.</p> |
|--|--|

4.7. Какая конструкция СИД из приведенных на схеме отличается простотой, но при этом низким коэффициентом вывода оптического излучения:

- а) а;
- б) б;
- в) в;
- г) г;
- д) д;
- е) е;
- ж) ж?



4.8. Какие конструкции СИД из приведенных на схеме (см. вопрос 4.7) отличаются высоким коэффициентом вывода оптического излучения:

- а) а;
- б) б;
- в) в;
- г) г;
- д) д;
- е) е;
- ж) ж?

4.9. Какие конструкции СИД из приведенных на схеме (см. вопрос 4.7) используют для пластмассовых линз, повышающих эффективность вывода оптической энергии:

- а) а;
- б) б;
- в) в;
- г) г;
- д) д;
- е) е;
- ж) ж?

4.10. Какая конструкция СИД из приведенных на схеме (см. вопрос 4.7) улучшает диаграмму направленности торцевого излучения:

- а) а;
- б) б;
- в) в;
- г) г;
- д) д;
- е) е;
- ж) ж?

ПРИБОРЫ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

5.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УСИЛЕНИЯ И ГЕНЕРАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Лазер — генератор излучения, когерентного во времени и пространстве, основанный на использовании вынужденного излучения. Вынужденное излучение возникает следующим образом. При воздействии поля внешнего фотона находящийся в возбужденном состоянии атом переходит в другое энергетическое состояние с испусканием еще одного фотона, энергия которого будет равна энергии воздействующего на атом фотона. В системе возбужденных активных атомов (так называемой лазерной активной среде) возможно усиление пропускаемого через нее излучения, если создание фотонов за счет вынужденного излучения превосходит их потери, обусловленные поглощением и рассеянием. Усиление оптического излучения, основанное на использовании вынужденного излучения, известно как лазерное усиление.

Рассмотрим возникновение лазерного усиления подробнее [22]. За счет энергии внешнего воздействия (так называемой энергии накачки) E_n часть электронов с нижних равновесных уровней E_1 переходит на более высокие уровни, а затем оказывается на уровне возбуждения E_2 , как показано на рис. 5.1.

Возвращение этих электронов с уровня E_2 на уровень E_1 сопровождается испусканием фотонов длинной волны

Возвращение этих электронов с уровня E_2 на уровень E_1 сопровождается испусканием фотонов длинной волны

$$\lambda = \frac{1,24}{E_2 - E_1}, \quad (5.1)$$

где λ выражено в микрометрах; E — в электрон-вольтах.

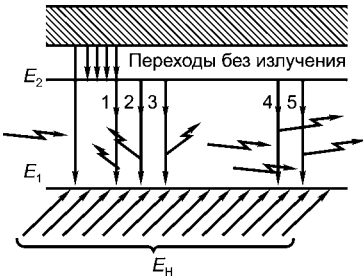


Рис. 5.1
Квантовые переходы
в лазерном веществе

Переход электронов с уровня E_2 на уровень E_1 может проходить по-разному. Возможен спонтанный переход, при котором момент испускания и направление вектора поляризации каждого фотона случайны, а результирующий поток излучения описывается лишь среднестатистическими параметрами (переходы 1...3 на рис. 5.1). Такой переход излучающих атомов из возбужденного состояния в равновесное не связан с вынуждающими фотонами и приводит к возникновению лишь некогерентного излучения.

Одновременно со спонтанными переходами есть вероятность вынужденных переходов из энергетического состояния E_2 в состояние E_1 (переходы 4, 5 на рис. 5.1). Эти переходы связаны с действием вынужденных фотонов, при этом все активные атомы излучают почти одновременно, взаимосвязанно и так, что испускаемые фотоны неотличимы от тех, которые их вызвали. Такое когерентное излучение называется вынужденным. Таким образом, вынужденное излучение — это когерентное электромагнитное излучение, возникающее при вынужденных переходах и совпадающее по направлению, частоте, фазе и поляризации с вынуждающим излучением. Определим условия усиления вынужденного излучения. Уровни энергии, используемые при усилении или генерировании лазерного излучения, называют лазерными уровнями. Соответственно вынужденный переход между лазерными уровнями энергии или зонами — это лазерный переход: он характеризуется длиной волны, определяемой по формуле (5.1). Наряду с лазерными переходами из состояния E_2 в состояние E_1 (переходы 4, 5 на рис. 5.1) происходят спонтанные переходы из состояния E_2 в состояние E_1 (переходы 1...3 на рис. 5.1), а также переходы из состояния E_1 в более высокое энергетическое состояние, приводящие к поглощению излучения (переход 6 на рис. 5.1).

Лазерное усиление возможно в том случае, если число лазерных переходов больше, чем число спонтанных переходов и переходов, связанных с поглощением вынуждающего излучения. Количество лазерных переходов за время Δt можно в первом приближении выразить как

$$N_{\text{лаз}} = B_{21}E_{\text{вын}}N_2\Delta t, \quad (5.2)$$

где B_{21} — вероятность лазерного перехода; $E_{\text{вын}}$ — энергия вынуждающего излучения; N_2 — концентрация атомов в энергетическом состоянии E_2 .

Спонтанные переходы из состояния E_2 в состояние E_1 происходят самопроизвольно (т. е. от вынуждающего излучения не зависят) и в формировании полезного лазерного излучения не уча-

ствуют. Количество спонтанных переходов можно в первом приближении оценить как

$$N_{\text{спон}} = -A_{21}N_2\Delta t, \quad (5.3)$$

где A_{21} — вероятность спонтанного перехода $E_2 \rightarrow E_1$.

Количество квантовых переходов, приводящих к поглощению вынуждающего излучения, определяется как

$$N_{\text{погл}} = -B_{12}E_{\text{вын}}N_1\Delta t, \quad (5.4)$$

где B_{12} — вероятность квантового перехода с поглощением излучения; N_1 — концентрация атомов в энергетическом состоянии E_1 .

Полагая в первом приближении равенство вероятностей $B_{21} = B_{12} = B$, получаем условие лазерного усиления в виде

$$B(N_2 - N_1)E_{\text{вын}} - A_{21}N_2 > 0. \quad (5.5)$$

При низком уровне спонтанного излучения необходимое условие лазерного усиления имеет вид $BE_{\text{вын}}(N_2 - N_1) > 0$ или $\Delta N = (N_2 - N_1) > 0$.

В равновесном состоянии системы всегда $N_2 > N_1$ и лазерное усиление возможно только в результате предварительных внешних воздействий (накачки), таких как инжекция носителей заряда, разряд в газах, оптическое или электронное возбуждение.

Таким образом, лазерное усиление объясняется тем, что вынуждающее излучение по мере распространения в лазерном веществе приобретает за счет лазерных переходов энергии больше, чем отдает вследствие поглощения.

Эффективность лазерного усиления, как видно, зависит от вероятности лазерного перехода B_{21} и тем выше, чем выше эта вероятность. Высокая вероятность лазерных переходов в полупроводниках и большая плотность энергетических состояний в зонах позволяют получить в лазерах на основе полупроводников устойчивое лазерное усиление. В твердотельных (на основе твердых диэлектриков с примесями) и газовых лазерах используются переходы в изолированных ионах, атомах или молекулах между дискретными уровнями. Усиление в них заметно ниже, чем в полупроводниковых лазерах, поэтому их размеры гораздо больше.

Для количественной оценки лазерного усиления используют населенность уровня энергии, под которой понимают число атомов, находящихся в одинаковом энергетическом состоянии, в единице объема. В условиях термодинамического равновесия населенность энергетических уровней подчиняется статистике Больцмана:

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left[-\frac{E_2 - E_1}{KT}\right], \quad (5.6)$$

где N_2 — населенность возбужденными атомами (в состоянии E_2); N_1 — населенность невозбужденными атомами (в состоянии E_1).

При этом

$$\Delta N = N_2 - N_1 = N_1 \left[\exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{KT}\right) - 1 \right]$$

отрицательна, и в веществе устанавливается нормальная населенность, когда концентрация возбужденных атомов меньше концентрации невозбужденных. При этом условии вещество находится в равновесном состоянии. Лазерное усиление невозможно.

Когда $\Delta N > 0$, что обеспечивается воздействием энергии накачки, происходит инверсия населенностей и проходящее излучение может усиливаться за счет энергии возбужденных атомов.

Состояние инверсии населенностей иногда называют состоянием с отрицательной температурой. Среда, в которой произошла инверсия населенностей, называется активной средой.

Таким образом, усиление вынужденного излучения, или лазерное усиление, требует, во-первых, инверсии населенностей ($N_2 > N_1$), во-вторых, подавления спонтанного излучения (светового шума). Минимальный уровень энергии накачки, при котором выполняется условие инверсии, называется порогом инверсии.

5.2. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ЛАЗЕРА

Структурная схема лазера может дополняться рядом элементов, обеспечивающих его работоспособность или служащих для управления лазерным излучением [23]. К таким дополнительным элементам можно отнести представленные на рис. 5.2 систему охлаждения активного элемента и систему накачки, модулятор, внешнюю оптическую систему, устройство контроля параметров излучения и др.

В каждом конкретном случае применения лазеров наличие тех или иных дополнительных устройств (или всех сразу) не является обязательным. Как будет понятно при рассмотрении типов лазеров, температура активного вещества играет большую роль в достижении инверсии населенностей.

В некоторых активных веществах инверсии можно добиться лишь при их значительном охлаждении. Система охлаждения предназначена для создания необходимой температуры активного вещества накачки.

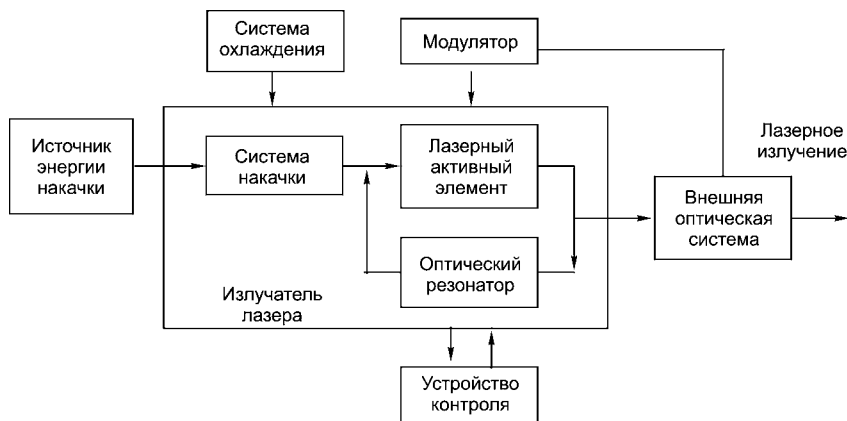


Рис. 5.2
Структурная схема лазера

Чтобы рассмотренный лазерный усилитель превратить в лазер — генератор излучения, необходимо ввести положительную обратную связь (ПОС). Параметры звена ПОС выбираются так, чтобы энергия излучения, которая передается с выхода лазерного усилителя на его вход, была достаточной для компенсации потерь в замкнутой цепи обратной связи.

В качестве звена ПОС в лазере используют оптические резонаторы: простейший резонатор состоит из двух зеркал, которые обеспечивают многократное прохождение волны излучения через активное вещество; для вывода излучения зеркала делаются частично прозрачными.

В общем случае оптический резонатор — это система отражающих, преломляющих, фокусирующих и других оптических элементов, в пространстве между которыми могут возбуждаться волны оптического диапазона.

Таким образом, выполнение условий усиления лазерного излучения при наличии ПОС через оптический резонатор дает необходимые энергетические предпосылки для самогенерации излучения. Процесс возбуждения лазерного вещества, приводящий к возникновению лазерной активной среды, называется накачкой лазера. Энергия накачки много больше энергии лазерного излучения, т. е. лазер — неэкономичный генератор. Но по качественным показателям лазерное излучение уникально. Важнейшее свойство лазерного излучения состоит в его направленности, которая связана с пространственной когерентностью: лазерное излучение распространяется в виде почти плоской волны, расходимость которой

близка к минимально предельной дифракционной расходимости. Такую пространственно-когерентную волну легко сфокусировать на площадку размером около $\lambda_{\text{лаз}}^2$ ($\lambda_{\text{лаз}}$ — длина волны лазерного излучения). Например, если лазер с длиной волны $\lambda_{\text{лаз}} = 0,69$ мкм излучает импульс энергии 1 Дж в течение 1 мс, т. е. мощностью всего около 1 кВт, то интенсивность излучения в фокусе может достигать $1 \text{ кВт} / \lambda_{\text{лаз}} \approx 10^{11} \text{ Вт/см}^2$.

Лазерное излучение высокомонохроматично, так как лазер генерирует когерентные оптические колебания на частоте максимального усиления и минимальных потерь излучения в резонаторе. Таким образом, лазер преобразует энергию низкого качества в когерентное излучение, т. е. в предельно высококачественную форму энергии, или, используя термины термодинамики, можно сказать, что энергия накачки, характеризующаяся низкой температурой и высокой энтропией, преобразуется в лазерное излучение с исключительно высокой эквивалентной температурой и предельно низкой энтропией.

Лазер является генератором электромагнитного излучения оптического диапазона, поэтому должен содержать, во-первых, элементы, обеспечивающие накачку лазера, во-вторых, лазерное вещество, в котором в процессе накачки может быть создана лазерная активная среда.

В зависимости от вида подводимой энергии накачки различают следующие виды накачки лазера:

- оптическая — возбуждение лазера оптическим излучением; она может быть ламповой (источник — лампа), диодной (источник — излучающий диод), лазерной (источник — лазер) и др.;
- электрическая — накачка электрической энергией (в частности, к этому виду накачки относится накачка полупроводниковых инжекционных лазеров);
- электронная — накачка электронным пучком;
- химическая — вызываемая химическими реакциями в лазерном веществе.

Лазерный пучок — это не просто поток энергии, как, например, пучок света, это поток энергии очень высокого качества, поток исключительно упорядоченного когерентного излучения, остронаправленного, сконцентрированного в пределах небольшого тесного угла. Но за это качество мы платим высокую цену: КПД лазеров около 10%, т. е. на каждый джоуль лазерного излучения нужно затратить примерно десять джоулей энергии накачки. Но при этом плотность энергии лазерного излучения огромна: для

мощных лазеров она, в частности, больше плотности энергии, достижимой при ядерном взрыве (порядка 10^1 Дж/см³).

Лавинообразное нарастание энергии лазерного излучения в активной среде вдоль оси резонатора описывается экспонентой с положительным показателем

$$E(x) = E(0)\exp[(L_{\text{л}} - L_{\text{п}})x], \quad (5.7)$$

где $E(x)$ — энергия излучения вдоль оси x (ox); $E(0)$ — энергия излучения при $x = 0$; $L_{\text{л}}$ — линейный коэффициент лазерного усиления (вдоль оси x), значение которого пропорционально энергии накачки; $L_{\text{п}}$ — коэффициент потерь излучения в оптическом резонаторе и активной среде.

Для простого линейного резонатора коэффициент потерь излучения имеет вид

$$L_{\text{п}} = \frac{1}{\chi_0} + \frac{1}{L_{\text{рез}}} \ln \frac{1}{\sqrt{k_1 k_2}}, \quad (5.8)$$

где $1/\chi_0$ — коэффициент поглощения излучения в активной среде; $L_{\text{рез}}$ — длина оптического резонатора; k_1, k_2 — коэффициенты отражения зеркал резонатора.

Второе слагаемое в уравнении (5.8) учитывает торцевые потери излучения, отнесенные к единице длины резонатора.

При некотором значении энергии накачки, которое называется порогом генерирования лазера, $L_{\text{л}} > L_{\text{п}}$ и начинается лавинообразное усиление энергии лазерного излучения, т. е. генерация. Таким образом, порог генерирования лазера — это энергия (или мощность), которая поступает на вход источника питания лазера и при которой коэффициент лазерного усиления на частоте генерирования $L_{\text{л}}$ равен коэффициенту потерь в оптическом резонаторе на той же частоте.

Направленность лазерного излучения характеризуется называемым расходимостью θ . Расходимость определяется отношением длины волны генерируемого излучения к линейному размеру резонатора:

$$\theta_{\text{р}} = \sqrt{\frac{\lambda}{L_{\text{рез}}}}. \quad (5.9)$$

Следует подчеркнуть, что в любом резонаторе условие резонанса выполняется не для одного, а для многих типов колебаний, различающихся по частоте и распределению электромагнитного поля в резонаторе. Такие типы колебаний называются модами. В результате спектр излучения лазера состоит из набора мод: для получения одночастотного (одномодового) режима используют перестраиваемые оптические фильтры мод.

Лазерное излучение характеризуется пространственно-временными и энергетическими параметрами.

В группе пространственно-временных параметров выделяют следующие:

- частота лазерного излучения ν_d — средняя частота (или средняя длина волны) λ_d спектра лазерного излучения;
- ширина линии лазерного излучения δ_ν — расстояние между точками контура спектральной линии лазерного излучения; соответствует половине интенсивности линии в максимуме;
- расходимость лазерного излучения θ_p — плоский или телесный угол, характеризующий угловое распределение энергии или мощности лазерного излучения;
- время готовности лазера $t_{\text{гот}}$ — время, необходимое для достижения лазером эксплуатационных (номинальных) параметров с момента включения.

К энергетическим параметрам лазера, прежде всего, относятся энергия и мощность лазерного излучения. Энергия определяет энергетические возможности лазера. Мощность характеризует интенсивность излучения энергии лазером, концентрацию энергии во времени. В применении к лазеру эту, казалось бы, банальную разницу необходимо подчеркнуть. Принято говорить: «Мощность лазера равна мощности Днепрогэса», но при этом нельзя забывать, что эта мощность действует всего 1 нс.

Концентрация энергии (мощности) в пространстве определяется плотностью энергии (мощности) лазерного излучения, т. е. энергией (мощностью) лазерного излучения, приходящейся на единицу площади сечения пучка лазерного излучения.

Эффективность лазера как преобразователя энергии накачки в энергию излучения характеризуется КПД, который равен отношению энергии или средней мощности, излучаемой лазером, к энергии или средней мощности, подводимой к лазеру. К энергетическим параметрам относится также порог генерирования лазера.

Можно выделить три основных режима работы лазеров:

- режим непрерывного генерирования лазерного излучения (непрерывный режим); лазеры, работающие в непрерывном режиме, называются непрерывными;
- режим импульсного генерирования лазерного излучения (импульсный режим), соответственно импульсные лазеры;
- режим импульсно-периодического лазерного излучения, соответственно импульсно-периодические лазеры.

При непрерывном режиме работы лазера мощность лазерного излучения на частоте генерирования не обращается в нуль в за-

данном временном интервале, значительно превышающем период колебаний, т. е. такие лазеры дают непрерывное излучение в течение длительного времени.

Импульсный режим характеризуется излучением энергий в виде импульсов. В таком импульсном лазере излучение продолжается совсем недолго, ничтожные доли секунды, и даже при небольшой излучаемой энергии процесс оказывается сильно сжатым, сконцентрированным во времени, а мощность импульса получается огромной. Современные мощные импульсные лазеры (в основном твердотельные) дают импульсы длительностью до 0,01 нс (при энергии импульса 1 Дж их мощность достигает 100 млн кВт).

В импульсно-периодическом режиме излучение формируется в виде периодических серий и импульсов — импульсных пакетов.

5.3. ЛАЗЕРЫ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Помимо полупроводниковых, известны твердотельные лазеры на основе диэлектриков. Обычно эти устройства используют внутривольную люминесценцию, а возбуждение происходит не электрическим, а оптическим способом.

Разновидности и параметры твердотельных лазеров представлены на рис. 5.3.

В 1960 г. Т. Мейман описал лазер на основе рубина. Кристалл Al_2O_3 содержит примеси хрома в виде ионов Cr^{3+} . При этом небольшая часть (0,05%) атомов алюминия замещается атомами хрома.

Уровни хрома располагаются в пределах широкой запрещенной зоны Al_2O_3 ($E_G \approx 6$ эВ). Поглощение энергии и излучение происходит внутри этих центров свечения, как показано на рис. 5.4.

Свет мощной ксеноновой лампы переводит электроны с основного уровня E_1 на возбужденные уровни E_3 и E_4 , образующие две широкие полосы. Примерно через 10 нс электроны падают на уровень E_2 , называемый метастабильным. Здесь они могут находиться примерно 10^{-3} с. Энергия $E_3 - E_2$ превращается в теплоту.

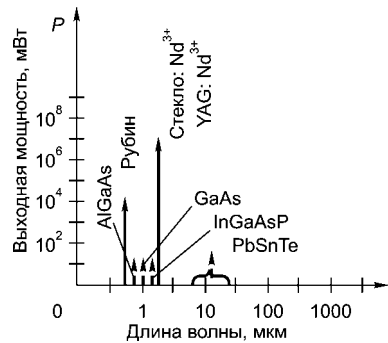


Рис. 5.3
Разновидности и параметры
твердотельных лазеров

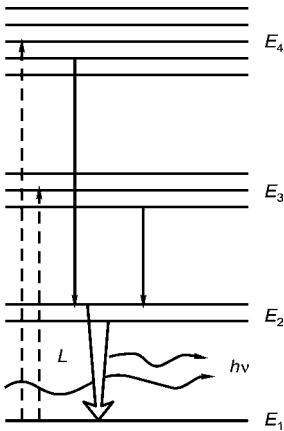


Рис. 5.4
Схема уровней
рубинового лазера

На уровне E_2 происходит накопление электронов и создается инверсная населенность по отношению к уровню E_1 .

Свет с частотой ν согласно условию $h\nu = E_2 - E_1$ вызывает вынужденные переходы с уровня E_2 на уровень E_1 . Излучение имеет длину волны, соответствующую красному свету ($\lambda = 0,69$ мкм).

Конструкция твердотельного лазера изображена на рис. 5.5.

Кристалл рубина имеет вид цилиндра диаметром около 1 см и длиной примерно 10 см. Торцы кристалла отшлифованы и выполняют функции зеркал. Усиление и излучение света происходит вдоль направлений, параллельных оси цилиндра.

Для миниатюрных оптоэлектронных устройств больше подходит лазер на основе кристаллов иттриево-алюминиевого граната YAG. В эти кристаллы добавляются примеси неодима ($Y_3Al_5O_{12}:Nd^{3+}$). Неодим замещает в решетке примерно 1% атомов иттрия. Лазер излучает инфракрасный свет с длиной волны 1,06 мкм. Для возбуждения можно использовать инфракрасные светодиоды из GaAlAs ($\lambda \approx 0,81$ мкм), их длина волны соответствует полосе поглощения неодима. Благодаря высокой концентрации центров свечения лазер с неодимом имеет высокую мощность излучения (до 10 Вт). Лазер маленького размера (длина резонатора около 1 см). КПД YAG-лазеров составляет 1...20%.

При правильном выборе спектра элемента накачки достигается использование оптической энергии 50%.

Основной режим работы твердотельных лазеров — импульсный. Для них характерны большая мощность одиночного импульса, невысокая когерентность излучения. Многие из них нуждаются в охлаждении активного элемента и элемента накачки.

Улучшение спектральных и пространственных характеристик излучения (когерентности, монохроматичности, направленности) достигается за счет перехода на одномодовый режим генерации и уменьшения энергетического КПД.

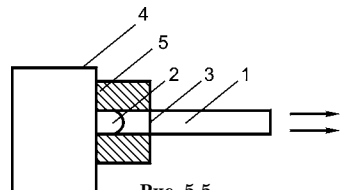


Рис. 5.5
Конструкция
твердотельного лазера:

- 1 — стержень активного вещества;
- 2 — инфракрасный светодиод; 3 — оптическая среда; 4 — теплоотвод;
- 5 — фиксирующая оправка.

5.4. ЖИДКОСТНЫЕ ЛАЗЕРЫ

Интерес к жидкостным лазерам обусловлен легкостью получения активной среды, возможностью прокачки жидкости и в связи с этим легкостью создания системы охлаждения, возможностью плавной перестройки частоты и т. п.

Разновидности и параметры жидкостных лазеров представлены на рис. 5.6.

Широкое применение находят лазеры на органических красителях (Dye-Lasers). Различные красители допускают перестройку длины волны генерации в диапазоне нескольких десятков нанометров при высокой монохроматичности. Лазеры на органических красителях могут работать в непрерывном, импульсном и импульсно-периодическом режимах. Энергия одного импульса может достигать сотен джоулей, а мощность непрерывной генерации — десятков ватт при КПД несколько десятков процентов в случае лазерной накачки. В режиме синхронизации мод могут быть получены лазерные импульсы длительностью несколько десятых долей пикосекунды.

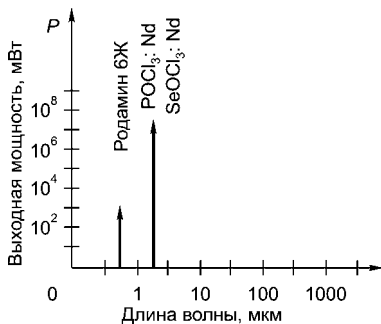


Рис. 5.6
Разновидности и параметры жидкокристаллических лазеров

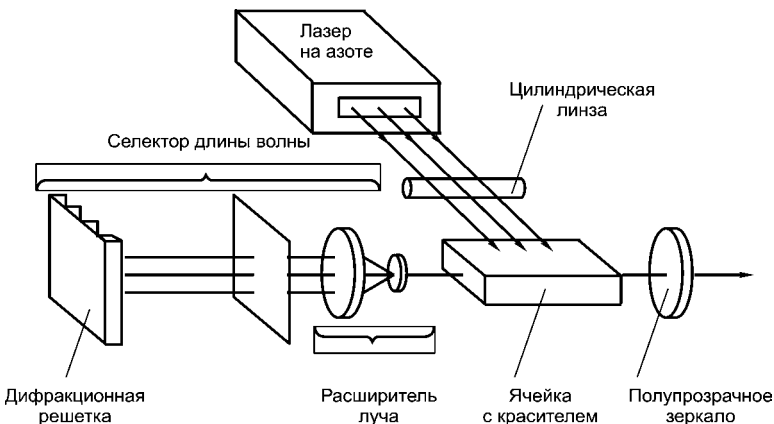


Рис. 5.7
Устройство жидкостного лазера

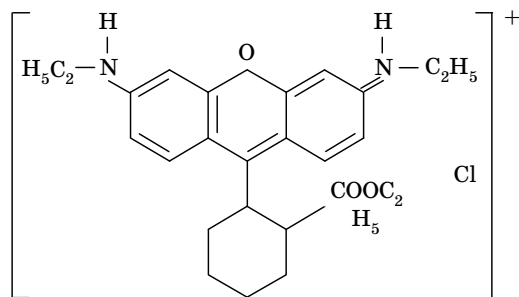


Рис. 5.8

Структурная формула органического красителя родамина 6G

Активным веществом лазеров на красителях служат растворы молекул органических красителей в органических растворителях или воде. Красителями являются сложные органические соединения с разветвленной системой сопряженных химических связей. Эти соединения обладают выраженной окраской, что вызвано наличием сильных полос поглощения в видимой области спектра. Структура молекулы красителя сложна. Она содержит бензольные (C_6H_6), передоновые (C_6H_5N), азотные ($C_4H_4N_2$) и другие кольца. В лазерной технике широко применяются красители на основе родамина 6G.

Структурная формула органического красителя родамина 6G приведена на рис. 5.8. Такая макромолекула обладает богатым набором разрешенных значений энергии электронных, колебательных и вращательных состояний. Энергетические расстояния между этими состояниями составляют $1...3$, $0,1...0,01$ и $10^{-3}...10^{-4}$ эВ соответственно. Колебательные и вращательные состояния перекрываются, образуя серии разрешенных энергетических полос, соответствующих определенным электронным состояниям.

Эти состояния можно подразделить на две группы: синглетные (S) и триплетные (T), как показано на рис. 5.9. К первой группе относятся состояния с антипараллельной ориентацией спинов ($S = 0$), а ко второй — с параллельной ориентацией ($S = 1$).

Каждое электронное состояние сопровождается серией колебательных уровней (на рис. 5.9 выделенных жирными линиями) и серией вращательных уровней. Согласно правилам отбора по спинам оптические переходы разрешены между состояниями с одинаковой мультиплетностью ($\Delta S = 0$), т. е. переходы $S-S$ (синглет-синглетные) и $T-T$ (триплет-триплетные). Они имеют наибольшую вероятность.

При нормальных условиях молекулы находятся в основном состоянии S_0 . В результате поглощения оптического излучения молекула переходит из основного состояния S_0 на один из колеба-

тельно-вращательных уровней S_1 . Спектр поглощения, определяемый такими переходами, представляет широкую полосу. Спектральное положение максимума полосы поглощения определяет цвет красителя и для разных веществ изменяется примерно от 0,3 до 1 мкм. Ширина полосы поглощения также различна для разных красителей и примерно равна 0,2 эВ.

Попадая вследствие оптического перехода $S_0 \rightarrow S_1$ в одно из возбужденных состояний полосы S_1 , молекула в результате релаксационных безызлучательных процессов по колебательно-вращательным подуровням внутри состояния S_1 переходит на нижние уровни группы S_1 . Этот процесс термализации происходит очень быстро, примерно за 1 пс. Термализованные носители из состояния S_1 излучательно или безызлучательно переходят в основное состояние S_0 . У небольшого количества известных красителей излучательные процессы преобладают над безызлучательными. Излучательное время жизни для переходов $S_1 \rightarrow S_0$ мало и составляет примерно 1 нс.

При интенсивной оптической накачке между нижними состояниями S_1 полосы и верхними S_0 может быть достигнута инверсия населенностей. Генерация осуществляется между энергетическими состояниями полос S_1 и S_0 по четырехуровневой схеме. Триpletные состояния T_1 и T_2 не участвуют в процессе лазерной генерации, а, напротив, препятствуют ей.

Наибольший интерес представляет лазер на органическом красителе, используемый как генератор с перестраиваемой длиной волны. Для осуществления этой возможности применяют дисперсионный резонатор, собственную частоту которого можно перестраивать. Идеальный вариант — одномодовый одночастотный резонатор.

Вероятность оптических переходов $S_0 \rightarrow S_1$ с красителем весьма высока, показатели поглощения и усиления для этих веществ

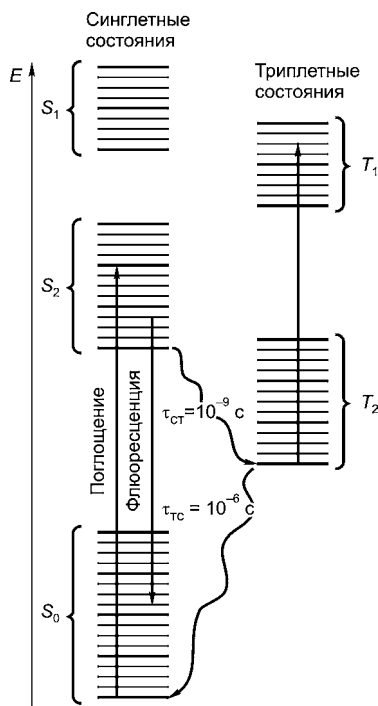


Рис. 5.9
Электронные состояния жидкостного лазера:

$\tau_{ст}$ — постоянная синглет-триплетной конверсии; $\tau_{тс}$ — постоянная триплет-синглетного перехода.

могут быть очень велики. Они примерно на два порядка превышают показатель усиления малого сигнала для твердотельных лазеров на гранате и рубине. Лазеры на красителях, обладая высоким коэффициентом усиления, требуют небольшого объема активной среды — 1 мм^3 .

Поглощение интенсивного излучения накачки и последующий нагрев малого объема красителя приводят к необходимости быстрой непрерывной замены вещества в рабочем объеме. В противном случае неизбежно термическое разложение красителя, а также накопление молекул в триплетном состоянии T_1 и срыв генерации.

В сочетании с набором красителей жидкостные лазеры перекрывают диапазон длин волн от $0,34$ до $1,17 \text{ мкм}$. КПД современных лазеров на органических красителях достигает 30% при накачке лазерным излучением и 1% — при накачке импульсными лампами.

При непрерывном режиме выходная мощность рассматриваемых лазеров достигает нескольких ватт, при импульсных режимах — от 10 Вт до нескольких мегаватт; если длительность импульса 20 нс и частота повторения до 200 Гц , расходимость лазерного пучка составляет $2 \dots 2,5 \text{ мрад}$.

В режиме синхронизации мод возможна генерация очень коротких световых импульсов — $3 \cdot 10^{-14} \text{ с}$.

5.5. ГАЗОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

Газовый лазер — общее название лазеров с газообразной лазерной средой. Существует множество видов таких лазеров. Они очень удобны в работе, поэтому большинство из них коммерческие.

Разновидности и параметры газовых лазеров иллюстрирует рис. 5.10.

Лазеры на благородных газах генерируют с помощью энергетических уровней газов, подобных гелию. В гелий-неоновом лазере, изображенном на рис. 5.11, для генерации увеличивают энергию части атомов неона, возбуждая газовую смесь тлеющим разрядом. Гелий добавлен в смесь для облегчения возбуждения. Атомы неона имеют более 120 спектральных линий — от $0,594 \text{ мкм}$ в видимой области спектра до 133 мкм в инфракрасной. Коммерческие лазеры дают спектральную линию $0,6328 \text{ мкм}$ и выходную мощность от одного до нескольких десятков милливатт. Они широко распространены.

Ионные лазеры генерируют возбуждением рабочего тела до уровня ионизации. *Ионные лазеры на инертных газах* (аргоне,

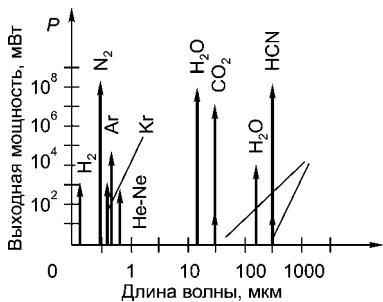


Рис. 5.10
Разновидности и параметры газовой лазеры

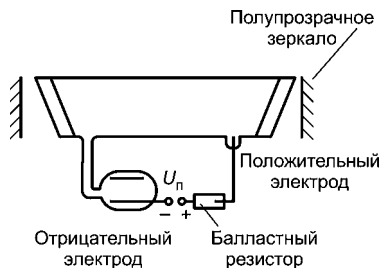


Рис. 5.11
Гелий-неоновый лазер

криптоне или ксеноне) могут давать непрерывное излучение в видимом диапазоне с высокой выходной мощностью. Обычно у коммерческих лазеры на аргоне две мощные линии — 0,4880 мкм (синяя) и 0,5145 мкм (зеленая). Мощность каждой из них — несколько ватт. Для возбуждения применяют дуговой разряд, имеющий высокую плотность и малое напряжение. У таких лазеры КПД мал, примерно 0,1%, а источник питания больших размеров. Лазерная трубка должна выдерживать разряды с большой силой тока, что увеличивает ее цену.

Лазеры на металлических ионах работают за счет ионного возбуждения, возникающего в положительной колонне разряда смеси газа — гелия или неона — с парами металла. Используют такие металлы, как кадмий, цинк, селен, теллур, ртуть. В частности, коммерческий гелий-кадмиевый лазер имеет спектральные линии 0,3250 мкм (ультрафиолетовая) и 0,4416 мкм (зеленая).

Молекулярные лазеры работают за счет вращательной и колебательной энергии молекул. Лазер на углекислом газе излучает в инфракрасной области — 10,6 и 9,6 мкм. У него высокий КПД, несколько десятков процентов, и высокая выходная мощность. Производят различные модификации таких лазеры. Для их возбуждения используют химические реакции или электрический разряд. Чтобы получить высокую выходную мощность, поток газа разгоняют до высоких скоростей, или производят поперечное возбуждение, или осуществляют разряд, управляемый электронными пучками. Лазер на угарном газе излучает на линии 5 мкм и имеет высокий КПД — более 40%. Импульсный лазер на азоте дает излучение в ультрафиолетовой области (0,3371 мкм) мощностью от нескольких сотен киловатт до единиц мегаватт.

К газовой лазеры относятся также и эксимерные лазеры.

5.6. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ИНЖЕКЦИОННОГО МОНОЛАЗЕРА

В полупроводниковых лазерах активным элементом являются кристаллы полупроводника, образующие резонатор и возбуждаемые либо инжекцией тока через p - n -переход, либо пучком электронов. Соответственно различают инжекционные лазеры и лазеры с электронным возбуждением.

В полупроводниковых монолазерах индуцированные переходы происходят между занятыми электронными состояниями в зоне проводимости и вакантными состояниями в валентной зоне области p - n -перехода. Одно из главных отличий полупроводникового лазера от атомных молекулярных состоит в том, что эти переходы происходят не между двумя узкими энергетическими уровнями, а между состояниями, распределенными по энергии.

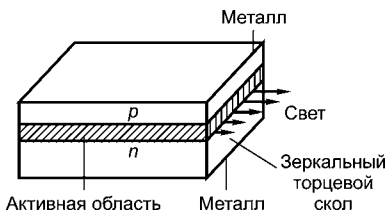


Рис. 5.12
Структура инжекционного монолазера

Первые инжекционные лазеры были созданы из арсенида галлия в форме параллелепипеда, с планарным диффузионным p - n -переходом, расположенным перпендикулярно двум противоположным торцам полупроводникового кристалла, как показано на рис. 5.12.

Поскольку показатель преломления полупроводникового кристалла выше показателя преломления воздуха, его сколотые торцевые поверхности действуют как зеркала, так что генерация излучения и его усиление происходят внутри резонатора Фабри–Перо. При определенном пороговом уровне усиление превышает потери в объеме и на зеркалах для некоторой моды и лазер начинает генерировать.

При включении инжекционного лазера в прямом направлении и при малом токе накачки, как и в СИД, возникает спонтанное излучение. Из множества спонтанных фотонов лишь некоторые отразятся от зеркала и пройдут в плоскости активного слоя. С увеличением тока накачки растет число электронов на верхнем энергетическом уровне в зоне проводимости (в этом случае говорят, что имеет место инверсная населенность уровня). При этом спонтанный фотон вызывает переход электрона из зоны проводимости в валентную зону, где происходит рекомбинация и появляется стимулированный фотон (СТФ).

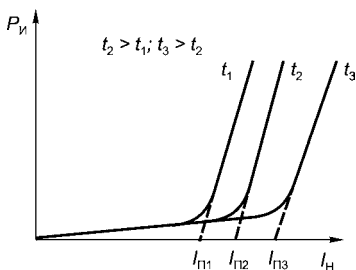


Рис. 5.13
Ватт-амперная характеристика
инжекционного лазера

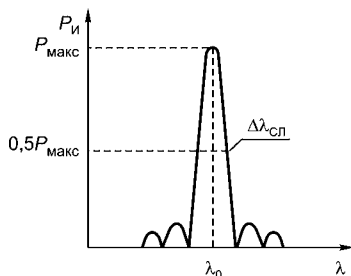


Рис. 5.14
Спектральная характеристика
инжекционного лазера

Энергия СТФ, направление его движения, фаза в точности совпадают с соответствующими параметрами спонтанного фотона (СПФ). Таким образом, вместо одного фотона появляются два. Когда ток накачки достигает значения, называемого пороговым, этот процесс нарастает лавинообразно: два фотона порождают четыре, четыре — шестнадцать и т. д. В результате мощность излучения резко возрастает; ватт-амперная характеристика инжекционного лазера приведена на рис. 5.13.

Часть мощности излучения выводится наружу через оба зеркала (один из выходов инжекционного лазера может быть использован для контроля излучаемой мощности с помощью фотодиода). Заметим, что величина порогового тока зависит от температуры окружающей среды. При увеличении температуры мощность излучения на заданной длине волны резко падает, как видно на рис. 5.13.

Рассмотрим теперь особенности спектральной характеристики инжекционного лазера. При малых токах накачки имеет место спонтанное излучение, поэтому спектральная характеристика инжекционного лазера повторяет аналогичную характеристику, число мод в нем резко уменьшается и характеристика имеет вид, представленный на рис. 5.14. Ширина спектральной линии этой характеристики много меньше ширины спектральной линии СИД. По этой причине при организации связи по одномодовым волокнам в качестве источника излучения применяют только инжекционные лазеры, так как при этом резко уменьшается хроматическая дисперсия в ОВ и увеличивается дальность связи.

Полупроводниковые лазеры работают в широком спектральном диапазоне — от 0,33 до 31 мкм. Оптимальные параметры достигаются при охлаждении. Инжекционные лазеры работают в импульсном и непрерывном режимах, а лазеры с электронным возбуждением — в импульсном.

Мощность излучения полупроводникового лазера зависит от величины тока, протекающего через $p-n$ -переход. Пороговая плотность тока накачки для серийно выпускаемых лазеров на GaAs составляет $2 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^4$ А/см². При этом КПД составляет около 1%. Коэффициент полезного действия полупроводниковых охлаждаемых лазеров в импульсном режиме достигает 50...80%, однако необходимость охлаждать кристалл до 77 К и даже до 4 К заметно усложняет конструкцию лазера и сокращает срок его службы (до нескольких, иногда десятков часов).

В полупроводниковых лазерах с электронным возбуждением за счет использования бóльшей, чем в инжекционных лазерах, части активного вещества можно достичь бóльших импульсных мощностей от небольших объемов. Такие лазеры работают в основном с охлаждением, хотя есть излучатели, работающие и при комнатной температуре. Конструктивно они представляют собой электровакуумный прибор, внутри которого устанавливается активный элемент — мишень на хладопроводе, а управление электронным пучком, бомбардирующим мишень, производится с помощью электромагнитной и электростатической систем. Такие лазеры на GaAs с $\lambda = 0,49$ мкм дают импульсы мощностью 200 кВт и длительностью 3 нс при комнатной температуре и имеют КПД около 1%.

В переносных оптических системах находят применение малогабаритные полупроводниковые лазеры. Некоторые инжекционные лазеры имеют длину около 1 мм при толщине перехода 3...5 мкм, их выходная мощность в импульсном режиме достигает 10...20 Вт, а КПД — 50%. Они позволяют модулировать излучение в широком диапазоне изменением тока накачки. К недостаткам таких лазеров следует отнести большой угол расходимости пучка, импульсный режим работы и широкую спектральную полосу генерируемого излучения.

5.7. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ С ГЕТЕРОСТРУКТУРАМИ

Оптимальной совокупностью технико-экономических показателей обладают полупроводниковые лазеры, использующие гетероструктуры.

Энергетические диаграммы гетероструктур характеризуются различными потенциальными барьерами для встречных потоков и электронов, что вызывает одностороннюю инжекцию носителей

заряда из широкозонного эмиттера в узкозонную базу. При этом концентрация инжектированных в базу носителей может на несколько порядков превышать равновесное значение в эмиттерной области. В гетероструктуре оптические свойства слоев эмиттера и базы отличаются, так как запрещенная зона эмиттера значительно шире запрещенной зоны базы, а показатель преломления n зависит от ширины запрещенной зоны. В гетеролазере нет необходимости легировать полупроводник до вырождения, так как условие инверсии населенностей энергетических уровней выполняется за счет разницы ширины запрещенных зон. Высокая концентрация носителей в средней области структуры достигается в результате повышения уровня инжекции. Снижение уровня легирования способствует уменьшению потерь на безызлучательную рекомбинацию и повышению внутренней квантовой эффективности.

Первые инжекционные лазеры имели плотность порогового тока до $1 \cdot 10^5$ А/см² при 300 К, поэтому не могли работать в непрерывном режиме при комнатной температуре.

Избежать этого недостатка удастся при использовании гетероструктур. В них за активной областью $p-n$ -перехода следует полупроводниковый слой с большей шириной запрещенной зоны и меньшим показателем преломления для лучшего пространственного ограничения носителей и оптического излучения. Это способствует уменьшению порогового тока лазеров с одиночной гетероструктурой до $1 \cdot 10^4$ А/см² при комнатной температуре. Более высокими показателями характеризуются лазеры с двойной гетероструктурой (ДГС). Разработан ДГС-лазер, который при комнатной температуре имеет плотность порогового тока всего 1600 А/см².

Лазер выполнен на основе тройного полупроводникового соединения GaAlAs. Активный слой из GaAs p -типа с узкой запрещенной зоной имеет толщину значительно меньше 1 мкм и ограничен с обеих сторон слоями Ga_xAl_{1-x}As с широкой запрещенной зоной. Пороговый ток существенно уменьшен за счет полосковой геометрии.

Полоску вытравливают в тонком слое SiO₂, осажденном на полупроводниковый кристалл, и вскрывают окно под металлический контакт. Благодаря этому накачке подвергается только часть активной области под полоской. Применяв лазер длиной 400 мкм с полоской шириной 13 мкм, получают пороговый ток 300 мА при комнатной температуре. Более того, лазеры с полосковой геометрией сделали возможной работу на одной поперечной моде и на одной частоте, тогда как первые инжекционные лазеры характеризовались многомодовым спектром.

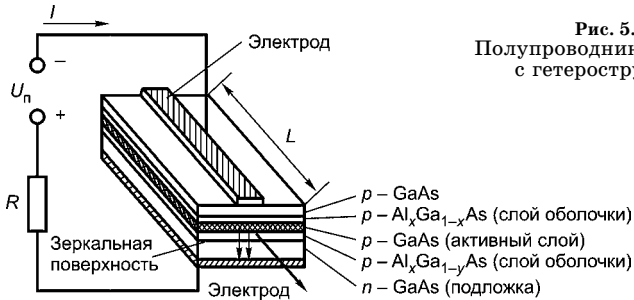


Рис. 5.15
Полупроводниковый лазер
с гетероструктурой

В простейшем инжекционном лазере толщина активного слоя соизмерима с длиной волны. Поэтому возникает дифракция света, в результате которой фотоны растекаются в прилегающие к активному слою области. Это явление резко уменьшает мощность, расширяет спектр и ухудшает направленность излучения. Лазер с гетероструктурой, изображенный на рис. 5.15, кроме активного слоя, например GaAs, содержит слои, скажем, AlGaAs, энергия запрещенной зоны которых выше энергии запрещенной зоны активного слоя.

В результате стимулированные фотоны удерживаются в активной области и мощность излучения при том же токе накачки, что и в простейшем лазере, увеличивается. Кроме того, показатель преломления активной области выше аналогичных показателей соседних гетерослоев, поэтому при возникновении излучения в активной области возникает полное внутреннее отражение от ее границ, вследствие чего возрастают мощность и уменьшается угол излучения. Как видно из рис. 5.15, верхний электрод полупроводникового лазера (ППЛ) выполнен в виде узкой полоски. Это превращает активный слой в волновод, на выходе которого имеет место мощное однородное и остронаправленное излучение. Спектр такого излучения очень узкий и содержит в основном одну моду, что позволяет применять этот лазер для возбуждения одномодовых ОБ.

Односторонняя инжекция, характерная для гетеропереходов, приводит к тому, что все избыточные носители зарядов сосредотачиваются в активной средней области, их проникновение в эмиттер ничтожно мало. Положительную роль играет также волновой эффект, который способствует концентрированию волны излучения внутри оптически более плотного среднего слоя структуры. В конечном итоге гетеролазеры по сравнению с гомогенными имеют в десятки раз меньшую пороговую плотность тока и больший КПД, что, в свою очередь, обеспечивает непрерывный режим генерации при комнатной температуре.

На рис. 5.16 представлено устройство лазера с распределенной обратной связью (РОС). Распределение слоев в лазере с РОС показано на рис. 5.17. Как видно, в лазере используется волновод с выступами и впадинами в виде дифракционной решетки.

Возможности лазерной генерации в волноводе с периодической структурой можно пояснить, рассматривая рис. 5.18. Период решетки A , указанный на рис. 5.18а, должен удовлетворять условиям Брэгга. Должно выполняться соотношение

$$A = \frac{N\lambda_0}{2n_{\text{эф}}},$$

где λ_0 — длина световой волны в вакууме; $n_{\text{эф}}$ — эффективный показатель преломления волновода; N — порядок дифракции.

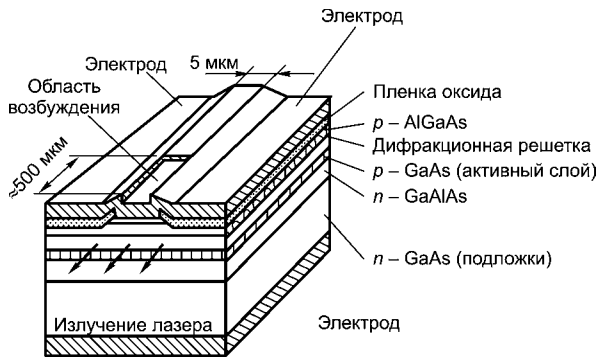


Рис. 5.16
Полупроводниковый лазер с распределенной обратной связью

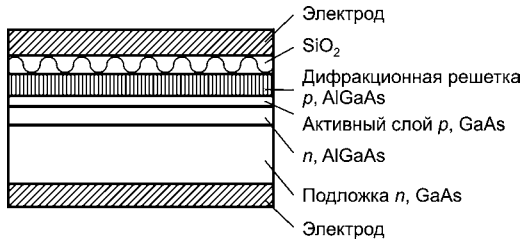
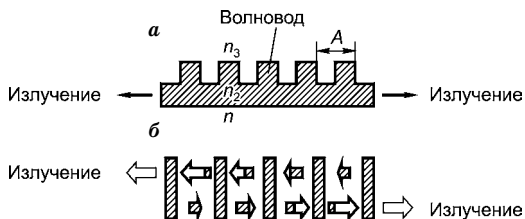


Рис. 5.17
Распределение слоев в лазере с РОС

Рис. 5.18
Лазерная генерация в волноводе с периодической структурой:

a — структура волновода в лазере с РОС;
б — схема генерации лазера с РОС.



Световая волна, проходящая по такому волноводу, рассеивается всеми точками дифракционной решетки. При $N = 1$ (первый порядок) рассеяние происходит в горизонтальном направлении распространения света (слева направо и наоборот), а при $N = 2$ (второй порядок) — также и в перпендикулярном направлении. Во многих точках свет понемногу рассеивается в противоположных направлениях, но в целом получается рассеяние большой интенсивности. Схема на рис. 5.18б генерирует лазерные колебания с помощью распределенной обратной связи.

Материалы для лазеров с распределенной обратной связью: $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}$, $\text{As}_y\text{P}_{1-y}$, $\text{PbSn}_x\text{Te}_{1-x}$ и им подобные. Структуру, дающую распределенную обратную связь, выращивают непосредственно на активном слое способом эпитаксии в жидком газе. На эпитаксильную пленку наносят фоторезист, а в качестве фотошаблона решетки используют картину интерференции лазерного света. Травлением делают выступы и после этого изготавливают лазерную структуру, нанося сверху необходимые слои способом эпитаксии в жидкой фазе. Лазер со структурой, показанной на рис. 5.16, дает непрерывное излучение. В противоположность лазеру с дискретной обратной связью, часто дающему мультимодовое излучение, лазер с распределенной обратной связью дает одномодовое излучение, причем с более высокой селективностью длины волны. Кроме того, при изменении силы тока длина волны почти не меняется. В лазере с дискретной обратной связью длина волны определяется шириной энергетической щели, а следовательно, сильно зависит от температуры. В лазере с распределенной обратной связью длина волны определяется показателем преломления и от температуры практически не зависит.

Одно из применений распределенной обратной связи — это лазер, в котором такая система расположена по обе стороны активного слоя. Это лазер с распределенным брэгговским отражением.

Из-за того, что в лазерах с распределенной обратной связью и распределенным брэгговским отражением не используются для обратной связи плоскости спайности (эту функцию выполняет сам волновод), появляется возможность создания на одной подложке и волновода, и лазера. Такие структуры можно использовать в качестве источника света в оптических интегральных схемах.

В заключение перечислим особенности гетеролазеров:

- эффект односторонней инжекции (из широкозонного в узкозонный полупроводник). Токи $I_n \gg I_p$, так как $(\Delta E_{\text{П}} + \Delta E_{\text{В}})/kT \gg 1$;
- эффект суперинжекции Алферова (1966) — обеспечение концентрации инжектированных носителей в узкозонном ПП,

намного превосходящей соответствующую концентрацию в широкозонном ПП (узкозонный полупроводник — потенциальная яма);

- эффект оптического ограничения (n -узкозонного полупроводника больше, чем n -широкозонного);
- эффект электронного ограничения: используют дополнительные гетеропереходы, препятствующие растеканию носителей за пределы активной области;
- эффект широкозонного окна: излучение свободно выводится из лазера через широкозонное окно, так как не может быть поглощено в широкозонном ПП.

5.8. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ И ЛАЗЕРЫ

5.8.1. ВОЛОКОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Использование для передачи информации новых спектральных диапазонов позволяет повысить полную суммарную скорость передачи сигналов по линии связи со спектральным мультиплексированием (WDM). Однако при передаче сигналов на расстояние, характерное для глобальных (WAN) и магистральных сетей, необходимы оптические усилители. Широкое применение находят эрбиевые усилители (EDFA), позволяющие более полно использовать спектральные диапазоны C и L .

Функциональная схема волоконно-оптического усилителя приведена на рис. 5.19.

Основу усилителя составляет активный волоконный световод (ABC). Для длины волны $1,55 \text{ мкм}$ в роли примеси используется эрбий (Er), длина световода составляет десятки микрометров.

Для того чтобы волокно приобрело свойство усиливающей среды, используется накачка с помощью лазера Л. Усиливаемый сигнал с длиной волны λ_c и излучение лазера с длиной волны накачки λ_n объединяются в мультиплексоре МП и направляются в оптическое волокно.

В оптическом волокне происходит увеличение мощности сигнала. Основная часть ($> 90\%$) усиленного сигнала проходит через фильтр Ф на выход. Фильтр

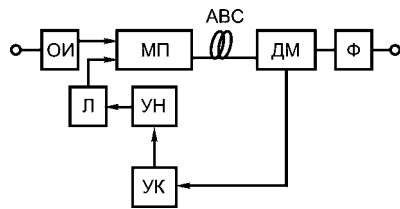


Рис. 5.19
Схема волоконно-оптического усилителя

выделяет полезный усиленный сигнал и не пропускает на выход сигнал накачки и шумы вне полосы частот сигнала.

На входе устройства используется оптический изолятор ОИ, предотвращающий проникновение отраженных в усилителе сигналов во входящую оптическую линию.

Узел контроля УК управляет током накачки УН. Стабильность режима лазера обеспечивается действием обратной связи и зависит от коэффициента передачи делителя мощности ДМ.

Принцип действия оптического усилителя основан на эффекте возбуждения вследствие лазерной накачки атомов редкоземельных материалов, помещенных в сердцевину одномодового стекловолокна. Редкоземельные материалы выбираются с таким расчетом, чтобы имелись зоны поглощения внешней энергии и создавалась инверсная населенность, которая приводит к спонтанной, а затем и к вынужденной люминесценции.

5.8.2. ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ

Волоконно-оптические лазеры обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными:

- отличаются высокой стабильностью и надежностью;
- обеспечивают высокое качество выходного излучения;
- обеспечивают эффективный теплоотвод;
- имеют небольшие габариты и массу.

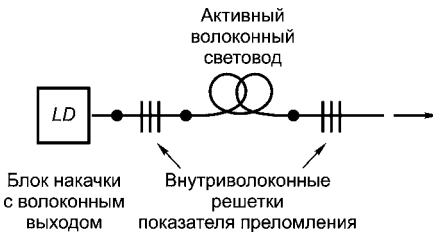


Рис. 5.20
Конструкция волоконного лазера

Конструкция волоконного лазера на основе активного волоконного световода представлена на рис. 5.20.

Она включает узел накачки с волоконным выходом LD (обычно это мощный лазер); активный одномодовый волоконный световод с диаметром сердцевины $d_c = 10...30$ мкм; внутриволоконные решетки

показателя преломления, выполняющие функции зеркал лазера.

Благодаря полностью волоконной конструкции такие лазеры отличаются низкими оптическими потерями. Типичная длина активного волоконного световода составляет 5...50 м. У левой входной брэгговской решетки коэффициент отражения на длине волны генерации близок к 100%, а коэффициент отражения правой входной и выходной решеток существенно ниже (примерно

5%) и определяется величиной усиления и оптическими потерями излучения в активном волноводе. Брэгговские решетки могут быть созданы как непосредственно в активном световоде, так и в отрезке фоточувствительного световода, который сваривается с активным.

При изготовлении решеток показателя преломления используется явление фоточувствительности. Это явление заключается в изменении показателя преломления сердцевины световода под действием УФ-излучения определенных длин волн. Как правило, волоконные брэгговские решетки показателя преломления представляют собой отрезок волоконного световода с модуляцией показателя преломления в световедущей области с периодом порядка половины длины распространяющегося излучения.

В качестве активных легирующих добавок волоконных световодов используют ионы лантаноидов или редкоземельных элементов. Для создания эффективных волоконных лазеров средней и высокой мощности особый интерес представляет активное волокно, легированное ионами Yb^{3+} .

В схеме уровней Yb^{3+} , кроме основного уровня $E_{7/2}$, существует единственный возбужденный уровень $E_{5/2}$. Отсутствие других энергетических уровней вплоть до ультрафиолетового диапазона означает, что в данной системе в области длин волн, близких к длине волны генерации, исключено поглощение из возбужденного состояния и различные кооперативные явления. Лазеры с активным волокном, легированным ионами Yb^{3+} , обладают высоким КПД и характеризуются высокой концентрацией активной примеси.

Использование световодов с высокой концентрацией активной примеси позволяет уменьшить длину активной среды лазера, а значит, и уменьшить отрицательное влияние различных нелинейных эффектов и дополнительных оптических потерь на эффективность лазера.

5.8.3. ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ НА ОСНОВЕ ВЫНУЖДЕННОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ

Волоконные лазеры на основе вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР-рамановские лазеры) позволяют эффективно преобразовывать лазерное излучение накачки в излучение на более низких частотах на основе явления вынужденного комбинационного рассеивания света в волоконном световоде. Таким образом, создаются лазеры с различными новыми диапазонами волн в широком диапазоне частот.

Современные волоконные световоды представляют собой уникальную среду для реализации ВКР-лазеров: низкие оптические потери позволяют использовать длинные световоды, применение различных стекол дает возможность выбора величины частотного сдвига стоксова излучения.

Первые ВКР-лазеры имели гибридные конструкции, включавшие как волоконные, так и объемные элементы. Необходимость согласования элементов и юстировки лазеров затрудняет работу с ними, снижая эффективность и ограничивая область их применения.

Использование брэгговских решеток для создания обратной связи существенно упростило конструкцию ВКР-лазеров, повысило их эффективность и обеспечило создание многокаскадных лазеров-преобразователей.

Схема ВКР-лазера исключительно волоконной конструкции приведена на рис. 5.21.

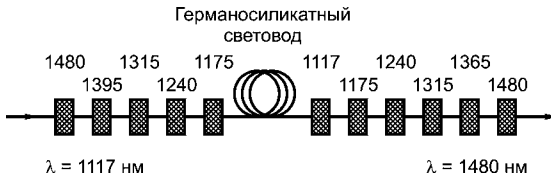


Рис. 5.21
Схема ВКР-лазера

Как видно на схеме, ВКР-лазер состоит из волоконного световода и набора брэгговских решеток с резонансными длинами волн, соответствующими стоксовым сдвигам в материале световода. При этом брэгговские решетки, соответствующие промежуточным длинам волн, имеют коэффициент отражения, близкий к 100%. Для получения излучения с длиной волны 1,48 мкм при использовании германоцирилатного световода необходимо пять каскадов преобразования.

Упростить конструкцию можно, если использовать в качестве активной среды ВКР-лазера световод с сердцевинной, легированной оксидом фосфора. В спектре ВКР-усиления такого световода есть узкая полоса с центральной длиной волны, сдвинутой на 1330 см^{-1} , и этот сдвиг в три раза больше, чем сдвиг в максимуме усиления германоцирилатного световода.

Был предложен ВКР-лазер, работающий на двух длинах волн [54], его схема приведена на рис. 5.22.

Резонатор этого лазера образован лишь одной парой решеток, что позволяет предполагать взаимную когерентность излучения

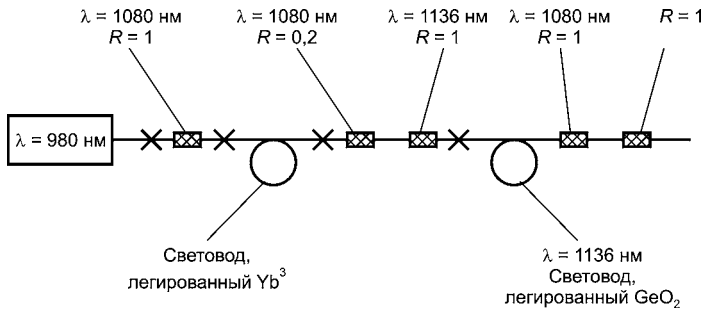


Рис. 5.22
Схема двухволнового ВКР-лазера

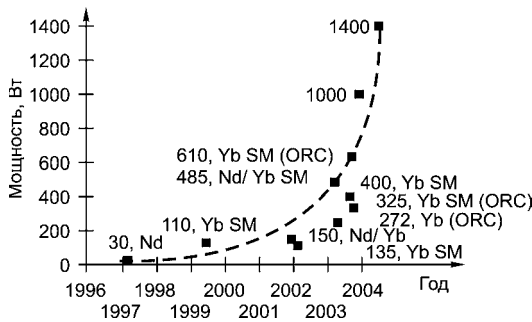


Рис. 5.23
Динамика развития волоконных лазеров

на разных длинах волн. Полупроводниковый лазер с длиной волны около 980 нм и максимальной мощностью 4 Вт используется для накачки волоконного лазера на основе световода с двойной оболочкой, легированного ионами Yb^{3+} . Резонатор Yb^{3+} -лазера сформирован двумя брэгговскими решетками — входной с коэффициентом отражения $K_{\text{вх}} = 1$ и выходной с $K_{\text{вых}} = 0,2$.

Иттербиевый лазер имеет длину волны излучения 1080 нм и максимальную мощность 2,5 Вт. Излучение вводится в ВКР-лазер на основе волоконного световода с сердцевинной из германосиликатного стекла, молярная концентрация двуокиси германия в сердцевине составляет около 4%.

Волоконные ВКР-лазеры находят широкое применение в качестве источников накачки рамановских волоконных усилителей и оптимизации их шумовых характеристик.

Динамика развития волоконных лазеров представлена на рис. 5.23. Спектральные диапазоны работы волоконных лазеров приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Диапазоны работы волоконных лазеров [38]

Тип лазера	Диапазон длин волн, мкм
Лазеры на основе активных волоконных световодов:	
Yb (Nd)	1,0...1,1
Er/Yb	1,5...1,6
Tm, Ho	1,9...2,1
ВКР-лазеры	1,1...2,2

5.9. СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ ДИОДЫ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Перспективным источником света для волоконно-оптических систем является светоизлучающий диод. Генерирование светового излучения в нем происходит так же, как и в лазерном диоде (ЛД), но из-за отсутствия оптической обратной связи СИД является некогерентным источником. Первый СИД из арсенида галия, пригодный для оптической связи, был изготовлен в 1962 г. Ширина спектра излучения СИД из арсенида галия обычно составляет 3000 нм, т. е. по крайней мере в 20 раз шире спектра лазеров. Светоизлучающий диод излучает на многих пространственных модах. Поскольку число мод, которое может в нем распространяться, не ограничено, то адекватную эффективность ввода излучения в светодиод можно получить только при использовании многомодового светодиода. Светоизлучающие диоды, предназначенные для обеспечения волоконно-оптической связи, должны иметь малую светоизлучающую поверхность и обладать большой энергетической яркостью.

Примерами таких диодов является диод Барраса и диод с краевым излучением. Диод Барраса излучает свет из небольшого круглого пятна диаметром приблизительно 50 мкм в направлении, перпендикулярном плоскости перехода, как показано на рис. 5.24.

Геометрия диода с краевым излучением аналогична геометрии лазера с полосковым контактом — оба излучают параллельно полосковому переходу. По сравнению с лазерами СИД отличаются простотой, так как у них зависимость мощности выходного излучения от тока возбуждения остается практически линейной и мало изменяется во времени.

Поскольку нет резко выраженного порога, то нет и нужды слишком тщательно регулировать пиковый ток возбуждения, так как прибор вряд ли выйдет из строя при прохождении через него не-

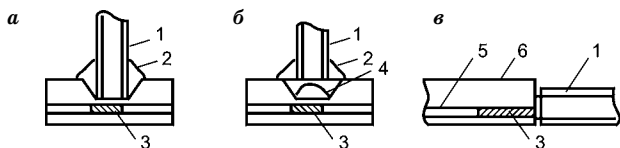


Рис. 5.24

Типы СИД, применяемых в волоконно-оптических системах:

а — СИД, излучающий через поверхность (типа Барраса), со световодом, приклеиваемым к излучающей поверхности; *б* — СИД того же типа, но снабженный интегральной линзой с высоким показателем преломления для улучшения преобразования электрической энергии в излучаемую оптическую мощность; *в* — СИД с краевым излучением: 1 — световод; 2 — клей; 3 — излучающая область; 4 — полусферическая линза с высоким показателем преломления; 5 — структура лазерного типа; 6 — длина контакта, определяет размеры излучающей области.

большого тока перегрузки; кроме того, с помощью простых температурных датчиков и управляющих устройств с разомкнутым контуром возможна компенсация различных температурных эффектов. При работе в системе связи СИД менее привлекателен, чем лазер, из-за большей ширины линии излучения и меньшей яркости; это означает, что он обычно генерирует меньшую мощность и заставляет обращать особое внимание на дисперсию в материале. Тем не менее СИД сохраняют свои позиции благодаря низкой стоимости и простоте эксплуатации и во многих случаях вполне могут заменить лазеры, отвечая требованиям разработчиков систем, в которых лазер лишь незначительно расширил бы рабочие пределы (запасы), что на практике оказывается совсем ненужным. Так как характеристики излучения СИД почти не чувствительны к рабочим условиям, при проектировании возможности выбора схем сужаются, а конструктивные решения соответственно упрощаются. В общем случае нужно сначала оценить мощность, направляемую в светодиод, по произведению яркости источника с заданным углом ввода и площади сечения светодиода, а затем оценить эффективность стыковки одного с другим. Ширина линии излучения источника существенно не меняется, так что легко можно подсчитать дисперсию в материале, которая вместе с модовой дисперсией и шириной импульса позволяет оценить чувствительность приемника. Длительность возбуждающего импульса можно несколько уменьшить, чтобы снизить потери мощности в приемнике.

Время отклика (постоянная времени) СИД не равно нулю, и при использовании прибора в системе с высокой скоростью передачи информации это следует принимать во внимание. Время нарастания у типовых приборов с высокой яркостью находится в интервале от 2 до 4 нс и поэтому иногда становится ограничивающим фактором. При необходимости можно пожертвовать

яркостью ради быстродействия, что для специальных применений бывает вполне оправданным.

Преобразование электрической энергии в оптическую представляет большой интерес для разработчиков высокоэффективных систем. Внутри самого СИД превращение электрической энергии в оптическую происходит с очень высоким КПД. Значительная часть зонной оптической энергии впоследствии теряется прибором или поглощается, превращаясь в тепловую энергию. Создавая приборы малой площади, т. е. меньшей, чем площадь поперечного сечения светодиода, удастся увеличить яркость при данном токе. А применение линзовой системы с большой числовой апертурой позволяет увеличить излучающую поверхность СИД и тем самым «заполнить» торец светодиода, благодаря чему увеличивается эффективная собирающая апертура прибора, который соединяют со светодиодом. Таким путем можно увеличить отдаваемую прибором мощность при заданном токе возбуждения. На основе этого принципа были изготовлены СИД со встроенными отрезками световодов и линзами.

Для волоконно-оптических систем пригодны СИД трех типов. Их конструкции изображены на рис. 5.24. У простых плоскостных приборов или приборов Барраса площадь излучающей поверхности обычно меньше площади сердцевины светодиода, торец которого, как правило, размещают в непосредственной близости от этой поверхности. Такую конструкцию можно использовать и для приборов меньшей площади, если установить собирающую линзу с большей числовой апертурой, как показано на рис. 5.24б. Наконец, на рис. 5.24в изображена совершенно иная структура, которая больше подходит для лазеров, используемых в волоконно-оптических системах, и представляет собой СИД с краевым излучением. Принцип ее работы основан на излучении вдоль перехода, соединяемого со световодом точно так же, как и в случае лазера. Излучение из этой структуры некогерентно, хотя возможно некоторое уменьшение спектральной ширины линии свержизлучения из-за усиления. В состоянии свержизлучения одновременно увеличивается яркость и сужается спектральная линия, но прибор при этом не обладает экстремальной нелинейностью, свойственной лазерам, что позволяет использовать очень простые устройства управления.

Для оптимизации ввода излучения в световод были разработаны СИД с краевым излучением и относительно толстым световодным слоем, расположенным около активного слоя и имеющим, в отличие от последнего, несколько меньший показатель преломления. Сверхизлучение в таких приборах подавляется, так как свет,

распространяющийся в световодном слое, очень слабо связан со светом в области усиления, вследствие чего эти СИД имеют исключительно линейные характеристики. В отличие от приборов, обладающих значительным сверхизлучением, в СИД с краевым излучением поглощающие области, образующиеся в активном слое, по мере старения диодов слабо влияют на параметры выходного излучения.

Другим перспективным типом светоизлучающих диодов для ВОС являются суперлюминесцентные. Фактически это усилители спонтанного излучения без положительной обратной связи (ПОС). Обычно для них используется двойная гетероструктура с полосковым контактом, который только с одной стороны доходит до торца кристалла. Основное отличие суперлюминесцентного диода (ССИД) от лазера — отсутствие резонатора Фабри–Перо (нет ПОС). Длина усиливающей области больше, чем в лазере ($\approx 1,5$ мм). Спонтанное излучение равновероятно во все стороны, однако часть его удерживается и направляется планарным световодом и усиливается за счет вынужденного излучения. Спектр излучения ССИД сплошной, как у поверхностных СИД, однако значительно уже ($3 \dots 5$ нм). Диаграмма направленности более узкая, чем у поверхностных СИД, и несимметричная, как у лазеров, с угловыми размерами 1200 и 400. Эффективность ввода излучения в многомодовые волокна выше, чем в случае поверхностных СИД.

Излучение мощностью $1 \dots 10$ мВт вводится в многомодовый световод мощностью $0,1 \dots 1$ мВт.

Особенности ССИД:

- суперлинейная ватт-амперная характеристика (близка к экспоненциальной);
- пороговая плотность тока ниже, чем у лазеров;
- выходная мощность во много раз больше, чем у светодиодов;
- ширина спектральной линии $\Delta\lambda = 2 \dots 6$ нм на порядок меньше, чем у светодиодов, но значительно больше, чем у лазеров;
- излучение, в отличие от излучения светодиодов, может быть поляризованным;
- по диапазону температур и долговечности превосходят лазеры, но уступают обычным СИД.

Конструкция суперлюминесцентного диода представлена на рис. 5.25.

Параметры лазерных светодиодов для приводов оптических носителей информации и принтеров приведены в табл. 5.2.

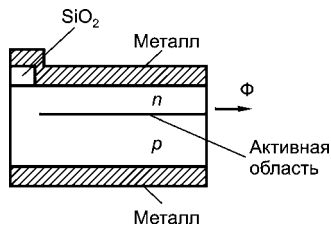


Рис. 5.25
Суперлюминесцентный диод

Таблица 5.2

Лазерные светодиоды для приводов оптических носителей информации

Область применения	Наименование	Длина волны I_p , нм	Макс. выходная мощность ($T_c = 25^\circ\text{C}$) P_o , мВт	Схема
DVD-приводы	RLD2WMNV1	780/ 655	7	
	RLD65MPT3	655	7	
	RLD65MZT2	655	10	
	RLD65MQT2	655	10	
Пишущие DVD-приводы	RLD65PZB2	658	160	
	RLD65PZB3	658	180	
	RLD65PZB4	658	200	
	RLD65PZB5	658	240	
Обычные CD-плееры	RLD78MPA1	785	5	
Портативные CD-плееры	RLD78MMP1	785	4	
Автомобильные CD-плееры	RLD-78MAT1	785	5	
Многодисковые плееры	RLD78MZQ2	785	8,5	
Приводы CD-R/RW	RLD78PZW2	785	180 (импульс)	
	RLD78PZW3	785	200 (импульс)	
	RLD78PZW4	785	230 (импульс)	
Лазерные принтеры	RLD78NZH1	785	5	
	RLD78NZH2	785	10	
Датчики, измерительные приборы и т. п.	RLD-78MC	785	5	

5.10. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЛАЗЕРОВ И СВЕТОДИОДОВ

В табл. 5.3 приведены типовые параметры полупроводниковых источников света.

Анализ приведенных в табл. 5.3 данных показывает, что полупроводниковые источники излучения отвечают большинству требований, предъявляемых к таким приборам в световодных системах связи и световодных измерительных системах. Светоизлучающие диоды являются наиболее подходящими источниками для аналоговых волоконно-оптических лазеров и низкоскоростных систем передачи информации с использованием многомодовых волоконных световодов.

Таблица 5.3

Технические характеристики полупроводниковых источников света

Параметр	СИД		Лазеры
	поверхностные	суперлюминесцентные	
Потребляемая мощность, мВт	75...750	75...750	15...600
Пороговый ток накачки, мА	—	—	5...250
Рабочий ток накачки, мА	50...300	50...300	10...300
Выходная мощность излучения в непрерывном режиме, мВт	1...10	1...10	1...50
Яркость, Вт/см ²	10...100	10 ³	10 ⁵
Мощность, вводимая в многомодовый световод, мВт	0,05...0,5	0,1...1	0,5...15
Ширина спектра излучения, нм	30...50	3...5	2·10 ⁴ ...3
Центральная длина волны излучения, мкм	0,8	0,9	1-1,6
Температурная нестабильность центральной длины волны, нм/К	0,3	0,3	0,01...0,3
Ширина полосы частот модуляции по уровню 3 дБ, МГц	100	200	500...5000
Нелинейность ватт-амперной характеристики, %	0,3...3	10	0,3...30
Срок службы, ч	10 ⁴ ...10 ⁷	10 ⁴ ...10 ⁶	10 ³ ...10 ⁵
Степень сложности	От низкой до средней	Средняя	Высокая
Стоимость	От низкой до средней	Средняя	От средней до высокой

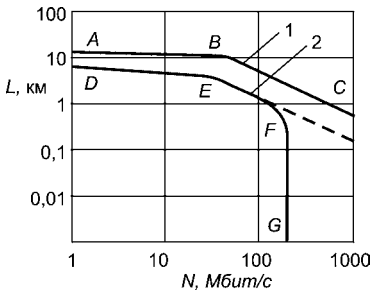


Рис. 5.26

Зависимость длины регенерационного участка L от скорости передачи информации N для ступенчатого световода с затуханием 5 дБ/км для $\lambda = 0,85$ мкм:

1 — для лазерного диода (спад характеристики на участке BC обусловлен межмодовой дисперсией); 2 — для светодиода (спад характеристики обусловлен на участке EF широким спектром диода, на участке FG — дополнительно спадом частотной характеристики).

Примерные представления о переходе от использования СИД к использованию лазеров в системах на многомодовых волокнах дают графики зависимостей длины ретрансляционного участка от скорости передачи информации при использовании этих излучателей, приведенные на рис. 5.26. Параметры инжекционных лазеров и решеток приведены в прил. III (1).

Полупроводниковые лазеры в сравнении с лазерами других типов обладают следующими преимуществами:

- малые масса и габариты и высокое оптическое усиление ($k_{\text{л}} \approx 10^3 \dots 10^4 \text{ см}^{-1}$); высокий КПД;
- простота накачки: инжекция не требует высоких питающих напряжений и мощностей;
- высокое быстродействие;
- возможность генерации излучения заданной длины волны в широком диапазоне, которая достигается выбором полупроводника с необходимой шириной запрещенной зоны;
- технологическая и эксплуатационная совместимость с элементами интегральной оптики.

Но современным полупроводниковым лазерам присущи и недостатки:

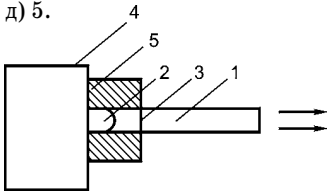
- относительно низкие параметры когерентности излучения ($\Delta\lambda/\lambda_{\text{max}}$ и θ_p), что объясняется высокой плотностью активного вещества, малой длиной резонатора и малой выходной апертурой;
- низкая долговечность, для промышленных образцов $10^2 \dots 10^3$ ч (в то же время расчеты показывают, что долговечность инжекционных лазеров может быть выше 10^5 ч).

Снижение долговечности реальных приборов прежде всего связывают с постепенной деградацией (старением) полупроводникового лазера. Деградация стимулируется высокой плотностью тока, а также потоков оптической и тепловой мощности, которые характерны для работы полупроводниковых лазеров.

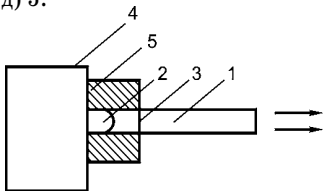
Основным деградационным эффектом является повышение концентрации безызлучательных центров в активной области за счет внедрения атомов неконтролируемых примесей и образования новых дефектов. Кроме того, имеет место снижение активности излучательных центров и возрастание поверхностной рекомбинации.

Тестовые вопросы к главе 5
«ПРИБОРЫ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ»

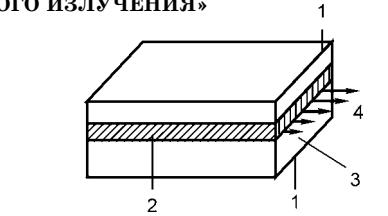
- 5.1. Используя схему, укажите в конструкции твердотельного лазера номер, соответствующий стержню активного вещества:
 а) 1;
 б) 2;
 в) 3;
 г) 4;
 д) 5.



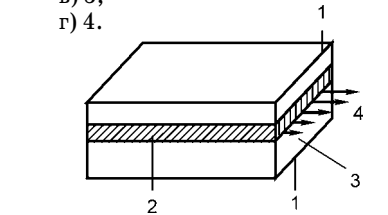
- 5.2. Используя схему, укажите в конструкции твердотельного лазера номер, соответствующий инфракрасному светодиоду:
 а) 1;
 б) 2;
 в) 3;
 г) 4;
 д) 5.



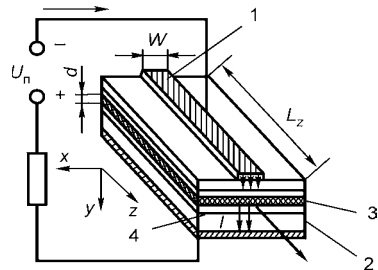
- 5.3. Используя схему, укажите номер, соответствующий металлу:
 а) 1;
 б) 2;
 в) 3;
 г) 4.



- 5.4. Используя схему, укажите номер, определяющий активную область:
 а) 1;
 б) 2;
 в) 3;
 г) 4.

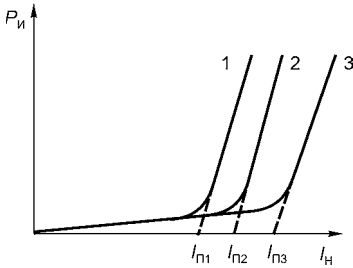


- 5.5. Используя схему, укажите в полупроводниковом лазере с гетероструктурой номер, определяющий металл:
 а) 1;
 б) 2;
 в) 3;
 г) 4.



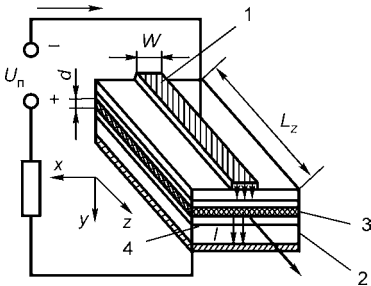
5.6. Укажите на рисунке номер ватт-амперной характеристики инжекционного лазера, соответствующий низкой температуре:

- а) 1;
- б) 2;
- в) 3.



5.7. Укажите на схеме полупроводникового лазера с гетероструктурой номер, соответствующий активной области:

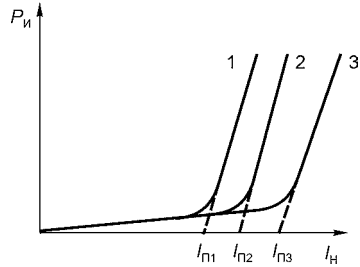
- а) 1;
- б) 2;
- в) 3;
- г) 4.



5.8. Укажите на рисунке номер ватт-амперной характеристики инжекционного лазера, соот-

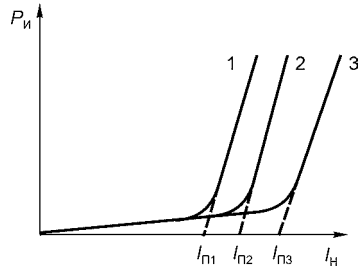
ветствующий средней температуре:

- а) 1;
- б) 2;
- в) 3.



5.9. Укажите на рисунке номер ватт-амперной характеристики инжекционного лазера, соответствующий высокой температуре:

- а) 1;
- б) 2;
- в) 3.



5.10. Какие условия необходимы для возникновения лазерной генерации:

- а) условие баланса фаз;
- б) условие баланса амплитуд;
- в) наличие элемента накачки;
- г) наличие оптического резонатора?

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ФОТОПРИЕМНЫЕ ПРИБОРЫ

6.1. ПРИНЦИП РАБОТЫ ФОТОПРИЕМНЫХ ПРИБОРОВ

Работа фотоприемников основана на использовании внутреннего фотоэффекта в твердых телах. Поглощаемые полупроводником кванты освобождают носители заряда атомов либо решетки, либо примеси. Поскольку для каждого такого перехода требуется минимальная энергия, характерная для данного материала, каждый тип фотоприемника имеет определенную длинноволновую границу $\lambda_{\text{гр}}$, определяемую формулой

$$\lambda = \frac{1,24}{E_2 - E_1}, \quad (6.1)$$

где λ — в микрометрах; E_2 и E_1 — в электрон-вольтах.

Разность $E_2 - E_1$ — это энергетический зазор при переходе «зона-зона» (показан на рис. 6.1а как переход 1). Возможен также переход «примесный уровень — зона» (переход 2 на рис. 6.1а). Переходы 1 и 2 используются для работы фотоприемников. Переход 3 «зона — примесный уровень» на практике использоваться не может из-за неоявления фотоэффекта в нагрузке.

Рассмотрим принцип действия фотоприемного прибора на основе p - n -перехода (рис. 6.1б). При поглощении фотона в полупроводнике образуются пары «электрон-дырка». При их разделении возникает фототок, причем электроны перемещаются в n -области (против электрического поля), а дырки — в p -области (по полю).

Вероятность разделения созданной фотоном пары «электрон-дырка» выше в том случае, если эта пара образуется в области полупроводника, находящейся под воздействием электрического поля. Альтернативой разделения является обычная рекомбинация пары «электрон-дырка», при которой не происходит какого-либо

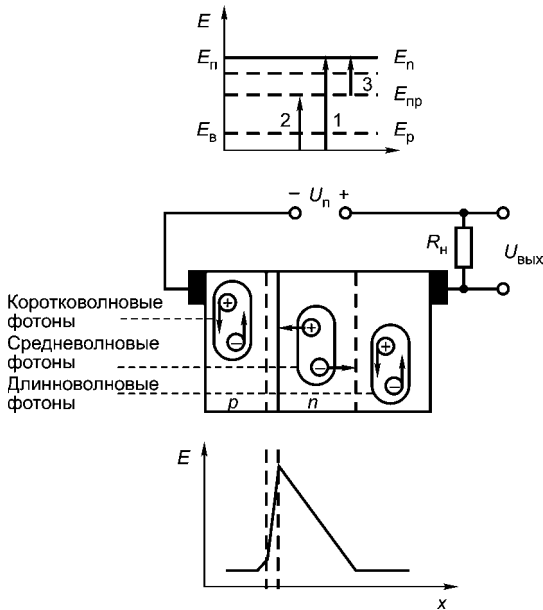


Рис. 6.1

Принцип действия фотоприемного прибора:

a — энергетическая диаграмма; *b* — процессы при p - n -переходе; *в* — распределение электрического поля в структуре.

смещения заряда и потому не вносится вклад в фототок. Электрическое поле распределяется в кристалле полупроводникового прибора неравномерно.

В диффузионных областях p - и n -типа поле намного слабее, чем в области между ними, известной под названием обедненного слоя. Для эффективной работы фотоприемника необходимо, чтобы наибольшее число фотонов поглощалось в обедненном слое, т. е. фотоны не должны поглощаться до обедненного слоя и за его пределами.

Глубина проникновения фотона в полупроводник до поглощения зависит от его длины волны. Фотоны с малой длиной волны поглощаются вблизи поверхности, а фотоны с большой длиной волны могут проникать через всю толщину кристалла. Поэтому для обеспечения широкой спектральной характеристики необходимо, чтобы кристалл фотодиода имел очень тонкий p -слой, допускающий проникновение фотонов с малой длиной волны, и толстый обедненный слой — для получения максимального фототока от длинноволновых фотонов.

Толщина обедненной области зависит от удельного сопротивления полупроводника в этой области и обратного смещения. Обедненный слой существует и в том случае, если обратное смещение не приложено. Это обусловлено наличием «встроенного» поля, которое образуется вследствие диффузии через переход неосновных носителей. Напряжение обратного смещения расширяет обедненную область.

Размеры обедненного слоя при любом напряжении больше в тех приборах, у которых вблизи p - n -перехода материал имеет более высокое удельное сопротивление. В то же время на обеих противоположных поверхностях кристалла для изготовления омических контактов требуется низкое удельное сопротивление. Фотоприемники с p - n -переходом, например солнечные батареи, изготавливают методом диффузии примеси p -типа в материал n -типа с низким удельным сопротивлением. Малая толщина диффузионного p -слоя обеспечивает высокую чувствительность к фотонам с малой длиной волны, но, чтобы расширить обедненную область для создания высокой чувствительности к фотонам с большой длиной волны, требуется относительно высокое обратное смещение.

Глубокая диффузия примеси p -типа ухудшает чувствительность к излучению малой длины волны, но благодаря созданию «плавного» перехода дает возможность уменьшить напряжение смещения, необходимого для обеспечения хорошей чувствительности к излучению большой длины волны. Для повышения чувствительности к фотонам малой и большой длин волн при низком обратном смещении между p - и n -областями используют слой с высоким удельным сопротивлением — i -слой. Фотоприемники, имеющие i -слой, получили название p - i - n -структур. Такие приборы имеют тонкую диффузионную p -область (на которую падает поток излучения) и более толстую диффузионную n -область с другой стороны высокоомной кремниевой пластины. Обычно в p - i - n -фотоприемниках i -слой имеет такое высокое удельное сопротивление, что даже при нулевом смещении обедненный слой распространяется от p -слоя примерно на половину глубины i -слоя. При обратном смещении до 5 В обеднение распространяется вплоть до n -слоя и наблюдается эффект смыкания. Поскольку пробивное напряжение превышает 200 В, желательно устанавливать режим работы при обратных напряжениях, превышающих напряжение смыкания, чтобы поддерживать полное обеднение i -слоя даже при высоком потоке излучения. Это обеспечивает наилучшую линейность и быстрдействие.

6.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПАРАМЕТРЫ И МОДЕЛИ ФОТОПРИЕМНИКОВ

6.2.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОПРИЕМНИКОВ

Основными характеристиками фотоприемников являются вольт-амперная, спектральная и энергетическая.

Примерный вид этих характеристик представлен на рис. 6.2.

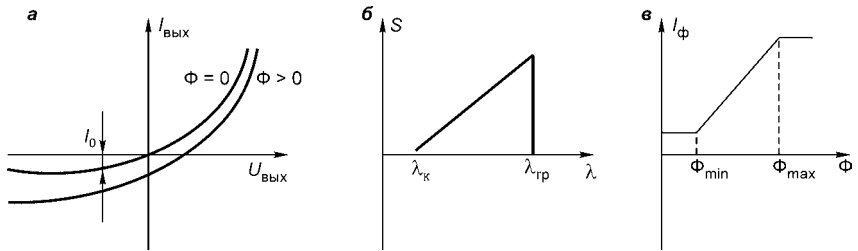


Рис. 6.2

Характеристики фотоприемников:

a — вольт-амперная; *б* — спектральная; *в* — энергетическая.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) — зависимость выходного тока от напряжения на выходе фотоприемника при заданном потоке излучения Φ .

Например, в случае фотоприемника на основе p - n -перехода ВАХ описывается уравнением

$$I_{\text{вых}} = I_0 \left[\exp\left(\frac{eU_{\text{вых}}}{KT} - 1\right) - I_{\Phi} \right], \quad (6.2)$$

где I_0 — обратный ток p - n -перехода; I_{Φ} — фототок, возникший под действием светового потока Φ .

Спектральная характеристика — зависимость чувствительности фотоприемника от длины волны падающего на фотоприемник монохроматического излучения. Указанная на рис. 6.2*б* длинноволновая граница спектра $\lambda_{\text{гр}}$ определяет максимальную длину волны падающего на фотоприемник излучения, а коротковолновая граница $\lambda_{\text{к}}$ обусловлена возрастанием поглощения излучения в пассивных областях структуры при уменьшении длины волны.

Энергетическая характеристика (рис. 6.2*в*) выражает зависимость фототока от потока излучения, падающего на фотоприемник. Энергетическая характеристика описывается, как правило, степенной функцией вида

$$I_{\Phi} = \Phi^n, \quad (6.3)$$

где показатель степени n характеризует линейность энергетической характеристики. При $n = 1$ характеристика линейна.

Область значений $\Phi_{\min} \dots \Phi_{\max}$ определяет динамический диапазон линейности фотоприемника:

$$D_{\Phi n} = 10 \lg \frac{\Phi_{\max}}{\Phi_{\min}}. \quad (6.4)$$

6.2.2. ПАРАМЕТРЫ ФОТОПРИЕМНИКОВ

Важнейшим параметром фотоприемника является *чувствительность*. Этот параметр можно до определенной степени считать аналогичным коэффициенту усиления в приборах с электронной проводимостью. В общем случае чувствительность фотоприемника отражает изменение электрического состояния на выходе фотоприемника при подаче на его вход единичного оптического сигнала.

Оптическое излучение может характеризоваться энергетическими и световыми параметрами. В соответствии с характеризующим параметром различают чувствительность фотоприемника к потоку излучения S_{Φ_e} , световому потоку S_{TM_e} , облученности S_{E_e} и освещенности S_{E_v} .

В зависимости от измеряемого электрического параметра на выходе фотоприемника различают токовую и вольтовую чувствительности фотоприемника. Если измеряемой величиной является фототок, то имеем токовую чувствительность (S_I). Чувствительность фотоприемника, у которого измеряемой величиной является напряжение фотосигнала, называется вольтовой чувствительностью (S_V).

Примеры определения чувствительности фотоприемника:

$$\begin{aligned} S_{I\Phi_v} &= \frac{I_{\Phi}}{\Phi_v}; \\ S_{IE_v} &= \frac{I_{\Phi}}{E_v}; \\ S_{V\Phi_e} &= \frac{U_{\Phi}}{\Phi_e}; \\ S_{VE_e} &= \frac{U_{\Phi}}{E_e}, \end{aligned} \quad (6.5)$$

где $S_{I\Phi_v}$ — токовая чувствительность к световому потоку; S_{IE_v} — токовая чувствительность к освещенности; $S_{V\Phi_e}$ — вольтовая

чувствительность к потоку излучения; S_{VE_V} — вольтовая чувствительность к облученности.

Вообще говоря, чувствительность фотоприемника не есть постоянная величина, она зависит, в частности, от параметров излучения. Для учета этой зависимости вводят понятия статической и динамической дифференциальной чувствительности фотоприемника; при этом статическая чувствительность определяется отношением постоянных значений измеряемых величин.

Чувствительность зависит от длины волны падающего излучения. Поэтому различают интегральную и монохроматическую чувствительность фотоприемника к некогерентному излучению заданного спектрального состава. Монохроматическая чувствительность — это чувствительность фотоприемника к монохроматическому излучению.

6.2.3. ПАРАМЕТРЫ ФОТОПРИЕМНИКА КАК ЭЛЕМЕНТА ОПТОПАРЫ

В оптопарах фотоприемник работает совместно с излучателем, чаще всего с ИК-диодом. Применяемые в оптопарах излучатели имеют относительно узкий спектр излучения. В связи с этим для фотоприемника здесь не важен конкретный вид спектральной характеристики, теряют смысл интегральные (по спектру) параметры. Важно, чтобы чувствительность была максимальной на рабочей длине волны применяемого излучателя.

Быстродействие фотоприемника в оптопаре характеризуется временем переключения $t_{\text{пер}}$. Основные классы применяемых в настоящее время фотоприемников имеют $t_{\text{пер}} = 10^{-5} \dots 10^{-7}$ с; у быстродействующих современных фотоприемников $t_{\text{пер}} = 10^{-8} \dots 10^{-10}$ с; перспективы оптоэлектроники требуют от фотоприемников продвижения в область от 10^{-10} до 10^{-12} с. Режим высокого быстродействия (малого $t_{\text{пер}}$) не реализуется для высокоомной нагрузки, так как при этом длительность переключения определяется медленным процессом зарядки емкости фотоприемника. Кроме того, при работе с потоками излучения вблизи $\Phi_{\text{пор}}$ необходимы сопротивления нагрузки около 10^7 Ом, тогда длительность зарядки емкости фотоприемника $C = 5 \dots 20$ пФ составляет $10^{-4} \dots 10^{-5}$ с. В результате получается, что высокое быстродействие при работе фотоприемника в пороговом режиме (при $\Phi = \Phi_{\text{пор}}$ и малых $I_{\text{ф}}$) практически недостижимо. В частности, при применении фотоприемников в оптопарах пороговые параметры оказываются восторженными.

6.2.4. ГЛАЗ КАК ФОТОПРИЕМНИК С УНИКАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ [35]

Глаз — преобразователь оптических сигналов, если и не в электрические, то в нейронные сигналы. Примерно $2 \cdot 10^6$ нервных волокон подключается к мозгу из глаза, а всего к мозгу подключается $2,5 \cdot 10^6$ волокон. Эти цифры говорят о важности для человека глаза как приемника информации.

Полоса частот человеческого органа слуха — 20 кГц, следовательно, скорость приема информации этим органом можно оценить как 20 кбит/с. Аналогичная оценка для глазного нерва — примерно $(2 \dots 4) \cdot 10^7$ бит/с.

Скорость обработки информации органом зрения в тысячу раз выше скорости обработки органом слуха.

Исследователи называют глаз «выдвинутой вперед частью мозга». В сетчатке глаза начинается ряд операций первичной обработки изображений, а продолжаются и завершаются они в больших полушариях коры головного мозга, составляющих его значительную часть.

Опытами С. И. Вавилова установлена возможность глаза регистрировать единичные фотоны, так что чувствительность глаза близка к теоретическому квантовому пределу.

Число «элементов» сетчатки глаза — палочек и колбочек — составляет примерно 10^8 ; ежесекундно в мозг посылается $(2 \dots 4) \cdot 10^7$ сигналов. Пространственное разрешение максимально в центре сетчатки: диаметр колбочек там примерно 1...2 мкм, так что пространственное разрешение близко к теоретическому, дифракционному пределу.

Человек различает до 200 спектрально чистых цветов в диапазоне 0,38...0,76 мкм. При смешении с белым светом — еще около десяти оттенков каждого цвета.

Аналогичным параметром оптических приборов можно считать *спектральное разрешение* $\Delta\lambda$. Из приведенных данных получаем следующую оценку этого параметра для глаза:

$$\Delta\lambda = \frac{0,76 - 0,38}{200 \cdot 10_{\min}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ [мкм]}. \quad (6.6)$$

Человеку пришлось немало потрудиться, чтобы превзойти это достижение природы: в современных фурье-анализаторах $\Delta\lambda$ выше на порядок и более.

Человеку вполне достаточно спектрального разрешения глаза для восприятия цветного богатства окружающего мира. Палочки

обеспечивают ночное зрение. Они позволяют человеку ориентироваться в безлунную безоблачную ночь, т. е. при освещенности 10^{-4} лк. Глаз видит и при самом ярком на Земле прямом солнечном освещении, а это 10^5 лк. Стало быть, динамический диапазон глаза

$$D = \frac{10^5}{10^{-4}} = 10^9. \quad (6.7)$$

Такому «миллиардному» динамическому диапазону могут завидовать многие оптико-электронные приборы.

Глаз способен регистрировать примерно 20 кадров в секунду. Это учитывается при разработках телевизионных стандартов.

6.2.5.

ШУМОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ФОТОПРИЕМНИКОВ

Возможность реализации предельно малых оптических сигналов определяется пороговым потоком $P_{\text{пор}}$, который связан с шумовыми параметрами фотоприемника.

Шум фотоприемника представляет собой хаотический сигнал со случайной амплитудой и частотой, присутствующий на его выходе наряду с полезным сигналом. Источники шума могут быть внутренними и внешними по отношению к фотоприемнику как элементу электрической цепи.

В условиях постоянной немодулированной засветки фотоприемника основным фактором, ограничивающим порог чувствительности, является темновой ток $I_{\text{т}}$. При фототоке $I_{\text{ф}}$, меньшем темнового тока, полезный ток сигнала $I_{\text{с}}$ неразличим на фоне темнового тока. Влияние темнового тока можно исключить при помощи модуляции светового потока с последующим усилением переменного фототока, снимаемого с выхода фотоприемника. Внешние шумы, возникающие за счет различного рода наводок, можно существенно ограничить.

Внутренние (собственные) шумы есть в каждом фотоприемнике, они связаны с корпускулярной природой света и электричества. Поскольку шумы обусловлены случайными процессами, их принято описывать такими параметрами, как математическое ожидание (средний уровень шума) и среднее квадратичное значение, или дисперсия. Шумы характеризуют среднеквадратическими значениями флуктуации тока \bar{i}^2 и среднеквадратическими значениями флуктуации напряжения \bar{u}^2 при заданной нагрузке в определенной полосе частот.

Основные виды шумов в ФП: тепловой, дробовой, избыточный, фоновый и фотонный.

Тепловой шум — шум, вызываемый хаотическим тепловым движением свободных электронов. Он не зависит от полезного сигнала и характеризуется равномерным спектром в полосе частот Δf . Тепловой шум относится к так называемым белым шумам:

$$\bar{u}_{\text{тш}}^2 = 4kTR_n\Delta f. \quad (6.8)$$

Основным методом борьбы с тепловым шумом является охлаждение ФП.

Дробовой (генерационно-рекомбинационный) шум обусловлен тем, что ток на выходе ФП является потоком дискретных частиц, количество которых флуктуирует во времени:

$$\bar{i}_{\text{шдр}}^2 = 2e(I_{\Phi} + I_T)\Delta f. \quad (6.9)$$

На сопротивлении нагрузке создается напряжение, дисперсия которого определяется по формуле

$$\bar{u}_{\text{шдр}}^2 = 2e(I_{\Phi} + I_T)R^2\Delta f. \quad (6.10)$$

Дробовой шум также является белым шумом, но, в отличие от теплового, зависит от уровня принимаемого сигнала.

Избыточный шум со спектром вида $1/f$ обусловлен отклонениями структуры ФП от физически идеальной вследствие несовершенства технологии (поверхностные рекомбинации и утечки, неидеальность контактных электродов и т. п.). Избыточный шум ($1/f$ шум) слабо зависит от температуры; преобладает в области низких частот.

Фоновый шум $I_{\text{ш}}$ обусловлен флуктуациями излучательной способности тел, окружающих ФП, при температуре $T_{\text{фон}}$.

Фоновое излучение может быть связано как с рассеянием полезного излучения атмосферой, так и с активностью посторонних источников (Солнца, теплового излучения Земли и т. д.), существующих независимо от пары «излучатель–ФП».

Следует учитывать, что при работе ФП в ИК-области спектра ($\lambda > 4$ мкм) основной вид фоновых помех — тепловое излучение атмосферы и земной поверхности, причем максимум их приходится на длину волны примерно 10 мкм. При $\lambda < 3$ мкм преобладают фоновые помехи от солнечного излучения (прямого, рассеянного и отраженного) с максимумом в видимой области спектра.

Поскольку радиационный шум зависит как от параметров излучателя, так и от условий работы ФП, часто именно он определяет

порог чувствительности Φ_{Π} . Поэтому в качестве идеального Φ_{Π} можно принять тот, у которого все шумы незначительны по сравнению с радиационным.

Фотонный шум $I_{\text{ш. фот}}$ обусловлен статистическими флуктуациями числа фотонов в потоке воздействующего излучения N_{Φ} , т. е. квантовой дискретной природой излучения.

Фундаментальный, принципиально неустраняемый ни при какой рабочей температуре квантовый предел задается фотонным шумом. Статистика фотонов в потоке подчиняется распределению Пуассона, для которого среднеквадратическое отклонение от N_{Φ} равно $\sqrt{N_{\Phi}}$.

Минимальная эквивалентная шумовая мощность определяется потоком 1 фотон/с:

$$\frac{P_{\text{Э. min}}}{\sqrt{\Delta f}} = E_{\Phi} = h\nu. \quad (6.11)$$

При $\lambda = 0,5$ мкм и $\Delta f = 1$ Гц $P_{\text{Э. min}} \approx 4 \cdot 10^{-19}$. Именно такую мощность излучения может «почувствовать» идеальный Φ_{Π} при гетеродинном приеме.

Поскольку шумы и, следовательно, $\Phi_{\text{пор}}$ зависят от полосы частот Δf , для удобства сравнения различных Φ_{Π} введено понятие порогового потока Φ_{Π} в единичной полосе частот, или обратной величины, называемой обнаружительной способностью D .

$$D = \frac{\Phi_{\text{пор}}}{\sqrt{\Delta f}}. \quad (6.12)$$

Удельная обнаружительная способность D^* характеризует величину D для Φ_{Π} с $S_{\text{эф}} = 1$ см², зависит от чувствительности Φ_{Π} и его шумовых характеристик и может служить критерием его качества:

$$D^* = S_{\text{и}} \sqrt{S_{\text{эф}} \frac{\Delta f}{U_{\text{ш}}}}. \quad (6.13)$$

Тогда удельный пороговый поток $\Phi_{\text{пор}}^*$ определяется как

$$\Phi_{\text{пор}}^* = \frac{1}{D^*} = \frac{U_{\text{ш}}}{S_{\text{и}} \sqrt{S_{\text{эф}} \Delta f}}. \quad (6.14)$$

Параметры $\Phi_{\text{пор}}^*$ и D^* зависят от длины волны излучения и фактически определяют диапазон спектра, в котором применим тот или иной Φ_{Π} .

6.2.6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФОТОПРИЕМНИКОВ

Электрическая модель фотодиода в статическом режиме представлена на рис. 6.3.

В рассматриваемой модели предполагается, что обратный ток в диоде VD неизмеримо меньше теплового тока фотодиода.

Простейшая высокочастотная модель фотоприемника представлена на рис. 6.3б.

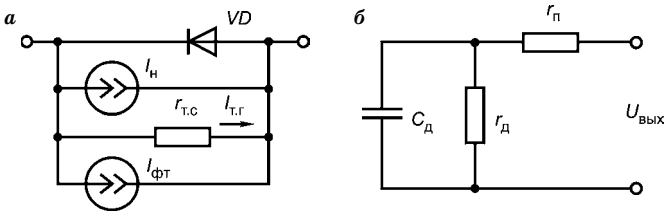


Рис. 6.3
Электрические модели фотодиода:

a — низкочастотная; b — высокочастотная; I_H — ток насыщения при $U_{обр} = 0,5 \dots 1$ В и температуре среды $T = T_{раб}$; $I_{т.г}$ — ток термогенерации, генерируемый в области $p-n$ -перехода, $U_{обр}$ — обратное напряжение, приложенное к фотодиоду; $I_{\Phi T}$ — ток фотодиода в затемненном состоянии (если $I_H = 0$ и $I_{т.г} = 0$); $r_{т.с}$ — темновое сопротивление.

Инерционность фотоприемников определяется временем пролета носителей от места их генерации до разделения их переходом и постоянной времени цепочки $r_n C_D$.

Время пролета носителей определяется внутренней структурой фотоприемника. Известны три механизма переноса: диффузия, диффузия при наличии электрического поля, дрейф в электрическом поле.

В сильно инерционных фотоприемниках на основе $p-n$ -перехода, если преобладающим механизмом переноса носителей является диффузия, при учете поглощения только в p -области среднее время пролета носителей в базе приблизительно равно

$$t = \frac{h_{\delta}^2}{2D_n}, \tag{6.15}$$

где h_{δ} — толщина базовой p -области; D_n — коэффициент диффузии электронов.

Такой механизм переноса, как дрейф в электрическом поле, используется в $p-i-n$ -фотоприемниках. Если в i -слое, где поле постоянно, пренебречь рекомбинацией, то частоту, при которой

амплитуда сигнала уменьшается на 30%, ориентировочно определяют как

$$f_{0,7} = \frac{1,7\mu U_{\text{обр}}}{2\pi h_i^2}, \quad (6.16)$$

где μ — подвижность носителей; $U_{\text{обр}}$ — обратное напряжение, приложенное к p - i - n -структуре; h_i — ширина i -области.

В случае узкой i -области ($h_i \approx 0,05$ мм) с удельным сопротивлением примерно 1000 Ом·см при обратном напряжении $U_{\text{обр}} = 50$ В $f_{0,7}$ доходит до 400 МГц.

При разработке малоинерционных фотоприемников стараются уменьшить $r_{\text{п}}$ и $C_{\text{д}}$. Фотоприемник на основе p - n -перехода подобен конденсатору, для которого p - и n -области представляют разноименно заряженные пластины, а область объемного заряда — разделяющий их диэлектрик. Ширина области объемного заряда меняется в зависимости от величины приложенного напряжения. С ростом величины обратного смещения ширина области объемного заряда увеличивается и емкость C уменьшается. Емкость фотоприемника $C_{\text{д}}$ можно определить по формуле для емкости плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}, \quad (6.17)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость полупроводника; ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума; S — площадь p - n -перехода; d — толщина диэлектрика.

Емкость фотоприемника с p - i - n -структурой при достаточно большом обратном смещении определяется только шириной i -слоя.

Последовательное сопротивление фотоприемника $r_{\text{п}}$ в общем случае включает сопротивление растекания носителей в тонком базовом слое (сопротивление базы), сопротивление толщины полупроводника за p - n -переходом (сопротивление коллектора) и сопротивление контактов. Сопротивление коллектора определяется по формуле

$$r_{\text{к}} = \rho_{\text{к}} \frac{h_{\text{к}}}{S}, \quad (6.18)$$

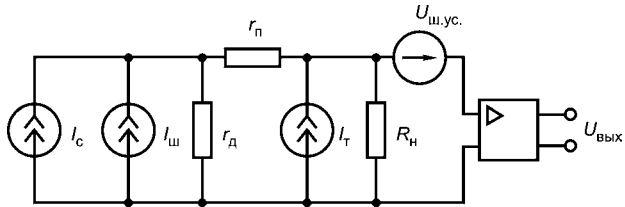
где $\rho_{\text{к}}$ — удельное сопротивление коллектора; $h_{\text{к}}$ — толщина коллектора; S — площадь p - n -перехода.

Требования высокой чувствительности и малой инерционности фотоприемников противоречивы, поэтому в зависимости от конкретных условий используют разные типы фотоприемников.

6.2.7. ШУМОВЫЕ МОДЕЛИ ФОТОПРИЕМНИКОВ

Шумовая модель фотоприемника приведена на рис. 6.4. Фотоприемник представлен независимыми генераторами шумового i_c и сигнального I_c токов, а также динамического r_d и последовательного r_n сопротивлений. Влиянием r_n и r_d можно пренебречь, если выполняется неравенство: $r_n \ll R_n \ll r_d$.

Рис. 6.4
Шумовая модель фотоприемника



Сопротивление нагрузки фотодетектора изображено в виде резистора R_n и генератора теплового шума $i_{тш}$. Предварительный усилитель представлен генератором шумового напряжения $U_{ш.у.с}$ и идеальным, свободным от шумов усилителем.

Общая мощность шума, выделяемая на нагрузке, определяется как

$$P_{ш} = \overline{i_{ш}^2} R_n + \overline{i_{т}^2} R_n + \frac{\overline{U_{ш.у.с}^2}}{R_n}. \quad (6.19)$$

Линии над символами обозначают среднеквадратические значения токов и напряжений, они должны быть строго над символом.

Для обеспечения приема сигнала с требуемым уровнем помехозащищенности необходимо, чтобы его мощность превышала общую шумовую мощность в F раз:

$$P_{сmin} \geq F P_{ш}, \quad (6.20)$$

где F — отношение сигнала к шуму.

Фотоприемники используются в качестве фотодетекторов в волоконно-оптических системах связи (ВОСС) и световодных измерительных системах. Они предназначены для преобразования оптического сигнала в электрический, который затем усиливается и обрабатывается в электронных схемах.

Фотоприемники, применяемые в ВОСС, должны удовлетворять многочисленным физическим и электротехническим требованиям. В частности, необходимо, чтобы они вносили минимальный шум в передаваемый сигнал, обладали достаточной широкополосностью (скоростью отклика), требуемой для воспроизведения

изменений интенсивности передаваемого излучения; имели максимальную чувствительность на длине волны излучателя; были бы стабильными по отношению к внешним температурным изменениям; имели большой срок службы и невысокую стоимость.

Фотоприемники обычно характеризуются четырьмя основными параметрами: постоянной времени (временем отклика), квантовой эффективностью, полной эквивалентной мощностью шума и чувствительностью (крутизной энергетической характеристики).

Широкое применение в ВОСС находят фотодетекторы на основе $p-i-n$ -фотодиодов, а также лавинные фотодиоды.

В конструкциях фотоприемников предусматривают охранные кольца для предотвращения чрезмерной утечки тока вблизи краев перехода и низковольтного пробоя. Применяются также антиотражающие покрытия, чтобы обеспечить квантовую эффективность около 90% и усиление примерно нескольких сотен.

Средний ток ЛФД определяется выражением [14]

$$I(t) = G \left(\frac{2\pi\eta\lambda_0}{he} P(t) + I_T \right), \quad (6.21)$$

где G — среднее усиление; η — квантовая эффективность, λ_0 — номинальная длина волны источника; h — постоянная Планка; $P(t)$ — оптическая мощность, падающая на фотоприемник; I_T — темновой ток.

Полная эквивалентная мощность шума $P_{ш.э}$ (нВт) характеризует как мощность шума, генерируемого в приборе, так и его усиление и служит мерой минимально обнаруживаемого сигнала. Эта мощность определяется величиной световой энергии, падающей на приемную площадку и создающей выходной сигнал, равный по величине шумовому сигналу на выходе фотодетектора. Эквивалентная шумовая мощность $P_{ш}$ (Вт/Гц 1/2) фотодетектора представляет собой $P_{ш.э}$, приведенную к ширине 1 Гц. Чтобы $P_{ш}$ давала представление о качестве приемного устройства, необходимо указать нагрузочное сопротивление и входное сопротивление усилителя.

Для ЛФД $P_{ш.э}$ вычисляется по формуле

$$P_{ш.э.ЛФД} = \frac{hf\Delta f}{\eta eG} (2KTC)^{1/2}, \quad (6.22)$$

где f — частота оптического излучения; Δf — ширина информационной полосы; C — емкость диода; T — температура диода и усилителя.

Для достижения максимальной чувствительности лавинных фотодиодов необходимо выбрать оптимальное значение коэффициента умножения

$$G = \left[1 - \frac{U_{II}}{IR} U_{\text{проб}} \right]^{n-1}, \quad (6.23)$$

где U_{II} — напряжение источника питания; $U_{\text{проб}}$ — напряжение лавинного пробоя; n — постоянный коэффициент, величина которого зависит от полупроводникового материала, $n = 2 \dots 3$; I — ток, протекающий через прибор; R — эквивалентное сопротивление прибора и нагрузки, для $p-i-n$ -диода $P_{\text{ш.э}}$ определяется как

$$P_{\text{ш.э } p-i-n} = \frac{hf\Delta f}{\eta e} (2KTC)^{1/2}. \quad (6.24)$$

Для ВОСС $P_{\text{ш.э}}$ можно оптимизировать посредством уменьшения емкости детектора и увеличения квантовой эффективности. Площадь детектора зависит, главным образом, от площади перехода и толщины обедненной области.

Формулы справедливы для случая равенства дробового и теплового шума при температуре T .

Хотя ЛФД имеют пониженную $P_{\text{ш.э}}$, они должны работать при более высоком напряжении, чем $p-i-n$ -диоды, и требуют более тщательного контроля по току и напряжению. Серийно выпускаемые ЛФД имеют $\Delta f > 1$ ГГц, время отклика 1 нс и $P_{\text{ш.э}} = 10$ мкВт.

Для оптического приемника, состоящего из ЛФД, и следующего за ним усилителя с шум-фактором N_f , эквивалентным входным сопротивлением R и полосой усиления, соответствующей полосе модулирующих частот, отношение сигнала к шуму для синусоидального сигнала находится из выражения

$$F = \frac{(\eta e G m P_0)^2}{2(h\nu i_{\text{ш.л}})^2}, \quad (6.25)$$

где P_0 — средняя принимаемая оптическая мощность; m — коэффициент модуляции; $i_{\text{ш.л}}$ — среднеквадратический шумовой ток при лавинном умножении:

$$i_{\text{ш.л}} = i_{\text{ф.ш}} + i_{\text{т.ш}} + i_{\text{т}} + i_{\text{ут}} + i_{\text{фон}} + i_{\text{б}}, \quad (6.26)$$

где $i_{\text{ф.ш}}$ — ток фотонного шума:

$$\bar{i}_{\text{ф.ш}}^2 = \frac{2e^2}{h\nu} \eta P_0 G^2 N_d \Delta f; \quad (6.27)$$

$i_{т. ш}$ — ток теплового шума:

$$\bar{i}_{т. ш}^2 = \frac{4KT}{R} N_f \Delta f; \quad (6.28)$$

i_T — темновой ток:

$$\bar{i}_T^2 = 2eI_T + G^2 N_d \Delta f; \quad (6.29)$$

$i_{ут}$ — ток утечки:

$$\bar{i}_{ут}^2 = 2eI_{ут} \Delta f; \quad (6.30)$$

$i_{фон}$ — фоновый ток:

$$\bar{i}_{фон}^2 = \frac{2e^2}{h\nu} \eta P_{фон} G^2 N_d \Delta f; \quad (6.31)$$

i_6 — ток шума биений:

$$\bar{i}_6^2 = \frac{2\Delta f}{JW} \left(\frac{e\eta GP_0}{h\nu} \right)^2 \left(1 - \frac{\Delta f}{2W} \right). \quad (6.32)$$

В формулах (6.28)–(6.32) N_d — шум-фактор, обусловленный неопределенностью лавинного усиления; N_f — шум-фактор усилителя; Δf — ширина информационной полосы; I_T — темновой ток фотодиода; W — спектральная ширина излучателя; J — число пространственных мод излучателя; $P_{фон}$ — средняя мощность фонового излучателя.

Для систем с лазерными источниками излучения доминирующими являются фотонный и тепловой шум.

Так как процесс лавинного усиления вносит шум, зависящий от усиления, то существует оптимальная величина усиления для каждой совокупности условий эксплуатации.

6.3. ФОТОДИОДЫ НА ОСНОВЕ p - n -ПЕРЕХОДА

Упрощенная структура фотодиода на основе p - n -перехода приведена на рис. 6.5. Такой прибор, по существу, представляет собой обратно смещенный p - n -переход. Важной особенностью такого перехода является наличие обедненной носителями области, концентрирующей относительно сильное поле, и области поглощения падающего света (где захватываются фотоны).

Обедненная область образуется неподвижными положительно заряженными атомами доноров в n -области и неподвижными отрицательно заряженными атомами акцепторов в p -области. Ширина обедненной области зависит от концентрации легирующих примесей. Чем меньше примесей, тем шире обедненный слой. По-

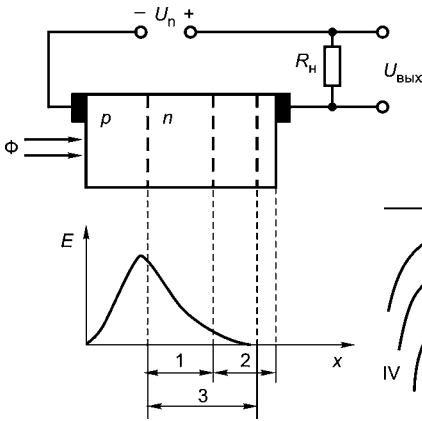


Рис. 6.5

Структура $p-n$ -перехода:

1 — обедненная область; 2 — диффузионная область; 3 — область поглощения.

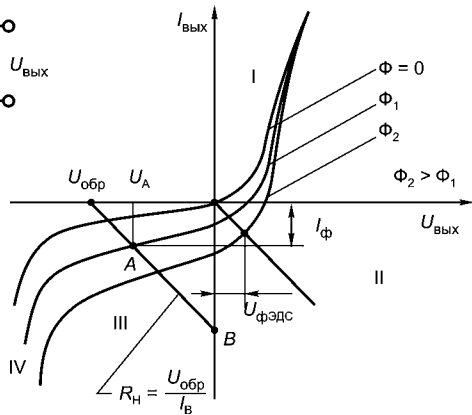


Рис. 6.6

Семейство вольт-амперных характеристик фотодиода

ложение и ширина поглощающей области зависят от длины волны падающего света и от материала, из которого изготовлен диод.

Чем сильнее поглощается свет, тем тоньше поглощающая область. Эта область может распространяться полностью на весь диод, если свет поглощается слабо. Когда поглощаются фотоны, электроны переходят из валентной зоны в зону проводимости. Таким образом создается электронно-дырочная пара. Если такая пара создается в обедненной области, то носители будут разделяться (дрейфовать) под влиянием поля в обедненной области. В результате в цепи нагрузки потечет ток. Если электронно-дырочная пара образуется вне обедненной области, то дырка будет диффундировать в сторону обедненной области. Так как диффузия по сравнению с дрейфом происходит очень медленно, желательно, чтобы большая часть света поглощалась в обедненной области. Поэтому желательно сделать обедненную область протяженной, уменьшив концентрацию легирующей примеси в n -слое. Это требует такого слабого легирования n -слоя, что его можно считать собственным.

Семейство вольт-амперных характеристик фотодиода приведено на рис. 6.6. Область I соответствует фотодиффузионной области. Здесь к $p-n$ -переходу приложено прямое напряжение и диффузионная составляющая тока полностью подавляет фототок ($I_{p-n} \gg I_{\Phi}$), что делает невозможным управление фототоком.

В области II реализуется фотогальванический режим. Здесь ток фотодиода определяется как

$$I_{\text{ФД}} = \frac{U}{R_{\text{Н}}} = I_{\text{Ф}} - I_{p-n} = I_{\text{Ф}}(\Phi) - I_0 \exp\left(\frac{U}{\varphi_{\text{T}}} - 1\right), \quad (6.33)$$

где φ_{T} — тепловой потенциал; U — напряжение на диоде.

В режиме холостого хода, когда $R_{\text{Н}} \rightarrow \infty$, из формулы (6.33) можно найти максимальное значение фото-ЭДС при определенном световом потоке:

$$U_{\text{ХХ}} = \varphi_{\text{T}} \ln\left(1 + \frac{I_{\text{Ф}}}{I_0}\right). \quad (6.34)$$

При коротком замыкании напряжение на фотодиоде равно нулю ($U = 0$), а ток фотодиода создается потоком фотоносителей. У кремниевых фотодиодов фото-ЭДС составляет 0,5...0,55 В.

В фотодиодном режиме (ему соответствует область III) используется источник обратного напряжения $U_{\text{обр}}$. В этом режиме возникает потенциальный барьер и ток через переход I_{p-n} определяется током I_0 , который протекает при отсутствии излучения. При воздействии на $p-n$ -переход светового потока ток фотодиода

$$I_{\text{ФД}} = I_{\text{Ф}} + I_0 \approx I_{\text{Ф}}.$$

Вольт-амперная характеристика нагруженного резистора представляет собой прямую линию, уравнение которой имеет вид

$$U_{\text{обр}} - I_{\text{Ф}}R_{\text{Н}} = U_{\text{А}},$$

где $U_{\text{А}}$ — напряжение на фотодиоде в рабочей точке А, соответствующей световому потоку Φ_1 на рис. 6.6.

В рабочем диапазоне обратных напряжений фототок практически не зависит от сопротивления нагрузки, сопротивление диода постоянному току изменяется в широких пределах при изменении светового потока, поэтому иногда вместо термина «фотодиодный режим» используется термин «фоторезисторный режим». Сопротивление фотодиода переменному току на рассматриваемом участке велико и имеет тенденцию к уменьшению при больших значениях светового потока.

При больших значениях обратного напряжения (область IV на рис. 6.6) наблюдается лавинный пробой $p-n$ -перехода. Если с помощью сопротивления нагрузки ограничить большой обратный ток $p-n$ -перехода, наблюдаемый в этом случае, то можно реализовать фотоприемник, использующий обратимый электрический прибор, обладающий усилением фототока многократно по сравнению с фототоком в фотодиодном режиме. Этот эффект используется в лавинных фотодиодах (ЛФД).

6.4. ФОТОДИОДЫ С *p-i-n*-СТРУКТУРОЙ

Расширение частотного диапазона фотодиода без снижения его чувствительности возможно в *p-i-n*-структурах, как показано на рис. 6.7.

В *p-i-n*-структуре *i*-область заключена между двумя областями противоположного типа электропроводимости, ее удельное сопротивление в $10^6 \dots 10^7$ раз больше, чем сопротивление легированных областей *n*- и *p*-типа. При достаточно больших обратных напряжениях сильное и почти однородное электрическое поле напряженностью *E* распространяется на всю *i*-область.

Поскольку эта область может быть сделана достаточно широкой, такая структура создает основу для получения быстродействующего и чувствительного приемника. Дырки и электроны, появившиеся в *i*-области за счет поглощения излучения, быстро разделяются электрическим полем. Энергетическая диаграмма *p-i-n*-диода при обратном смещении представлена на рис. 6.8. Около 90% излучения поглощается непосредственно в *i*-области.

Повышение быстродействия обусловлено тем, что диффузия через базу, характерная для обычной структуры, в *p-i-n*-структуре заменяется дрейфом носителей через *i*-область в сильном электрическом поле.

Время дрейфа дырок $t_{др}$ через *i*-область шириной *h* составляет

$$t_{др} = \frac{h}{v_p} = \frac{h}{\mu_p E}, \tag{6.35}$$

где *E* — напряженность электрического поля в *i*-области; μ_p — подвижность дырок; $v_p = \mu_p E$ — скорость дрейфа дырок в электрическом поле.

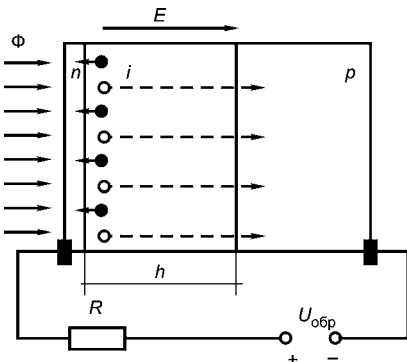


Рис. 6.7
Фотодиод с *p-i-n*-структурой

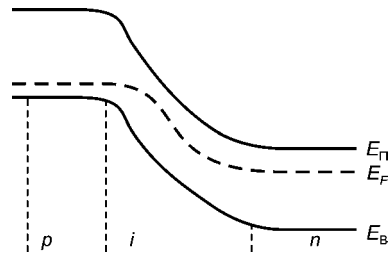


Рис. 6.8
Энергетическая диаграмма фотодиода с *p-i-n*-структурой

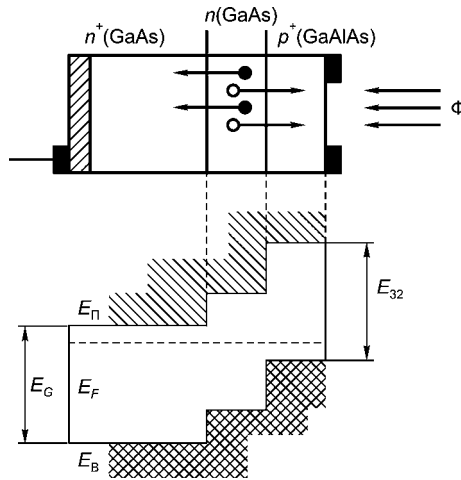


Рис. 6.9
Фотодиод с гетероструктурой

При напряженности электрического поля примерно $2 \cdot 10^6$ В/м достигается максимальная скорость дрейфа носителей $v = 6 \dots 8 \cdot 10^4$ м/с. В этом случае при $h = 10^{-2}$ см получим $t_{др} \approx 10^{-9} \dots 10^{-19}$ с. Диапазон частот для такого диода $\Delta f \approx 10^9$ Гц. Это быстродействующий кремниевый фотодиод.

Отношение времени дрейфа носителей через i -область в $p-i-n$ -фотодиоде к времени диффузии через базу можно записать в виде

$$\frac{t_{др}}{t_{диф}} \approx \frac{h/\mu_p E}{h^2/2D_p} = \frac{h^2/\mu_p U_{обр}}{h^2/2D_p} = \frac{2\varphi_T}{U_{обр}}. \quad (6.36)$$

Так как $D_p/\mu_p = KT/e = \varphi_T$, уже начиная с $U_{обр} = 0,1 \dots 0,2$ В, $p-i-n$ -фотодиоды имеют преимущество по быстродействию (рис. 6.9).

Таким образом, фотодиоды с $p-i-n$ -структурой отличают следующие основные достоинства:

- сочетание высокой чувствительности (на длине волны $\lambda \approx 0,9$ мкм практически достигнут теоретический предел чувствительности $S_\Phi \approx 0,7$ А/Вт) и высокого быстродействия;
- возможность обеспечения высокой чувствительности в длинноволновой области спектра при увеличении ширины i -области;
- низкая барьерная емкость;
- низкое рабочее напряжение в фотодиодном режиме, что обеспечивает электрическую совместимость $p-i-n$ -фотодиодов с интегральными микросхемами.

Таблица 6.1

Параметры отечественных $p-i-n$ -фотодиодов

№	Наименование	λ , мкм	I_m , нА	S , А/Вт	τ_6 , нс	C_{Φ} , пФ	$U_{\text{раб}}$, В
1	ФД-252	0,85	10	0,35	5	5	24
2	ФД252-01А	0,85	10	0,35	2	2	24
3	ФД252-01Б0	0,85	10	0,35	10	10	5
4	ФД324	0,85	5	0,4	10	10	5
5	ФД500	0,83	1	0,7	5	25	—
6	ФД40А	1,3	10	0,7	—	0,3	—
7	ФД70А	1,3	10	0,7	—	0,7	—
8	ФД250А	1,3	20	0,7	—	6	—
9	ФД500А	1,3	30	0,7	—	35	—
10	ФД40Б	1,55	10	0,8	—	0,3	—
11	ФД70А	1,55	10	0,8	—	0,7	—
12	ФД25-Б	1,55	20	0,8	—	6	—
13	ФД500Б	1,55	30	0,8	0,04	35	—
14	ФДМ-40	1,55	20	0,8	0,075	—	—
15	ФДМ-70	1,55	20	0,8	—	—	—
16	ФДМ-70А	1,3	10	0,5...0,6	—	1,2	—
17	ФДМ-70Б	1,55	10	0,5...0,6	—	1,2	—

К недостаткам $p-i-n$ -структуры следует отнести требование высокой чистоты i -базы и плохую технологическую совместимость с тонкими легированными слоями интегральных схем.

В табл. 6.1 приведены параметры отечественных $p-i-n$ -диодов.

6.5. ФОТОДИОДЫ ШОТТКИ

Упрощенная структура фотодиода с барьером Шоттки показана на рис. 6.10.

На подложке сильно легированного кремния n^+ выращивается тонкая эпитаксиальная пленка высокоомного полупроводника n -типа. Затем на тщательно очищенную поверхность материала n -типа напыляют тонкую ($\approx 0,1$ мкм) полупрозрачную пленку, а поверх нее — антиотражающее покрытие.

Структура и свойства контакта «металл–полупроводник» зависят от взаимного расположения уровней Ферми в металле ($U_{FМ}$)

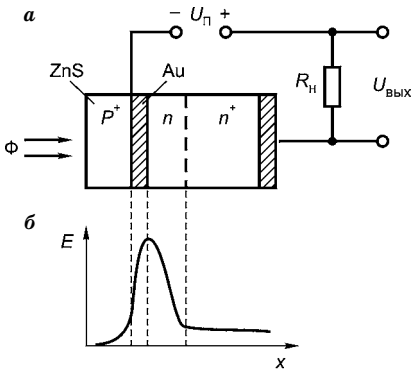


Рис. 6.10

Фотодиод с барьером Шоттки:

a — структура; *б* — распределение поля в структуре.

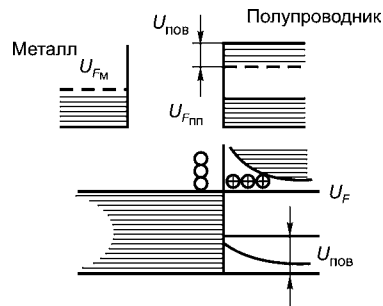


Рис. 6.11

Зонные диаграммы контакта «металл–полупроводник»

и полупроводнике ($U_{FПП}$). На рис. 6.11 показаны зонные диаграммы контакта «металл–полупроводник» для случая $U_{FМ} < U_{FПП}$.

При образовании контакта электроны переходят из полупроводника n -типа в металл. При этом вблизи границы металла и полупроводника создается объемный заряд положительных ионов доноров и, следовательно, электрическое поле.

Энергетические уровни вблизи поверхности полупроводника искривляются. Степень искривления уровней характеризуется поверхностным потенциалом $U_{пов}$. Его можно определить разностью потенциалов объема и поверхности полупроводника. При отсутствии внешнего напряжения и оптического излучения переход находится в равновесном состоянии. Это состояние характеризуется равновесным поверхностным потенциалом $U_{пов0}$. Потенциальный барьер в приконтактном слое называют барьером Шоттки. Его высота является аналогом внутреннего потенциального барьера в p - n -переходе. В зависимости от полярности приложенного внешнего напряжения высота барьера Шоттки и сопротивление приконтактного слоя будут меняться.

При приложении прямого напряжения $U_{пр}$ (положительный полюс к металлу, отрицательный — к полупроводнику n -типа) потенциальный барьер понижается, приконтактный слой обогащается основными носителями — электронами и сопротивление перехода «металл–полупроводник» становится меньше равновесного. Если изменить полярность внешнего напряжения, т. е. приложить к переходу обратное напряжение $U_{обр}$ (как показано на рис. 6.10*a*), то потенциальный барьер в контакте повышается.

В этом случае приконтактный слой еще сильнее обедняется основными носителями — электронами и повышается его сопротивление по сравнению с равновесным состоянием. Таким образом, контакт «металл–полупроводник» обладает выпрямляющими свойствами и может быть основой приборов, называемых диодами Шоттки.

Отличительной особенностью диодов Шоттки по сравнению с диодами на $p-n$ -переходе является отсутствие инжекции неосновных носителей. Диоды Шоттки используют движение основных носителей. В них отсутствуют медленные процессы, связанные с накоплением и рассасыванием неосновных носителей в базе диода.

В фотодиодах с барьером Шоттки существует возможность поглощения квантов излучения в металле контакта (если энергия квантов излучения меньше ширины запрещенной зоны). Если энергия кванта излучения больше высоты потенциального барьера, то возбужденные электроны из металла могут перейти в полупроводник через потенциальный барьер. В результате длинноволновая граница спектральной характеристики фотодиода сдвигается в сторону более длинных волн.

В фотодиоде Шоттки с ростом энергии квантов область поглощения излучения сдвигается в слой объемного заряда, где существует поле, разделяющее фотоносители. В фотодиоде с $p-n$ -переходом при малой глубине поглощения фототок практически равен нулю. Следовательно, коротковолновая граница спектральной характеристики фотодиода Шоттки расположена при более коротких волнах.

Перспективность применения фотодиодов Шоттки в оптоэлектронике объясняется следующими достоинствами:

- малым сопротивлением базы фотодиода. Поэтому постоянная времени барьерной емкости $C_{бар} r_B$ у фотодиодов Шоттки примерно равна 10^{-12} с, а инерционность определяется только временем пролета фотоносителей через область объемного заряда — $10^{-10} \dots 10^{-11}$ с;
- сочетанием высокого быстродействия и высокой чувствительности ($S_{ф} = 0,5$ А/Вт);
- простотой создания выпрямляющих фоточувствительных структур в самых разных металлах и полупроводниках и, следовательно, возможностью управления высотой потенциального барьера Шоттки. В частности, кремниевые фотодиоды с барьером Шоттки работают при $\lambda = 0,63$ мкм с быстродействием 10^{-10} с и фоточувствительностью $S_0 = 0,5$ А/Вт;

- хорошей совместимостью с оптическими интегральными микросхемами.

Для продвижения в длинноволновую область повышают удельное сопротивление базовой области и одновременно увеличивают ее толщину, т. е. переходят к структуре $m-i-n^+$, где m означает металл.

6.6. ФОТОДИОДЫ С ГЕТЕРОСТРУКТУРОЙ

Гетерофотодиодом называют прибор, имеющий переходной слой, образованный полупроводниковыми материалами с разной шириной запрещенной зоны.

Устройство и принцип действия этих приборов рассмотрим на примере фотодиода с гетероструктурой GaAs–GaAlAs, изображенного на рис. 6.12.

На подложке арсенида галлия n^+ -типа ($N_d \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$) методом жидкофазной эпитаксии последовательно наращивают сначала слой чистого нелегированного арсенида галлия n -типа ($N_d \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$), а затем слой p^+ -типа твердого раствора $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ ($N_d \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$). Обеспечение в растворе значения $X = 0,4$ приводит к различию ширин запрещенной зоны по разные стороны гетероперехода $\approx 0,4 \text{ эВ}$.

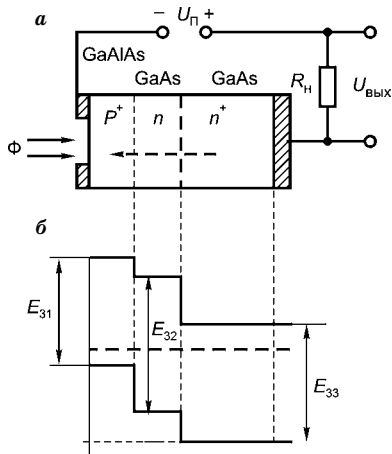


Рис. 6.12

Фотодиод с гетероструктурой:

a — структура; *б* — энергетическая диаграмма.

Слой GaAlAs играет роль широкозонного окна, пропускающего излучение, поглощаемого в средней n -области. Структура зонной диаграммы (рис. 6.12*б*) обеспечивает беспрепятственный перенос дырок, генерируемых в n -области, в p -область.

Толщина средней области выбирается так, чтобы обеспечить поглощение всей падающей мощности. При $\lambda \approx 0,85 \text{ мкм}$ достаточно иметь $h \approx 20 \text{ мкм}$. Высокая степень чистоты этой области обеспечивает малые рекомбинационные потери генерируемых светом носителей. Фоточувствительность гетерофотодиодов определяется эффективным временем жизни носителей в среднем слое, а вре-

мя переключения — толщиной этого слоя и напряженностью электрического поля. Применение совершенных гетероструктур (с низкой плотностью поверхностных состояний) открывает возможности создания фотодиодов с КПД, близким к 100%. Сочетание малого времени рассасывания неравновесных носителей заряда и малого значения барьерной емкости обеспечивает высокое быстродействие гетерофотодиодов. Такие приборы могут эффективно работать при малых обратных напряжениях. Подбирая пары полупроводниковых материалов, можно получать фотодиоды, работающие в любой части оптического диапазона длин волн. Это преимущество обусловлено тем, что в гетерофотодиоде рабочая длина волны определяется различной шириной запрещенных зон и не связана со спектральной характеристикой глубины поглощения.

Вследствие больших возможностей выбора материала базы фото-ЭДС гетерофотодиодов составляет 0,8...1,1 В — в 2...3 раза выше фото-ЭДС кремниевых фотодиодов. Основным недостатком гетерофотодиодов является присущая гетероструктурам сложность изготовления.

6.7. ЛАВИННЫЕ ФОТОДИОДЫ

Одним из путей создания быстродействующих фотоприемников с высокой чувствительностью является использование лавинного пробоя, в частности создание лавинных фотодиодов. Если поле в активной зоне фотодиода велико и энергия, приобретаемая фотоносителями тока (электронами и дырками) в этом поле, превышает энергию образования электронно-дырочных пар, то начинается лавинообразное размножение носителей.

Усиление первичного фототока в лавинном фотодиоде определяется коэффициентом лавинного размножения

$$K_i = \frac{I_\Phi}{I_{\Phi 0}}, \quad (6.37)$$

где I_Φ — ток на выходе фотодиода с учетом размножения; $I_{\Phi 0}$ — ток при отсутствии размножения.

Таким образом, коэффициент лавинного размножения в ЛФД является коэффициентом усиления фототока.

Известно, что коэффициент размножения зависит от напряжения на переходе:

$$K_i = \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{U_{\text{проб}}} \right)^m}, \quad (6.38)$$

где $U_{\text{проб}}$ — пробивное напряжение; U — напряжение на p - n -переходе; m — коэффициент, учитывающий вид и тип проводимости полупроводникового материала ($m = 1,5 \dots 2$ для кремния p -типа; $m = 3,4 \dots 4$ для кремния n -типа).

Тогда ВАХ лавинного фотодиода можно представить в виде

$$I_{\Phi} = \frac{I_{\Phi 0}}{1 - \left(\frac{U}{U_{\text{проб}}} \right)^m}. \quad (6.39)$$

Т а б л и ц а 6.2

Параметры лавинных фотодиодов

№	Наименование	λ , мкм	S , А/Вт	M	τ_6 , нс	C_{Φ} , нФ	$U_{\text{обр}}$, В	Применение
1	ФД-317Л	0,85	50	—	2...3,5	2	70...400	Si
2	ФД-322Л	1,3	10	—	0,2	1	< 40	Ge
		1,55						
3	ФД-323Л	1,3	8...10	—	0,22	1	30...50	Ge*
		1,55						
4	ЛФД-150	1,06	7...108	—	0,5	—	30...40	Ge
		1,3						
		1,55						
5	ЛФД-200	1,06	67,57	—	1	—	30...40	Ge
		1,3						
		1,55						
6	ЛФД-300	1,06	343,5	—	0,07	—	30...40	Ge
		1,3						
		1,55						
7	ЛФДГ-70	1,06	5...20 25...35 22...35	—	—	0,6...0,7	30...40	Ge
		1,3						
		1,55						
8	ЛФДГ-70Т	1,06	40...45	—	—	0,8...0,9	30...40	Ge
		1,3						
		1,55						
9	ЛФДГ-70ТЛ	1,3	32...45	—	—	0,8...0,9	30...40	Ge
		1,55						

* Термоэлектрический холодильник, $P_{\text{пот}} < 0,5$ Вт.

Скорость лавинного процесса очень большая: инерционность лавинных фотодиодов (рис. 6.13) характеризуется временем переключения ($10^{-8} \dots 10^{-9}$ с), а произведение коэффициента усиления фототока K_i и полосы частот достигает рекордных значений: $K_i f_{\text{гр}} \approx 10^{11}$ Гц. Предельно реализуемое значение K_i будет тем больше, чем меньше тепловой обратный ток фотодиода, поэтому при использовании кремния и арсенида галлия достигнут $K_i \approx 10^3 \dots 10^4$, а в случае германия обычно $K_i < 10^2$. У кремниевых и арсенид-галлиевых приборов ниже уровень шумов.

В режиме лавинного фотомножения успешно опробованы практически все диодные структуры: $p^+ - n$, $p - i - n$, $n - p - i - p^+$, барьер Шоттки.

Лавинные фотодиоды перспективны при обнаружении слабых оптических сигналов. Широкое применение лавинных фотодиодов связано со значительными трудностями. Причина в том, что в предпробойном режиме коэффициент усиления фототока K_i зависит от напряжения, поэтому лавинные диоды нуждаются в жесткой стабилизации рабочего напряжения путем термостатирования. Лавинным фотодиодам присущ большой разброс параметров у отдельных образцов. Высокие рабочие напряжения, низкий КПД преобразования затрудняют их использование в микросхемах.

Основные параметры ЛФД приведены в табл. 6.2.

6.8. ФОТОТРАНЗИСТОРЫ

Фотоприемные приборы, использующие транзисторные структуры с возможностью усиления фототока, называются *фототранзисторами*. Эти приборы содержат один (см. рис. 6.14 и 6.16) или несколько (см. рис. 6.17) транзисторов, включенных обычно по схеме с общим эмиттером.

В простейшем фототранзисторе, представленном на рис. 6.14, оптическое излучение попадает в рабочую область структуры — базу. Здесь обеспечивается генерация фотоносителей, которые

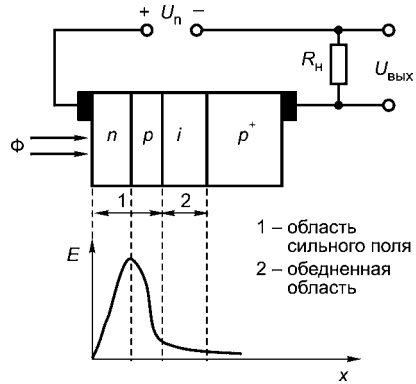


Рис. 6.13
Лавинный фотодиод:
а — структура; б — распределение поля в структуре.

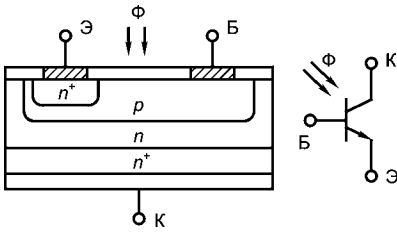


Рис. 6.14
Фототранзистор

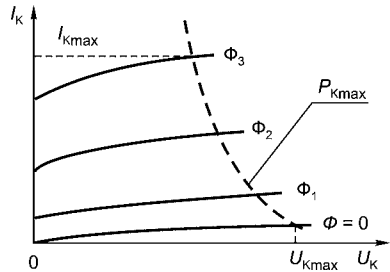


Рис. 6.15
Семейство ВАХ фототранзистора

затем разделяются $p-n$ -переходом. Разделение фотоносителей сопровождается дополнительным увеличением концентрации за счет механизма электрического усиления.

Дырки уходят через переход в p -область, а электроны остаются в базе. Поле, создаваемое объемным зарядом электронов, не может уменьшить заряд в базе за счет тока базы ($I_0 = 0$). Поэтому поле объемных зарядов снижает потенциальный барьер эмиттерного перехода, вызывая дополнительную инжекцию дырок в базу. Фототок в данном случае играет роль тока базы. Входные характеристики фототранзистора аналогичны характеристикам биполярного транзистора, т. е. по сравнению с обычным фотодиодом фототранзистор дает усиление тока, а интегральная чувствительность фототранзистора

$$S_{\Phi} = S_{\Phi Д} \beta, \tag{6.40}$$

где $S_{\Phi Д}$ — токовая чувствительность фотодиода, образованного эмиттерным переходом транзистора; β — коэффициент усиления тока транзистора (в системе h параметров $h_{210э}$).

Выходные характеристики фототранзистора приведены на рис. 6.15. Их особенностью является отсутствие четко выраженного участка насыщения коллекторного тока и неравномерное распределение семейства. Это объясняется нелинейностью люкс-амперной характеристики: фототок нарастает быстрее при высоком освещении.

Повышение чувствительности — главное преимущество фототранзистора перед фотодиодом. Однако это преимущество обычно достигается за счет снижения температурной стабильности прибора.

У фототранзисторов снижается также пороговая чувствительность, так как значительно возрастает тепловой ток:

$$I_T = I_{КО}(1 + \beta), \tag{6.41}$$

где $I_{КО}$ — тепловой ток транзистора.

Широкое применение фототранзисторов и улучшение параметров этих приборов затрудняет, в частности, следующее обстоятельство: высокий коэффициент передачи и малое время переключения требуют уменьшения толщины базовой области h_b , которое приводит к снижению фоточувствительности. Необходимость компромисса между указанными параметрами определяет относительно низкое быстродействие фототранзисторов — $10^{-6} \dots 10^{-5}$ с.

Повышение быстродействия возможно в интегральных фотоприемниках с внутренним усилением, которые представляют собой сочетание фотодиода и транзистора. Раздельная оптимизация структур позволяет получить чувствительный быстродействующий фотодиод и высококачественный транзистор в одной структуре, как показано на рис. 6.16. Такая структура эквивалентна быстродействующему фототранзистору с большим внутренним усилением тока.

Значительно повысить чувствительность позволяет применение фототранзистора, показанного на рис. 6.17. Связь между токами в составном транзисторе имеет вид

$$I_K = I_{K1} + I_{K2} = \beta_1 I_{61} + \beta_2 I_{62} = \beta_1 I_{61} + \beta_2 (1 + \beta) I_{61}. \quad (6.42)$$

Коэффициент усиления β составного транзистора определяется как

$$\beta \frac{I_{K1}}{I_{61}} = \beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \beta_2 \approx \beta_1 \beta_2. \quad (6.43)$$

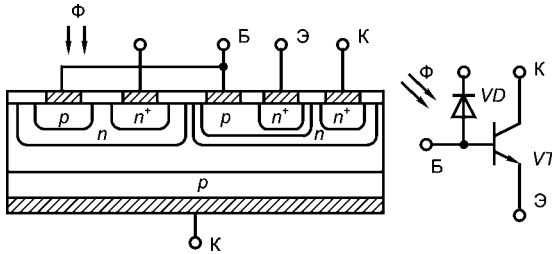


Рис. 6.16
Диодно-транзисторный фотоприемник

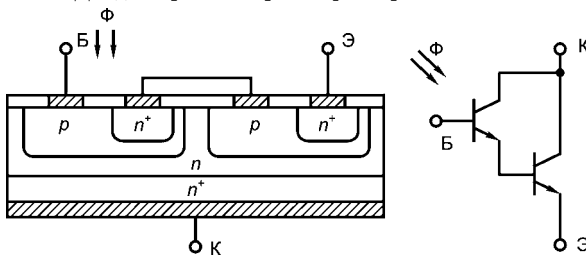


Рис. 6.17
Составной фототранзистор

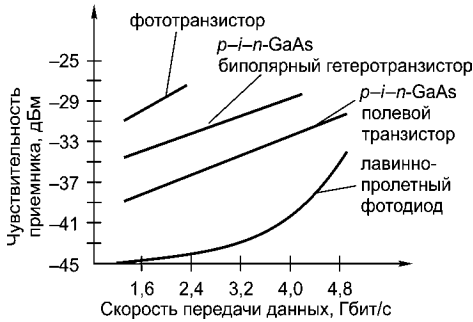


Рис. 6.18
Зависимость чувствительности оптических приемников от скорости передачи информации

В результате чувствительность составных фототранзисторов более чем в 10^3 раз превышает чувствительность фотодиодов.

Фотоприемные приборы, рассмотренные в разделах 6.3–6.8, широко используются при разработках волоконно-оптических систем передачи. Зависимость чувствительности оптических приемников от скорости передачи информации представлена на рис. 6.18.

6.9. ФОТОТИРИСТОРЫ

Фотоприемный прибор, имеющий три и более $p-n$ -переходов, в ВАХ которого есть участок отрицательного дифференциального сопротивления, называется фототиристором.

На рис. 6.19 изображена структура фототиристора с тремя $p-n$ -переходами. Крайние области такой структуры — p и n — называются эмиттерами, а примыкающие к ним переходы — эмиттерными; центральный переход получил название коллекторного. Между переходами находятся базовые области (p и n). Электрод, обеспечивающий контакт с n -эмиттером, называют катодом, а обеспечивающий контакт с p -эмиттером — анодом.

Рассмотрим работу фототиристора, когда к структуре приложено прямое напряжение (рис. 6.19). В статическом режиме по закону непрерывности тока для тока через коллекторный переход I_2 можно записать

$$I_{П2} = (I_{K0} + I_{Ф2}) + \alpha_1(I + I_{Ф1}) + \alpha_2(I + I_{Ф3}). \quad (6.44)$$

Из выражения (6.38) получим

$$I(1 - \alpha_1 - \alpha_2) = I_{K0} + \alpha_1 I_{Ф1} + I_{Ф2} + \alpha_2 I_{Ф3}, \quad (6.45)$$

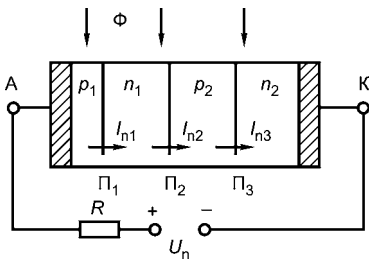


Рис. 6.19
Структура фототиристора

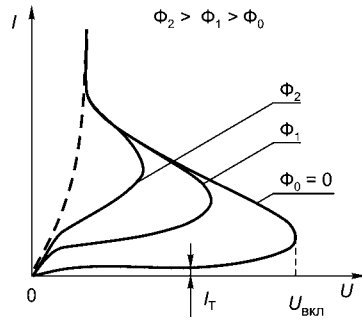


Рис. 6.20
Семейство ВАХ фототиристора

где $I_{\Phi 1}, I_{\Phi 2}, I_{\Phi 3}$ — фототоки, возникающие вследствие разделения соответствующим $p-n$ -переходом генерированных излучением носителей (в системе h параметров h_{2106}).

При отсутствии освещения, т. е. при $I_{\Phi 1} = I_{\Phi 2} = I_{\Phi 3} = 0$, получим выражение для ВАХ тиристора для случая двухэлектродного (динисторного) включения, которое определяет темновую характеристику фототиристора. При освещении ток I , протекающий через структуру, определяется совместным действием фототоков I_{Φ} через переходы и собственным током коллекторного перехода I_{K0} . Можно утверждать, что величина $\alpha_1 I_{\Phi 1} + I_{\Phi 2} + \alpha_2 I_{\Phi 3}$, которая изменяется с изменением уровня освещенности, играет роль тока управления в обычном тиристере, т. е. при воздействии потока излучения изменяется напряжение включения фототиристора.

На рис. 6.20 представлено семейство ВАХ фототиристора, освещаемого монохроматическим светом с различной мощностью излучения.

Фототиристоры являются перспективными приборами для переключения больших мощностей.

6.10. ФОТОРЕЗИСТОРЫ

В фоторезисторах используется явление изменения сопротивления вещества под действием инфракрасного, видимого или ультрафиолетового излучения. Основным элементом фоторезисторов является полупроводниковая пластина, сопротивление которой при освещении меняется. Механизм возникновения фотопроводимости можно объяснить следующим образом. В затемненном полупроводнике в результате воздействия тепловой энергии появляется

небольшое количество подвижных носителей заряда (электронов и дырок). Соответственно полупроводник будет обладать начальной проводимостью σ_0 , которая носит название темновой:

$$\sigma_0 = e(n_0\mu_n + P_0\mu_p), \quad (6.46)$$

где e — заряд электрона; μ_n — подвижность электронов; μ_p — подвижность дырок; n_0, P_0 — концентрация подвижных носителей заряда в полупроводнике в равновесном состоянии.

Под действием света концентрация подвижных носителей заряда увеличивается, причем возможны различные механизмы их генерации. Рост концентрации дырок и электронов может происходить за счет того, что кванты электромагнитного излучения возбуждают электроны и переводят их из валентной зоны в зону проводимости.

Когда электроны из валентной зоны переводятся на примесные уровни, повышается лишь дырочная электропроводность. И наконец, увеличение электропроводности наблюдается, когда электроны забрасываются с примесных уровней в зону проводимости.

Таким образом, в полупроводнике при облучении светом концентрация подвижных носителей заряда увеличивается тем или иным путем на величины Δn и ΔP , а его проводимость резко возрастает:

$$\sigma = e[(n_0 + \Delta n)\mu_n + (P_0 + \Delta P)\mu_p]. \quad (6.47)$$

Изменение электропроводности полупроводника под действием света и есть его *фотопроводимость*

$$\sigma_{\text{тм}} = \sigma - \sigma_0 = e(\Delta n\mu_n + \Delta P\mu_p). \quad (6.48)$$

При изменении яркости освещения изменяется фотопроводимость полупроводника.

При включении потока облучающего света интенсивность процесса генерации носителей заряда не сразу достигает стационарного значения, соответствующего интенсивности падающего, а нарастает со временем по экспоненциальному закону

$$\Delta n(t) = \alpha\eta\tau N(1 - e^{-t/\tau}), \quad (6.49)$$

где N — число фотонов, падающих в секунду на единицу площади; α — коэффициент поглощения, характеризующий энергию, поглощенную полупроводником; η — квантовый выход, определяющий число носителей заряда, образующихся при поглощении одного фотона; τ — время жизни неравновесных носителей заряда.

Если время облучения достаточно велико: $t \geq (3...5)\tau$, то концентрация неравновесных носителей заряда достигает стационарного значения. Причем когда электроны и дырки образуются парами при переходе электронов из валентной зоны в зону проводимости (собственное поглощение энергии полупроводником), число неравновесных дырок будет равно числу неравновесных электронов:

$$\Delta n = \Delta P = \alpha \eta \tau N. \tag{6.50}$$

При примесном поглощении, когда генерируются в основном носители заряда одного знака, будет иметь место или электронная, или дырочная фотопроводимость, которая в переходных режимах также изменяется по экспоненциальному закону:

$$\Delta n(t) = \Delta n e^{-t/\tau}. \tag{6.51}$$

Явление постепенного изменения σ_{Φ} при включении и выключении облучающего потока называют релаксацией фотопроводимости.

Конструктивно фоторезистор представляет собой пластину полупроводника, на поверхности которой нанесены электропроводные электроды. Принципиально возможны две конструкции фоторезисторов, представленные на рис. 6.21: поперечная (рис. 6.21а) и продольная (рис. 6.21б).

В первом случае электрическое поле, прикладываемое к фоторезистору, и возбуждающий свет действуют во взаимно перпендикулярных плоскостях, во втором — в одной плоскости. Очевидно, что в продольном фоторезисторе возбуждение осуществляется через электрод, прозрачный для этого излучения. Поперечный фоторезистор представляет собой почти омическое сопротивление до частот, составляющих несколько десятков и сотен мегагерц. Продольный фоторезистор из-за конструктивных особенностей имеет

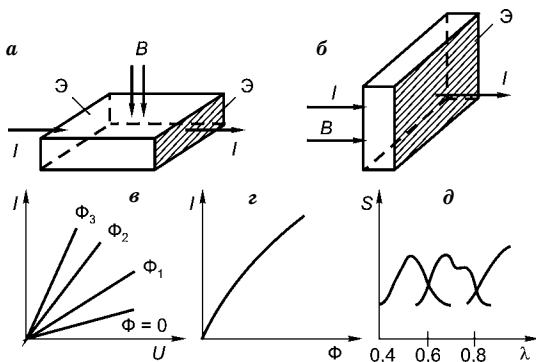


Рис. 6.21
 Поперечная (а) и продольная (б) конструкции фоторезисторов; вольт-амперные (в), энергетические (г), относительные спектральные (д) характеристики фоторезисторов

значительную геометрическую емкость, которая не позволяет считать его чисто омическим сопротивлением уже на частотах несколько сотен-тысяч герц.

В качестве исходного материала для фоторезисторов чаще всего используют сернистый таллий, селенистый теллур, сернистый висмут, сернистый свинец, теллуристый свинец, сернистый кадмий и т. д.

6.11. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ФОТОРЕЗИСТОРА

Вольт-амперная характеристика — это зависимость тока I , протекающего через фоторезистор, от напряжения U , приложенного к его выводам, при различных значениях светового потока Φ (в соответствии с рис. 6.21б). Ток при $\Phi = 0$ называется темновым током I_T , при $\Phi > 0$ — общим током $I_{\text{ОБЩ}}$. Разность этих токов равна фототоку

$$I_{\Phi} = I_{\text{ОБЩ}} - I_T. \quad (6.52)$$

Энергетическая характеристика — это зависимость фототока (фоторезистора) от светового потока при $U = \text{const}$, она представлена рис. 6.21г. В области малых Φ зависимость линейна, а при увеличении Φ рост фототока замедляется из-за возрастания вероятности рекомбинаций носителей заряда через ловушки и уменьшения их времени жизни. Энергетическая характеристика иногда называется люкс-амперной, тогда по оси абсцисс откладывается не световой поток, а освещенность E , выраженная в люксах.

Чувствительность. Для фоторезисторов чаще всего используют токовую чувствительность S , под которой понимают отношение фототока (или его приращения) к величине, характеризующей излучение (или его приращение). При отношении приращений чувствительность называют дифференциальной.

В зависимости от того, какой величиной характеризуется излучение, различают токовую чувствительность к световому потоку $\Phi - S_{\Phi} = I_{\Phi}/\Phi$ и токовую чувствительность к освещенности E :

$$S_E = \frac{I_{\Phi}}{E}. \quad (6.53)$$

В зависимости от спектрального состава излученного света чувствительность может быть либо интегральной $S_{\text{ИНТ}}$ (при некогерентном излучении), либо монохроматической S_{λ} (при монохроматическом излучении).

В качестве одного из основных параметров фоторезистора используют удельную интегральную чувствительность, которая ха-

рактирует интегральную чувствительность, когда к фоторезистору приложено напряжение один вольт:

$$S_{\text{Ф.инт.уд}} = \frac{I_{\text{Ф}}}{\Phi U}. \tag{6.54}$$

У промышленных фоторезисторов удельная интегральная чувствительность имеет пределы десятые доли–сотни мА/(В·лм) при освещенности $E = 200$ лк.

Абсолютная $S_{\text{абс}}(\lambda)$ и относительная $S(\lambda)$ спектральные характеристики. Абсолютная спектральная характеристика представляет собой зависимость монохроматической чувствительности, выраженной в абсолютных единицах, от длины волны регистрируемого потока излучения.

Относительная спектральная характеристика является зависимостью монохроматической чувствительности от длины волны, отнесенной к максимальной чувствительности:

$$S(\lambda) = S_{\text{абс}} \frac{\lambda}{S_{\lambda_{\text{max}}}}. \tag{6.55}$$

Спектральная характеристика определяется материалом фоторезистора и введенными в него примесями. На рис. 6.21*д* показаны спектральные характеристики фоторезисторов, выполненных на основе материалов CdS, CdSe, CdTe. Вид спектральной характеристики свидетельствует о том, что для фоторезисторов некоторых типов необходимо тщательно подбирать пару «излучатель–фотоприемник».

Граничная частота — это частота $f_{\text{гр}}$ синусоидального сигнала, моделирующего световой поток, при котором чувствительность фоторезистора уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с чувствительностью при немодулированном потоке ($f_{\text{гр}} \approx 10^3 \dots 10^5$ Гц).

В ряде случаев частотные свойства фоторезистора характеризуются переходной характеристикой, представленной на рис. 6.22*а, б*

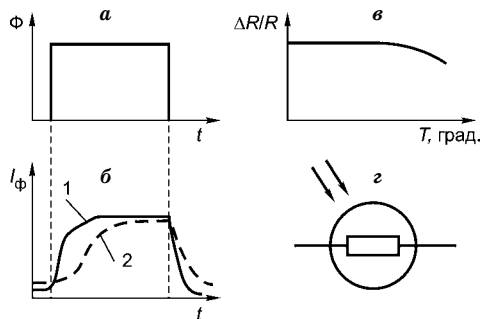


Рис. 6.22
Входной сигнал (*а*), переходная (*б*) и температурная (*в*) характеристики фоторезистора и его условное обозначение (*z*)

для полупроводника с высокой (кривая 1) и низкой (кривая 2) темновой проводимостью. Хотя истинная переходная характеристика обычно не является строго экспоненциальной, в большинстве случаев инерционность характеризуют постоянной времени t .

Температурный коэффициент фототока характеризует изменение параметров фоторезистора с изменением температуры:

$$\alpha_T = \frac{\partial I_{\Phi}}{\partial T} \frac{1}{I_{\Phi}} \Big|_{\Phi=\text{const}}. \quad (6.56)$$

У промышленных фоторезисторов $\alpha_T \approx -10^{-3} \dots 10^{-4}$ град $^{-1}$. Иногда используют температурную характеристику фоторезистора, отражающую относительное изменение сопротивления при изменении температуры окружающей среды, представленное на рис. 6.22в.

Пороговый поток — это минимальное значение потока Φ_{Π} , которое может обнаружить фоторезистор на фоне собственных шумов. Определяется Φ_{Π} как среднеквадратичный синусоидально-модулированный световой поток, при воздействии которого среднеквадратичный выходной электрический сигнал равен среднеквадратичному значению шумов фоторезистора.

6.12.

ПЗС-ПРИЕМНЫЕ ФОТОПРИБОРЫ

Фоточувствительный прибор с зарядовой связью (ФПЗС) представляет собой фоточувствительную ИМС со структурой МДП (то же) с системой диодов, расположенных на поверхности диэлектрика так близко друг к другу, что их взаимное влияние становится существенным. Электрические поля соседних электродов перекрываются внутри кристалла полупроводника.

Электроды располагаются в виде линейки (строки) или матрицы. Типичные размеры электрода: длина 5 мкм, ширина 40 мкм. Зазоры между электродами 1...2 мкм. Число электродов в матричном ФПЗС может превышать 10^6 .

Функционально ФПЗС — это прибор, воспринимающий изображение, осуществляющий его разложение на элементарные фрагменты, сканирование (поэлементное электронное считывание) и формирование на выходе видеосигнала, адекватного изображению.

Принцип действия ФПЗС можно пояснить с помощью классической трехтактной схемы управления, представленной на рис. 6.23.

Элементарная ячейка ФПЗС содержит три соседних электрода 1, 2, 3 одной строки. В течение первой фазы к электроду 2 прикладыва-

ется положительное напряжение хранения $U_{ХР} = 10...20$ В. Благодаря возникающему электрическому полю основные носители дверки оттесняются в глубь полупроводника, а у поверхности образуется обедненный слой глубиной $0,5...2$ мкм, представляющий собой потенциальную яму для электронов. Освещение поверхности порождает в объеме полупроводника электронно-дырочные пары. При этом электроны втягиваются в потенциальную яму и локализуются в тонком (около 10 нм) приповерхностном слое. Накопление электронов ведет к образованию зарядового пакета, который определяется локальной интенсивностью и временем засветки. Зарядовый пакет может сохраняться относительно долго (от 1 до 100 мс), однако постепенно термогенерация электронов объемными и поверхностными ловушками приводит к искажению хранимой информации.

Во время второй фазы к электроду 3 прикладывается напряжение считывания $U_{сч}$, превышающее напряжение $U_{ХР}$. Вследствие близости электродов 2 и 3 барьер между ними исчезает и зарядовый пакет перетекает в более глубокую потенциальную яму. На этой фазе частичная потеря информации происходит так: часть электродов зарядового пакета рекомбинирует при взаимодействии с поверхностными ловушками, а часть пропадает вследствие неполного перетекания зарядов. Во время третьей фазы напряжение на электроде 3 уменьшается до напряжения хранения $U_{ХР}$, а с электрода 2 потенциал снимается. На электродах, к которым не приложено напряжение хранения или считывания, все время поддерживается небольшое напряжение смещения. Электрод 1 в этом процессе играет роль буфера. Иначе справа от электрода 2 оказался бы электрод 3 предыдущей ячейки и во втором такте зарядовый пакет равновероятно мог бы перетекать как вправо, так и влево.

Управление ФПЗС желательно осуществлять не прямоугольными, а трапециидальными импульсами, подаваемыми на электроды с небольшим временным перекрытием. В конце каждой строки имеется элемент вывода, например n^+ -область под последним

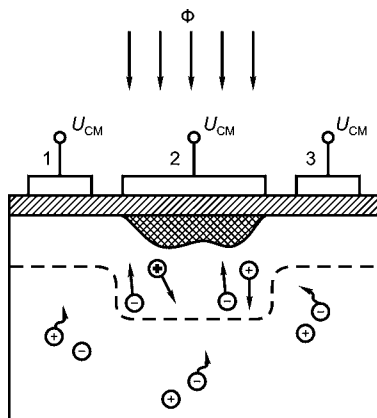


Рис. 6.23
Трехфазная схема управления ФПЗС

электродом. Вытекающий через $p-n$ -переход зарядовый пакет создает на нагрузочном резисторе выходной сигнал.

Аналогичный элемент в начале строки служит для тактового введения (электрическим путем) в ФПЗС фоновых постоянных зарядовых пакетов, призванных «забить» поверхностные ловушки и ослабить их негативное действие. Фоновые заряды обеспечивают оптимальный рабочий режим (аналогично смещению, используемому в электронных усилительных зарядах).

Таким образом, в ФПЗС пространственное распределение интенсивности излучения преобразуется в рельеф электрических зарядов, локализующихся в приповерхностной области. Зарядовые пакеты перемещаются от элемента к элементу, выводятся наружу и дают последовательность видеоимпульсов, адекватную полю излучения, — так осуществляется стандартный телевизионный алгоритм восприятия образца.

В матричных ФПЗС весь кадр образуется одновременно, в линейных — последовательно, путем дополнительной развертки по второй координате.

6.13. ФОТОДИОДНЫЕ СБИС НА ОСНОВЕ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

В настоящее время, помимо совершенствования ФПЗС, проводятся интенсивные разработки КМОП-ФД с внутрикристалльными схемами управления и обработки изображения.



Рис. 6.24
Структурная схема
КМОП-ФД СБИС

Рассмотрим принцип работы КМОП-ФД. СБИС содержит матрицу активных фоточувствительных элементов (активных пикселей), схемы управления, аналоговые усилители считывания на выходе каждого столбца, АЦП и ряд других цифровых блоков, как показано на рис. 6.24.

В таких матрицах схемы управления могут реализовывать произвольную координатную выработку сигналов, что значительно расширяет возможности фильтрации и обработки (в том числе параллельной) сигналов изображения. Задачи выделения окна интерфейса (ОИ), в котором расположена цель, и слежения за этой целью

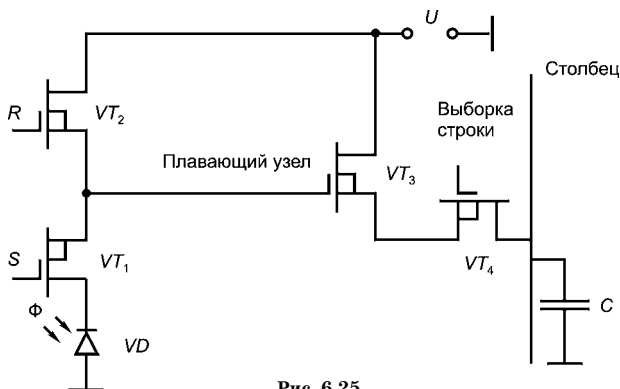


Рис. 6.25
Схема активного пикселя

решаются путем считывания сигналов только требуемых элементов. А поскольку он занимает небольшую часть кадра, то скорость считывания с ФПЗС, в которых необходимо считывать весь кадр, может быть значительно увеличена.

Активный элемент, изображенный на рис. 6.25, образован фотодиодом (ФД) и четырьмя транзисторами, которые выполняют функции считывания заряда, накопленного фотодиодом.

На транзисторе VT_3 выполнен истоковый повторитель; транзистор VT_4 является элементом выборки строк. В режиме интегрирования сигналов изображения импульс R , подаваемый на транзистор VT_2 , равен нулю. Фотодиод накапливает фотогенерируемые электроны. По мере их накопления потенциал диода уменьшается. В результате потенциал общего узла — соединения транзисторов VT_1, VT_2, VT_3 — оказывается плавающим. В режиме выборки на транзистор VT_2 поступает импульс восстановления $R = 1$, транзистор VT_2 открывается и потенциал плавающего узла восстанавливается до исходного. Затем на все активные элементы выбранной строки подается импульс $S = 1$, который поступает на затвор транзистора VT_1 , открывая его. После прихода импульса выборки строки $RS = 1$ открывается транзистор VT_4 . Транзисторы VT_3, VT_4 и общий нагрузочный транзистор столбца образуют истоковый накопитель, и на шину столбца поступает усиленный по мощности сигнал ФД. Коэффициент передачи по напряжению истокового повторителя близок к единице. На шины столбцов подаются считанные сигналы всех элементов выбранной строки. Дешифратор столбцов последовательно выбирает сигналы шин и передает их на схему аналоговой обработки сигналов отдельных активных элементов матрицы. После окончания режима считывания сигнал

$RS = 0$ и транзистор VT_4 закрывается. Начинается накопление зарядов следующего кадра изображения.

Основное преимущество КМОП-ФД перед ФПЗС — возможность интеграции на одном кристалле функций приема и обработки изображения (возможна реализация однокристалльной камеры с цифровым выходом). Достоинствами КМОП-ФД являются низкая потребляемая мощность, возможность программирования интересующих пользователя окон и высокая скорость считывания данных. Основные недостатки в сравнении с ФПЗС: высокий уровень шума, обусловленный тем, что активный элемент содержит несколько МОП-транзисторов и несколько шин; низкая фоточувствительность, высокий темновой ток, большой активный элемент, низкая разрешающая способность.

Для устранения шума в процессе восстановления в КМОП-ФД было предложено заменить фотодиод фоточувствительным затвором, в потенциальной яме которого накапливаются фотогенерируемые сигнальные заряды.

Согласно схеме, представленной на рис. 6.26, в режиме считывания на затвор транзистора VT_1 подается отпирающий его импульс восстановления $R1$. Потенциал плавающего затвора восстанавливается до исходного уровня. Потенциальный импульс передачи открывает дополнительный затвор, накопленный сигнальный заряд перетекает в плавающий узел, и потенциальная яма фоточувствительного затвора освобождается. Потенциал узла понижается на величину заряда. Такая схема позволяет выполнить двойную кор-

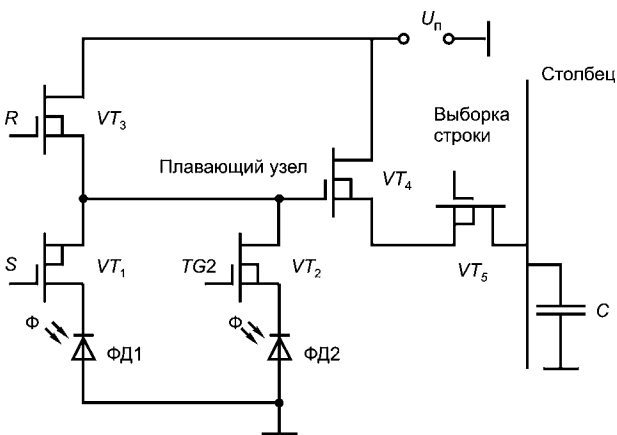


Рис. 6.26
Электрическая схема малошумящего элемента
с совмещенным элементом

реляционную выборку (ДКВ), которая практически устраняет шум процесса восстановления.

В этом случае после восстановления плавающего потенциального узла на затвор транзистора VT_3 передается открывающий его импульс выборки строки $RS1$. Начальное напряжение на затворе

Таблица 6.3

Основные параметры ФПЗС и КМОП-ФД

Параметр	ФПЗС	КМОП-ФД
Минимальный размер пиксела, мкм	3...5	6...8
Максимальный формат пиксела	4080×4080	2000×2000
Минимальный шум считывания на частоте 10 МГц, число электронов	8...10 (устройство для астрономических наблюдений и специального назначения), 20...25 (устройства бытового и промышленного назначения)	20...40
Темновой ток, нА/см ²	0,01...1	2...5
Фактор заполнения FF , %	70...90	30...50
Потребляемая мощность при частоте 30 кадров в секунду, мВт/пиксел	0,03...0,1	0,6...0,9 (для однокристалльной камеры)
Неоднородность чувствительности, %	2...3	3...5
Динамический диапазон, дБ	60...70	50...60 (90 — при логарифмическом выходе)
Произвольная выборка сигналов изображения в требуемых окнах	Отсутствует	Реализуется
Интеграция дополнительных функций на кристалле	Простые аналоговые функции обработки	Программируемые цифровые и аналоговые функции
Внешние управляющие сигналы	Источник питания на 5...12 В и 3...9 фазовых импульсов	Источник питания на 2,5...5 В и один синхронимпульс
Технология производства	Специальная	Отлаженная КМОП-технология
Реализация цифровой камеры	ФПЗС, СВИС, управление и АЦП	Однокристалльные
Предпочтительные области применения	Научные, космические, медицинские системы	Однокристалльные бытовые (фото- и видеокамеры), автомобильные охранные системы, видеотелефоны

транзистора VT_2 , в которое входит и шум восстановления, через истоковый повторитель передается на шину столбца и запоминается на ее выходе. При поступлении на плавающий затвор сигнального заряда напряжение на транзисторе VT_2 понижается на величину поступившего заряда и также передается на выход шины столбца. В результате выходной сигнал представляет собой разность напряжений транзистора VT_2 , что и позволяет устранить шум восстановления. Недостаток схемы с фоточувствительным затвором — снижение фоточувствительности, обусловленное низкой прозрачностью затвора в сравнении с фотодиодом.

В табл. 6.3 приведены основные параметры ФПЗС и КМОП-ФД.

6.14. ПИРОТЕХНИЧЕСКИЕ ФОТОПРИЕМНИКИ

Работа пиротехнических фотоприемников (ПФП) основана на пироэлектрическом эффекте кристаллов, сущность которого заключается в изменении поляризации пироактивного кристалла при изменении температуры на его гранях. Поляризация кристалла — это пространственное разделение зарядов, при котором на одной из его граней возникает положительный заряд, а на другой — отрицательный. Поляризация происходит спонтанно в отсутствие внешнего электрического поля при постоянной температуре. Однако при постоянстве температуры поверхностные заряды компенсируются объемной и поверхностной проводимостью кристалла и не могут быть обнаружены.

Поэтому пироэлектрический эффект возможен только при изменении температуры кристалла во времени. Этот эффект наблюдается при приеме модулированного или импульсного излучения.

Пироэлектрический ток при изменении температуры пироактивного кристалла можно определить по формуле

$$I = \frac{dP_c}{dt} = \left(\frac{dP_c}{dT} \right) \left(\frac{dT}{dt} \right) = \gamma \left(\frac{dT}{dt} \right), \quad (6.57)$$

где P_c — коэффициент спонтанной поляризации; T — температура; γ — пироэлектрический коэффициент.

Если облученный кристалл подключить к внешнему сопротивлению нагрузки и представить его как генератор тока, то можно определить интегральную чувствительность пирокристалла:

$$S_u = \frac{A_\Phi \omega \alpha \gamma R_s}{C_o G (1 + \omega^2 \tau_T^2)^{1/2} (1 + \omega^2 \tau_s^2)^{1/2}}, \quad (6.58)$$

где A_{ϕ} — площадь приемной площадки fotocувствительного элемента; α — коэффициент поглощения; R_3 — эквивалентное сопротивление нагрузки; C_0 — суммарная емкость кристалла и нагрузки (входной емкости усилителя); ω — круговая частота модуляции потока; τ_T — тепловая постоянная времени; $\tau_T = C/G$ (отношение теплоемкости кристалла C и коэффициента теплопотерь G); $\tau_3 = R_3 C_0$ — электрическая постоянная времени.

Большое влияние на основные параметры пироэлектрических приемников оказывает пироэлектрический коэффициент γ . Максимальное значение пироэлектрический коэффициент принимает при температуре кристалла, близкой к температуре фазового перехода (так называют точки Кюри). Большинство типов фотоприемников, использующих внутренний фотоэффект, обладают избирательной чувствительностью. Тепловые же фотоприемники, использующие пироэффект, отличаются практически равномерной чувствительностью во всем рабочем диапазоне длин волн. Пироприемники типа МГ30, МГ32, разработанные НПП «Восток» (Новосибирск), работают в диапазоне 2...20 мкм.

Пироэлектрические приемники излучения, будучи, по существу, емкостными элементами, характеризуются очень высоким внутренним сопротивлением ($10^{10} \dots 10^{11}$ Ом) и низкими выходными токами ($10^{-12} \dots 10^{-13}$ А). Это создает значительные трудности при согласовании их со входными каскадами усилителей. К входным цепям усилительных устройств, работающих совместно с пироэлектрическими приемниками, предъявляется ряд специфических требований: высокое входное сопротивление, малая входная емкость, низкий уровень собственных шумов. Совокупности этих требований удовлетворяют полевые транзисторы и усилители на их основе.

Принципиальная электрическая схема устройства, содержащего пироэлектрический элемент, подключенный к интегральному операционному усилителю с входным дифференциальным каскадом усиления на основе полевых транзисторов, приведена на рис. 6.27.

Основные параметры такого устройства — напряжение выходного сигнала и напряжение шума, приведенное ко входу в единичной полосе частот.

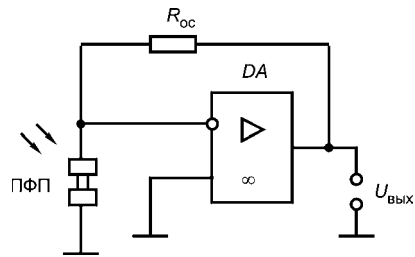


Рис. 6.27
Схема устройства с пироприемником

Напряжение выходного сигнала определяется как

$$U_{\text{вых}} = \Phi S_u \omega R_n C_n \left[\frac{1 + (\omega \tau_{\text{oc}})^2}{1 + (\omega \tau_n)^2} \right]^{-1/2}, \quad (6.59)$$

где $\tau_n = R_n C_n$; R_n — сопротивление нагрузки пироэлектрического элемента; C_n — собственная емкость пироэлектрического элемента; τ_n — постоянная времени пироэлектрического элемента; Φ — поток, воспринимаемый пироэлектрическим элементом.

Напряжение шума, приведенное ко входу в единичной полосе частот:

$$U_{\text{ш. вх}} = \left[\frac{4KT}{(\omega C_n)^2 R_n} + \frac{2eI_3}{(\omega C_n)^2} + \frac{4KT \operatorname{tg} \alpha}{\omega C_n} + K_f \frac{(\omega C_n)^2}{f} \right], \quad (6.60)$$

где I_3 — ток затвора входного полевого транзистора; T — температура окружающей среды; α — угол потерь пироэлектрического элемента; K — постоянная Больцмана; ω — круговая частота; e — заряд электрона; K_f — спектральная плотность напряжения шума входного транзистора усилителя на заданной частоте f .

В формуле (6.60) первый член представляет собой составляющую теплового шума входного сопротивления, второй — состав-

Таблица 6.4

Параметры полупроводниковых фотоприемников и фотоприемных матриц

Вид устройств	Определяющие параметры	Технические показатели 2000 г.		Достигнутые параметры отечественных ИЭТ	
		Уровень РФ	Зарубежный уровень	2003 г.	2005–2010 гг.
Фотоприемники и матрицы среднего ИК-диапазона	Длина волны 3...5 мкм. Чувствительность, А/Вт	0,01	0,03	0,02	0,04
Фотоприемники УФ-диапазона для систем пожарной безопасности, спецтехники, для использования в медицине и экологии	Длина волны 0,35 мкм. Чувствительность, А/Вт	0,03	0,10	0,06	0,12
Высокочувствительные фотоприемники для магистральных волоконно-оптических линий связи	Длина волны 1,0...1,6 мкм. Чувствительность, А/Вт	0,1	0,3	0,4	0,5

ляющую дробового шума входного полевого транзистора, третий — составляющую шума пирозлектрического элемента, четвертый — составляющую шума усилителя, приведенного ко входу.

В табл. 6.4 представлена хроника совершенствования полупроводниковых фотоприемников.

Тестовые вопросы к главе 6
**«ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ
ФОТОПРИЕМНЫЕ ПРИБОРЫ»**

6.1. На каком эффекте основана работа полупроводниковых фотоприемников:

- а) рекомбинации электронов и дырок;
- б) генерации электронов и дырок за счет электрического тока;
- в) разделения электрон-дырочных пар под действием фотонов;
- г) образования электрон-дырочных пар под действием фотонов?

6.2. Какие меры нужно предпринять для повышения быстродействия фотодиода на основе $p-n$ -перехода:

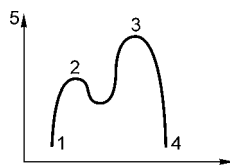
- а) использовать механизм диффузии фоторезисторов;
- б) использовать механизм дрейфа фотоносителей;
- в) увеличить площадь $p-n$ -перехода;
- г) уменьшить площадь $p-n$ -перехода?

6.3. Как используется закон Бугера в оптоэлектронике:

- а) позволяет рассчитать числовую апертуру;
- б) позволяет определить фоточувствительность приемника;
- в) позволяет оценить степень поглощения света в твердом теле;
- г) позволяет определить граничную длину волны фотоприемника?

6.4. Укажите на рисунке граничную длину волны фотоэффекта:

- а) 1;
- б) 2;
- в) 3;
- г) 4.



6.5. Что называют фотодиодом с барьером Шоттки:

- а) прибор, в котором используется слой с собственной проводимостью;
- б) прибор, в котором используется металлический слой внутри структуры;
- в) прибор, в котором используется гетеропереход внутри структуры;
- г) прибор, в котором используется внутри структуры слой с низким сопротивлением?

6.6. Что называют гетерофотодиодом:

- а) прибор, в котором используется контакт «металл-проводник»;
- б) прибор, в котором используется слой с высокой проводимостью;
- в) прибор, в котором используется слой с низкой проводимостью;
- г) прибор, в котором используются полупроводниковые материалы с разной шириной запрещенной зоны?

6.7. Каковы особенности ЛФД-фотоприемников:

- а) фотодиффузионный режим;
 б) низкий уровень собственных шумов;
 в) возможность усиления фототока;
 г) повышенный уровень собственных шумов?
- 6.8. Что предусматривается в структуре фотоприемника для повышения чувствительности:
 а) короткая поглощающая свет область;
 б) длинная поглощающая свет область;
 в) узкая поглощающая свет область;
 г) оптические контакты с низким сопротивлением.
- 6.9. В какой области фотоносители перемещаются, используя механизм дрейфа:
 а) оптических контактов;
 б) p - n -перехода;
 в) в пассивной p -области;
 г) в пассивной n -области?
- 6.10. По какой формуле можно рассчитать токовую чувствительность к освещенности:
 а) $S_{\Phi} = \frac{I_{\Phi}}{\Phi_V}$;
 б) $S_{\Phi} = \frac{I_{\Phi}}{E_V}$;
 в) $S_{\Phi} = \frac{V_{\Phi}}{\Phi_l}$;
 г) $S_{\Phi} = \frac{V_{\Phi}}{E_l}$?

ОПТРОНЫ

7.1. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ОПТРОНОВ

Оптронами называются оптоэлектронные приборы, в которых имеются излучатели и фотоприемники и используются оптические и электрические связи, а также конструктивно соединенные друг с другом элементы. Некоторые разновидности оптронов известны как оптопары, или оптоизоляторы.

Принцип действия любого оптрона основан на двойном преобразовании энергии. В излучателях энергия электрического сигнала преобразуется в оптическое излучение, а в фотоприемниках наоборот: оптический сигнал вызывает электрический ток либо напряжение или приводит к изменению сопротивления фотоприемника.

Наибольшее распространение получили оптроны с внешними электрическими выходами и выходными сигналами и внутренними оптическими сигналами. Схематично один из таких приборов представлен на рис. 7.1.

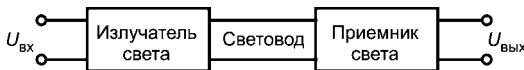


Рис. 7.1

Вариант конструкции широко распространенного типа диодно-диодного оптрона с внутренней оптической связью

В электрической схеме подобный оптрон выполняет функцию выходного элемента — фотоприемника с одновременной электрической изоляцией (гальванической развязкой) входа и выхода. Излучатель является источником фотонов, в качестве которого может служить светодиод или миниатюрная лампа накаливания. Оптической средой может быть воздух, стекло, пластмасса или волоконный световод. В качестве фотоприемников используются

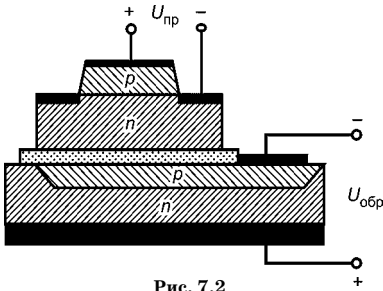


Рис. 7.2

Пример конструкции широко распространяемого типа диодного оптрона с внутренней оптической связью

фотодиоды, как в конструкции, изображенной на рис. 7.2, а также фототранзисторы, фототиристоры и фоторезисторы.

Очень часто используются интегральные фотодиодно-транзисторные структуры. Различные комбинации этих элементов позволяют получить весьма разнообразные входные, выходные и передаточные характеристики.

На практике применяется и другая разновидность оптронов: использующая внешние входные и выходные оптические сигналы и внутренние электрические сигналы, как показано на рис. 7.3. Обычно такие приборы имеют усилители фототока.

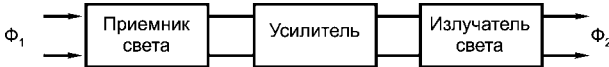


Рис. 7.3

Оптон с внешней оптической связью

В отдельных случаях применяются оптроны, одновременно использующие оптические и электрические связи; один из возможных вариантов представлен на рис. 7.4.

С конструкторско-технологической точки зрения излучатель и фотоприемник равноправны. Эффективность преобразования энергии и срок службы оптрона в основном определяет излучатель. При разработке излучателя для оптрона основная трудность заключается в оптимизации согласования с фотоприемником. К параметрам, подлежащим оптимизации, относятся коэффициент усиления, ширина полосы частот, размеры оптического окна, электрические характеристики. Поскольку желательно иметь малое последовательное сопротивление, наилучшим вариантом является излучатель на основе GaAs. Стараются добиться малого прямого напряжения, но это менее важно, чем оптимизация усиления частотной

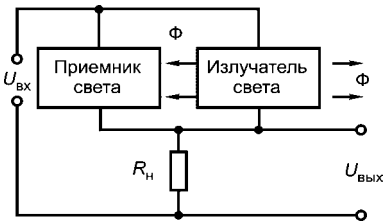


Рис. 7.4

Оптон, одновременно использующий оптические и электрические связи

полосы.

Требования к виду оптического окна излучателя и светодиода существенно различаются. Светодиоды изготавливают с кольцевой излучающей областью площадки, чтобы получить высокий коэффициент отношения площади видимой излучающей области к общей площади. В оптроне излучающая область должна быть настолько малой, насколько это совместимо с допустимой плотностью тока, а контактная площадка размещена так, чтобы минимально затемнилась излучающая область. Смещение контактной площадки создает минимальное затемнение (затенение) излучающей области и обеспечивает лучшую связь с приемником. Малый размер излучающей области позволяет уменьшить краевые потери как тока, так и излучения и обеспечить постоянство условий связи независимо от разброса величины зазора и точности совмещения светодиода с чувствительной областью фотоприемника у различных образцов оптронов.

При выборе оптической среды ее изолирующие свойства играют определяющую роль, если расстояние между излучателем и приемником очень мало. Если же расстояние велико, например при использовании волоконной оптики, линз или другой среды (отражающей или пропускающей), изолирующие свойства менее важны. Зато большое значение приобретает спектр пропускания, особенно если применяются пластмассы. В большинстве оптронов для уменьшения потерь на френелевское отражение от поверхности излучателя и приемника используют просветляющие покрытия. При этом одновременно выполняется изоляция, так как материалы покрытий не являются проводниками электрического тока. Во многих типах оптронов для создания хорошей изоляции между излучателем и приемником применяют слой пленки из прозрачного фторопласта. Оптическая изоляция позволяет получить прибор, обеспечивающий оптическую связь сигналов двух отдельных электронных устройств, несмотря на то что устройства гальванически развязаны. Напряжение изоляции такого прибора может достигать 1000 В.

Принципиальные физические достоинства оптронов, как уже отмечалось, обусловленные использованием фотонов в качестве носителей информации, заключаются в обеспечении очень высокой электрической изоляции входа и выхода, однонаправленности потока информации, отсутствии обратной связи — с выхода на вход в широкой полосе пропускания.

Кроме того, важными достоинствами оптронов являются:

- возможность бесконтактного (оптического) управления электронными объектами и обусловленные ею разнообразие и гибкость конструкторских решений управления;

- невосприимчивость оптических каналов связи к воздействию электромагнитных полей, что в случае оптронов с протяженным оптическим каналом обуславливает высокую помехозащищенность, а также исключает взаимные наводки;
- возможность создания функциональных микроэлектронных устройств с фотоприемниками, характеристики которых под действием оптического излучения изменяются по заданному (сколь угодно сложному) закону;
- расширение возможностей управления выходным сигналом оптрона путем воздействия (в том числе и неэлектрического) на материал оптического канала и, как следствие, создание разнообразных датчиков и приборов для передачи информации.

Современным оптронам присущи и определенные недостатки:

- низкий КПД, обусловленный необходимостью двойного преобразования энергии (электричество–излучение–электричество), и значительная потребляемая мощность;
- сильная зависимость параметров от температуры;
- высокий уровень собственных шумов;
- конструктивно-технологическое несовершенство, связанное в основном с использованием гибридной технологии.

Перечисленные недостатки оптронов устраняются по мере совершенствования материалов, технологии, схемотехники. Широкое применение оптронов определяется прежде всего неповторимостью достоинств этих приборов.

7.2. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ОПТРОНА

На рис. 7.5 приведена типовая структурная схема оптрона.

Входное устройство ВхУ служит для преобразования входных сигналов в такие, которые обеспечивают эффективную работу излучателя И. При запуске оптрона, например от логической интегральной микросхемы, необходимо обеспечить усиление тока с 0,1...1 до 10...15 мА. Дополнительные требования к входному устройству

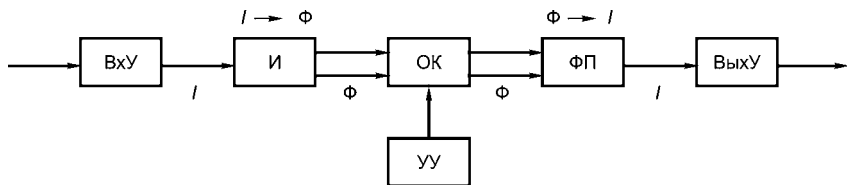


Рис. 7.5
Структурная схема оптрона

ройству: экономичность, достаточно высокое быстродействие (не снижающее быстродействия оптрона в целом).

Основные требования, предъявляемые к излучателю оптрона, состоят в достижении высокого КПД электронно-оптического преобразования, высокого быстродействия и узкой направленности излучения. Кроме того, обычно желательно, чтобы минимальный входной ток был невелик (примерно 1 мА); для линейных систем важен также широкий динамический диапазон входных токов, т. е. широкий диапазон токов, в котором квантовая эффективность излучателя и соответственно коэффициент передачи по току оптрона постоянны.

Назначение оптического канала ОК — максимально полная передача энергии оптического сигнала от излучателя И к фотоприемникам ФП, которая требует высокого пропускания оптического сигнала без искажения формы. При этом необходимо обеспечить минимальное рассеяние излучения в стороны во избежание влияния на другие чувствительные к оптическому сигналу элементы устройства и максимальную защиту от внешнего излучения во избежание ложных срабатываний оптрона.

Принципиальная возможность управления свойствами оптического канала (например, с помощью электрооптических или магнитооптических эффектов) обеспечена введением в структурную схему оптрона устройства управления УУ. При этом изменение выходного сигнала можно осуществлять как по электрическому входу оптрона, так и по оптическому входу фотоприемника. Возможны и другие конструктивные изменения оптического канала, изменяющие функции оптрона. Так, оптрон с открытым ОК (воздушный зазор между И и ФП) пригоден для считывания информации с перфоносителей, перемещающихся в этом зазоре. Выбирая оптический канал, который меняет свойства при внешних неэлектрических воздействиях, можно получить разнообразные оптоэлектронные датчики.

В ФП происходит преобразование оптического сигнала в электрический с минимальными потерями его информативности, что требует высокой фоточувствительности ФП при достаточном быстродействии. Иногда ФП выполняет и функцию предварительного усиления фотосигнала. Очевидно, что эффективность работы цепочки «И–ОК–ФП» может быть реализована лишь при согласовании спектральных характеристик всех входящих в нее элементов.

Наконец, выходное устройство ВыхУ обеспечивает преобразование сигнала ФП в стандартную форму, удобную для передачи в следующие за оптроном каскады (чаще всего это аналоговые или

цифровые микросхемы или полупроводниковые ключи). Так же как и для входного устройства, здесь имеют значение быстродействие и экономичность.

Таким образом, для всех звеньев оптрона важны КПД того преобразования, которое в этом звене осуществляется, и быстродействие. При этом необходимо согласование элементов по оптическим и электрическим характеристикам (по спектральной — в цепи «излучатель — оптический канал — фотоприемник»; по электрическим — в цепях «входное устройство — излучатель» и «фотоприемник — выходное устройство»); по допустимым условиям эксплуатации (диапазон рабочих температур, срок службы, механическая прочность и т. п.); по конструктивно-технологическим признакам. Обеспечение согласования и совместимости элементов — центральная задача оптимального конструирования оптронов.

7.3. КЛАССИФИКАЦИЯ И ПАРАМЕТРЫ ОПТРОНОВ

Одним из основных элементов оптоэлектронных цепей является оптрон, представляющий собой оптически связанную пару из электрически управляемого источника оптического излучения и фотоприемника, электрические характеристики которого могут изменяться в довольно широких пределах в зависимости от интенсивности излучения.

В основу классификации оптронов могут быть положены различные критерии.

Оптроны можно классифицировать по основному функциональному назначению. При этом различают три типа оптронов:

- оптроны с внешней оптической и внутренней электрической связями, предназначенные для усиления и преобразования излучения;
- оптроны с внутренней оптической связью, используемые в качестве переменных сопротивлений;
- оптроны с электрической связью, используемые в качестве ключевых элементов.

Другим критерием для классификации оптронов может служить тип используемого фотоприемника, выбором которого в основном определяются параметры оптронов. По этому критерию оптроны подразделяются на четыре вида, изображенные на рис. 7.6: использующие фотодиоды (рис. 7.6а); одиночные фототранзисторы (рис. 7.6б); составные фототранзисторы (рис. 7.6в); фототиристоры (рис. 7.6г) и фоторезисторы (рис. 7.6д).

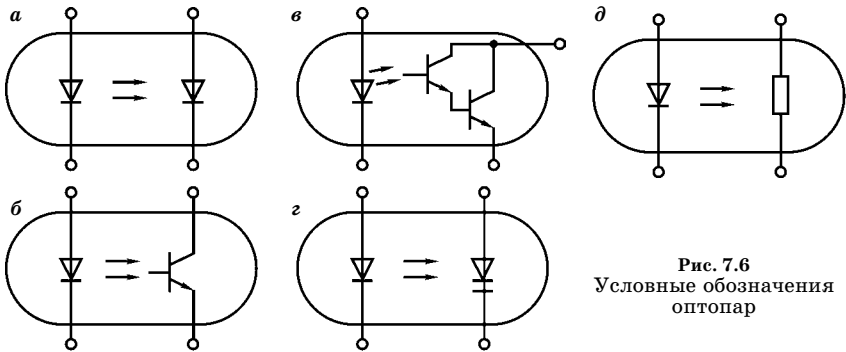


Рис. 7.6
Условные обозначения
оптопар

К основным параметрам оптрона относятся: коэффициент передачи тока, сопротивление развязки и быстродействие.

Коэффициент передачи тока K_i определяется как отношение тока на выходе оптрона к току на входе:

$$K_i = \eta_u K_n \eta_{фп} G, \tag{7.1}$$

где $\eta_u = \frac{N_u}{I_{вх}/e}$ — квантовая эффективность излучателя, определяемая отношением числа излученных квантов N_u к числу электронов, прошедших через $p-n$ -переход излучателя $I_{вх}/e$; K_n — коэффициент, характеризующий передачу света от излучателя к фотоприемнику; $\eta_{фп}$ — эффективность фотоприемника, определяемая как отношение числа носителей заряда, прошедших в выходной цепи, к числу поглощенных квантов; G — коэффициент усиления; N — число излученных квантов.

Увеличение коэффициента передачи является одной из основных задач при конструировании оптронов, поэтому целесообразно проследить возможность повышения каждой его составляющей.

Увеличение квантовой эффективности излучателя может быть достигнуто повышением доли излучательных переходов в процесс рекомбинации, что связано:

- с совершенствованием структуры и повышением чистоты полупроводникового материала;
- с использованием для излучателей непрямозонных полупроводников, в которых процесс излучательной рекомбинации связан с наличием мелких рекомбинационных центров, в силу чего излучаются кванты, энергия которых меньше энергии, соответствующей ширине запрещенной зоны полупроводника, и, следовательно, вероятность поглощения которых в полупроводнике существенно снижается;

- с использованием кристаллов специальной формы (например, полусферической) и покрытий с коэффициентами преломления, близкими к коэффициенту преломления полупроводника, для снижения потерь, связанных с полным внутренним отражением на границе раздела «полупроводник — окружающая среда».

Эффективность фотоприемника определяется его электрофизическими и структурно-топологическими параметрами. Выбор оптимального сочетания этих параметров при конструировании фотоприемника с учетом требований к его спектральной характеристике позволяет повысить эффективность $\eta_{\text{фп}}$. Высокая спектральная согласованность фотоприемника и излучателя — одно из основных средств повышения $\eta_{\text{фп}}$.

Повышение K состоит в уменьшении зазора между излучателем и фотоприемником и в оптимальном выборе оптической среды между ними. Кроме того, повышение K может быть достигнуто снижением коэффициента отражения на границе оптической среды и фотоприемника за счет нанесения просветляющего слоя. Показатель преломления слоя n_c должен быть равен $\sqrt{n_m}$ (n_m — показатель преломления покрываемого материала), а разность фаз падающей и отраженной волн $n_c d = \frac{\lambda}{4}(2m+1)$ (здесь λ — длина волны; d — толщина просветляющего слоя, $m = 1, 2, 3, \dots$) должна быть кратной λ . При выполнении этих условий отражение излучения с длиной волны $\lambda = 4dn_c$ равно нулю. Внутреннее усиление характерно для таких фотоприемников, как фототранзистор, фототиристор.

Увеличение G достигается, если на одном кристалле с фотоприемником изготавливается усилитель. В простейшем случае это один дополнительный транзистор к фототранзистору (схема Дарлингтона).

Таблица 7.1

Основные характеристики оптронов

Тип оптрона	Коэффициент передачи, %	Сопrotивление связи, Ом	Быстродействие, с	R_T/R_{oc}
Диодные	0,5...1	$10^{11}...10^{13}$	10^{-8} *	—
Транзисторные	10...100; 1000...10000 (схема Дарлингтона)	$10^{11}...10^{13}$	$(2...5)10^{-6}$	—
Тиристорные	100	$10^{11}...10^{13}$	$(20...100) \cdot 10^{-6}$	—
Резисторные	—	—	$10^{-1}...10^{-2}$	$10^4...10^7$

*Для $p-i-n$ -диода в качестве фотоприемника.

Необходимо учитывать, что обычно увеличение G ведет к снижению быстродействия и ухудшению температурной стабильности.

Более полное представление о коэффициенте передачи тока дает передаточная характеристика для одного из типов оптронов.

Основные характеристики оптронов представлены в табл. 7.1, где быстродействие оптронов характеризуется суммарным временем включения и выключения. Резисторные оптроны принято характеризовать не коэффициентом передачи, а отношением темнового сопротивления резистора R_T и сопротивления при освещении $R_{ос}$.

7.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТРОНА

Рассмотрим динамическую модель диодной оптопары: во-первых, диодная оптопара содержит два оптоэлектронных прибора — излучающий диод и фотоприемник (фотодиод), соответственно модель оптопары состоит из моделей компонентов; во-вторых, диодная оптопара в классе оптоэлектронных приборов обладает наилучшими параметрами изоляции и быстродействием, что определило ее широкое применение.

Динамическая модель излучающего диода, изображенная на рис. 7.7а, состоит из источника тока I_d , динамического сопротивления диода $r_{дин}$ (определяется сопротивлениями базы диода, омических контактов и выводов), сопротивления утечки $r_{ут}$ и емкости диода C_d .

Зависимость тока I_d от управляющего напряжения U для излучающего диода обычно описывается выражением, соответствующим кусочно-линейной аппроксимации ВАХ диода, показанной на рис. 7.7б. Участок ВАХ диода для напряжений $0 < U < U_0$ необходимо учитывать в излучающем диоде из-за сильного влияния

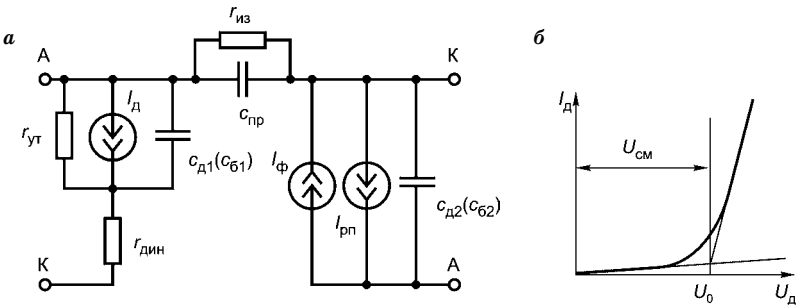


Рис. 7.7
Динамическая модель диодной оптопары (а) и аппроксимация ВАХ излучающего диода (б)

барьерной емкости диода $C_{\text{бар1}}$. При этих значениях напряжения U иногда для снижения влияния $C_{\text{бар1}}$ вводят постоянное прямое напряжение смещения (см. рис. 7.7б).

В качестве динамической модели излучающего диода обычно используют модель Эберса–Молла или зарядоуправляемую модель.

Для модели Эберса–Молла имеем согласно схеме замещения (рис. 7.7а)

$$C_{\text{диф}} = I_0 \exp\left(\frac{U}{m\phi_T}\right) \frac{m\phi_T}{\tau}; \quad (7.2)$$

$$I_{\Phi} = I_0 \left[\exp\left(\frac{U}{m\phi_T}\right) - 1 \right]; \quad (7.3)$$

$$C_{\text{д}} = C_{\text{бар1}} + C_{\text{диф}}; \quad (7.4)$$

$$C_{\text{бар1}} = C_{\text{бар0}} \left(1 - \frac{U}{\psi} \right)^{-\gamma}, \quad (7.5)$$

где $\phi_T = 0,026$ В (при $T = 25^\circ\text{C}$); $\psi = 0,7 \dots 0,75$ В.

Параметры модели I_0 , m , ϕ_T можно определить из условия аппроксимации статической ВАХ излучающего диода по выражению

$$I_j = I_0 \left[\exp\left(\frac{U_j - I_j r_{\text{дин}}}{m\phi_T}\right) \right], \quad (7.6)$$

где j — номер экспериментальной точки; $j = 1, 2, 3, \dots, N$; N — число экспериментальных точек; I_j, U_j — соответствующие j -й экспериментальной точке ВАХ диода значения тока и напряжения диода.

Вычисления проводят, например, методом наименьших квадратов.

Модель фотоприемника для фотодиодного режима работы состоит из источника фототока $I_{\Phi} = k_f I_{\text{д}}$, источника тока p - n -перехода, управляемого напряжением, $I = I_0 \exp[(U/m\phi_T) - 1]$ и барьерной емкости фотодиода $C_{\text{Б2}}$. Следует подчеркнуть, что быстродействие оптопары заметно ограничивается барьерными емкостями $C_{\text{Б1}}, C_{\text{Б2}}$. Даже у малоинерционных излучающих диодов $C_{\text{Б1}} = 50 \dots 200$ пФ; значения емкости фотодиода $C_{\text{Б2}}$ существенно меньше ($1 \dots 10$ пФ), однако она заряжается малым током I_{Φ} и ее влияние на скорость переключения оптопары также оказывается значительным.

Параметры электрической изоляции оптопары описываются проходной емкостью $C_{\text{пр}}$ и сопротивлением изоляции $r_{\text{из}}$. Очень большую роль в динамике работы оптопар играет емкость $C_{\text{пр}}$. Емкостный ток в цепи изоляции оптопары зависит от скорости изме-

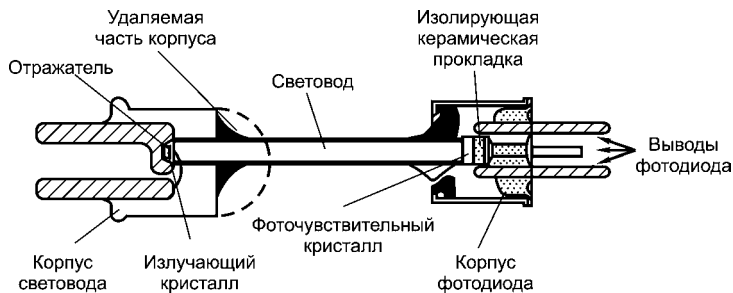


Рис. 7.8
Устройство волстроны

нения напряжения как на входе оптопары, так и на выходе, т. е. возможна электрическая обратная связь через проходную емкость и соответственно ложное переключение или самовозбуждение устройства.

Разновидностью оптронов является волстрон, изображенный на рис. 7.8. Это прибор, содержащий излучатель и фотоприемник, между которыми располагается волоконный световод (длина которого может составлять десятки и сотни метров), представляющий единую конструкцию.

7.5. РЕЗИСТОРНЫЕ ОПТОПАРЫ

В резисторных оптопарах в качестве излучателя используется светоизлучающий диод, ИК-излучающий диод или сверхминиатюрная лампочка накаливания. В качестве фотоприемного элемента используется фоторезистор — полупроводниковый резистор, сопротивление которого уменьшается при воздействии видимых световых лучей или невидимых инфракрасных. Уменьшение сопротивления фоторезистора происходит за счет генерации светом пар свободных носителей заряда — электронов и дырок, увеличивающих электропроводность полупроводника.

Фоторезисторы оптопар обычно изготавливаются на основе селенида кадмия ($CdSe$) или сернистого кадмия (CdS). Важным требованием является согласованность спектральных характеристик излучателя и приемника.

Темновой ток фоторезистора при отсутствии воздействия света излучателя обычно составляет единицы микроампер. При облучении проводимость фоторезистора значительно возрастает (в сотни, тысячи раз). Проводимость пропорциональна силе света

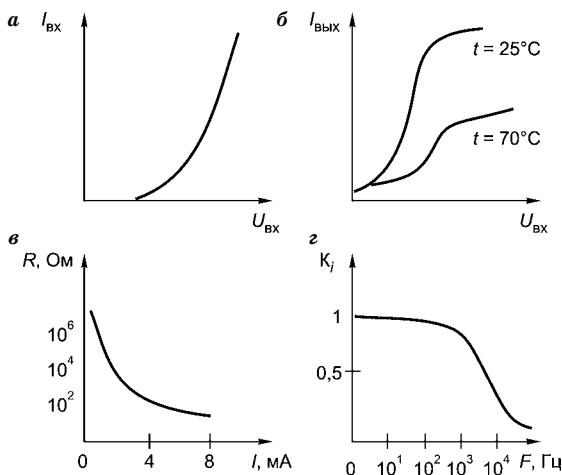


Рис. 7.9
Характеристики
резисторной
оптопары

a — входная; *б* — передаточные при разных температурах; *в* — зависимость выходного тока от входного тока; *г* — частотная.

излучателя, поэтому путем изменения тока излучателя можно управлять проводимостью фоторезистора. Свойства фоторезисторов не зависят от полярности приложенного напряжения, что позволяет включать фоторезисторы в цепь переменного тока.

Фоторезистор и излучатель объединены внутри корпуса оптопары оптически прозрачной средой (клеем) с высоким сопротивлением изоляции, поэтому цепь излучателя надежно изолирована от выходной цепи «оптопары — фотоприемника». Параметры оптопар зависят от температуры.

Повышение температуры фоторезистора приводит к увеличению его светового сопротивления и снижению фототока. При повышении температуры темновой ток увеличивается, темновое сопротивление уменьшается. Недостатком резисторных оптопар является низкое быстродействие.

Важнейшими характеристиками резисторной оптопары являются: входная ВАХ, выходная температурная передаточная — зависимость выходного сопротивления от входного тока и частотная характеристика. Они представлены на рис. 7.9.

Резисторные оптопары применяются преимущественно для бесконтактной коммутации и управления в цепях постоянного и переменного тока.

Достоинствами резисторных оптопар, определяющими их широкое применение, являются линейность и симметричность выходной характеристики, отсутствие фото-ЭДС, возможность работы при высоком напряжении в выходной цепи любой полярности (сотни вольт), высокое темновое сопротивление ($R_T = 10^6 \dots 10^{11}$ Ом).

7.6. ДИОДНЫЕ ОПТОПАРЫ

В диодной оптопаре в качестве фотоприемного элемента используется фотодиод на основе кремния, а излучателем служит инфракрасный излучающий диод. Максимум спектральной характеристики излучающего диода приходится на длину волны $\lambda \approx 1$ мкм. При облучении в фотодиоде возникает генерация пар носителей заряда — электронов и дырок. Интенсивность генерации пропорциональна силе света, а следовательно, входному току. Свободные электроны и дырки разделяются электрическим полем перехода фотодиода и заряжают p -область положительно, а n -область отрицательно. Таким образом, на выходных выводах оптопары появляется фото-ЭДС. В реальных приборах она не превышает 0,7...0,8 В, а КПД составляет около 1%.

Если к фотодиоду оптопары приложено обратное напряжение более 0,5 В, то электроны и дырки, генерированные излучением, увеличивают обратный ток фотодиода. Такой режим работы приемного элемента оптопары называется фотодиодным. Обратный фототок практически линейно возрастает с увеличением силы света излучающего диода.

Для повышения быстродействия создаются фотодиоды с $p-i-n$ -структурой. В них между легированными областями p - и n -типа используется полуизолирующий слой кремния с собственной проводимостью i . Возникающее в i -области сильное электрическое поле приводит к сокращению времени пролета носителей заряда через эту область и к быстрому нарастанию и спаду фототока. Время нарастания и спада фототока в таких фотодиодах может составлять единицы и даже доли наносекунд. Однако быстродействие оптопары в целом зависит еще и от быстродействия излучателя, а также от сопротивления выходной нагрузки. Реальное время задержки сигнала в диодном оптроне составляет около 1 мкс.

Для описания свойств диодных оптопар обычно используют входные и выходные ВАХ, передаточные характеристики в фотогенераторном и фотодиодном режимах.

Выходная характеристика оптопары аналогична обратной ветви ВАХ диода. Обратный ток практически не зависит от напряжения. При высоком напряжении возникает электрический пробой фотодиода.

Передаточная характеристика в фотодиодном режиме представляет собой зависимость выходного тока от входного и практически

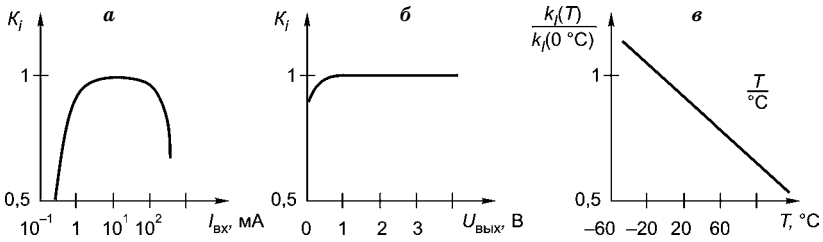


Рис. 7.10
 Зависимость коэффициента передачи диодных оптопар от входного тока (*а*), выходного напряжения (*б*) и температуры (*в*)

линейна в широком диапазоне входных токов. Коэффициент передачи тока составляет единицы процентов.

Передаточная характеристика в фотогенераторном режиме нелинейна. Фото-ЭДС при увеличении входного тока стремится к насыщению: она не может превышать контактной разности потенциалов на переходе фотодиода и составляет обычно 0,5...0,8 В.

Зависимость коэффициента передачи диодной оптопары от входного тока, выходного напряжения и температуры представлены на рис. 7.10.

При использовании диодных оптопар в электронных устройствах реализуется ряд свойств, присущих этому классу оптопар: высокое быстродействие, низкий темновой ток в выходной цепи, высокое сопротивление гальванической развязки.

7.7. ТРАНЗИСТОРНЫЕ ОПТОПАРЫ

Транзисторная оптопара с фотоприемным элементом изготавливается на базе фототранзистора. Обычно в оптопарах используются фототранзисторы с *n-p-n*-структурой на основе кремния, чувствительные к излучению с длиной волны около 1 мкм. Излучателями служат арсенидогаллиевые диоды или диоды на тройном соединении, максимум спектрального излучения которых лежит вблизи области наибольшей чувствительности фототранзистора.

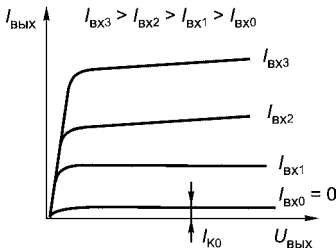


Рис. 7.11
 Выходные характеристики транзисторной оптопары

Семейство выходных характеристик транзисторной оптопары изображено на рис. 7.11.

Излучательный диод конструктивно расположен так, что большая

часть света направляется на базовую область фототранзистора. Излучатель и приемник изолированы друг от друга оптически прозрачной средой.

При отсутствии излучения в цепи коллектора фоторезистора, включенного по схеме с общим эмиттером, протекает обратный темновой ток, аналогичный по происхождению и характеристикам току в обычных биполярных транзисторах.

Обратный темновой ток существенно зависит от температуры. При повышении температуры на 10°C он увеличивается примерно в два раза. Для уменьшения темнового тока между выводами базы и эмиттера фоторезистора включается внешний резистор с сопротивлением $0,1 \dots 1,0 \text{ МОм}$.

При облучении в базовой области генерируются пары «электрон–дырка». Электроны вытягиваются из базы в сторону положительно заряженного коллектора, а дырки остаются в базе и создают положительный заряд. Это явление эквивалентно возникновению отпирающего тока базы транзистора, вследствие чего ток коллектора также увеличивается.

Соотношение токов базы и коллектора имеет вид

$$I_{\text{вых}} = h_{21\text{оз}} I_{\text{ф.б}},$$

где $I_{\text{ф.б}}$ — генерированный излучением фототок в базе фоторезистора.

Таким образом, фоторезистор обладает внутренним усилением фототока K_I . Наибольшим внутренним усилением обладают оптопары, использующие составные фототранзисторы — их коэффициент усиления фототока K_I может превышать 1000 единиц, однако у них худшие показатели быстродействия. Быстродействие обычных диодно-транзисторных оптопар составляет $t_{\text{п}} = 2 \dots 4 \text{ мкс}$.

Оптопары можно характеризовать таким параметром, как *добротность*:

$$Q = \frac{K_I}{t_{\text{п}}}. \quad (7.7)$$

Для разных типов оптопар добротность остается постоянной в широком интервале значений входных токов. Добротность зависит от напряжения изоляции $U_{\text{из}}$. При $U_{\text{из}} = 1 \dots 5 \text{ кВ}$ $Q = 0,1 \dots 1\% \text{ мкс}^{-1}$.

Основные параметры и характеристики входной цепи транзисторной оптопары аналогичны параметрам диодных оптопар ввиду использования сходных излучателей. Выходные характеристики существенно отличаются от аналогичных оптопар. Зависимость коэффициента передачи тока от входного тока отклоняется от

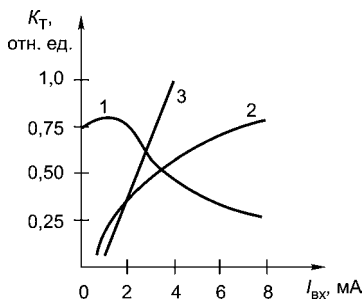


Рис. 7.12

Зависимость коэффициента передачи по току от входного тока для транзисторных оптопар: 1 — диодно-транзисторной; 2 — транзисторной; 3 — с составным фоторезистором.

характер кривых $K_I = f(T)$ определяется зависимостью от температуры квантового выхода как светодиода, так и транзистора. Повышение температуры приводит к возрастанию инерционности транзисторных оптопар. Одновременно увеличивается и темновой ток фотоприемника. Это особенно сильно сказывается в случае оптопар с составными фоторезисторами: при увеличении температуры с 25 до 100°C темновой ток в них возрастает в $10^4 \dots 10^5$ раз, а в обычных оптопарах — в $10^2 \dots 10^3$ раз.

Транзисторные оптопары находят применение в аналоговых и цифровых коммутаторах, оптоэлектронных реле, в линиях связи для гальванической развязки и др.

7.8. ТИРИСТОРНЫЕ ОПТОПАРЫ

В тиристорных оптопарах в качестве приемного элемента используется кремниевый фототиристор. Семейство вольт-амперных характеристик фототиристорного оптрона представлено на рис. 7.13.

Фототиристор, как и обычный тиристор, имеет четырехслойную структуру $p-n-p-n$. Конструктивно оптопара выполнена так, что основная часть излучения входного диода направлена на высокоомную базовую n -область фоторезистора. К крайним областям — аноду p и катоду n прикладывается внешнее выходное напряжение плюсом к аноду.

При облучении в n -базе генерируются пары носителей заряда — электронов и дырок. Электрическим полем центрального (коллекторного) перехода между n - и p -областями носители заряда разде-

линейной, причем тем больше, чем больше входной ток и лучше усиительные свойства фоторезистора.

Типичные зависимости K_I от входного тока различных транзисторных оптопар приведены на рис. 7.12. Нелинейность характеристик объясняется тем, что коэффициент усиления транзистора зависит от тока базы и поэтому не является постоянной величиной.

При больших входных токах коэффициент передачи по току с повышением температуры линейно уменьшается, как и в случае диодных оптопар. В общем случае ха-

ляются. При этом электроны остаются в n -базе, а дырки попадают в p -базу. Происходит инжекция неосновных носителей заряда из крайних переходов структуры, называемых эмиттерными. Лавинообразное нарастание тока через структуру приводит к отпиранию тиристора. Все три перехода оказываются смещенными в прямом направлении, и падение напряжения на фототиристоре в отпертом состоянии оказывается небольшим.

Фототиристор, так же как и фототранзистор, характеризуется большим внутренним усилением фототока. В отличие от фототранзистора, фототиристор остается включенным и после прекращения излучения входного диода. Таким образом, управляющий сигнал на тиристорную оптопару может подаваться только в течение короткого периода, необходимого для отпирания тиристора. Этим достигается существенное уменьшение энергии, потребной для управления тиристорной оптопарой.

Чтобы запереть тиристор, с него надо снять внешнее напряжение. Если тиристор включается в цепь переменного или пульсирующего напряжения, то выключение тиристора происходит при уменьшении напряжения и тока через тиристор до значения напряжения, при котором не может поддерживаться включенное состояние прибора.

При отсутствии входного сигнала, что соответствует необлученному состоянию базовой n -области, через фототиристор протекает малый темновой ток утечки. Темновой ток сильно зависит от температуры. При повышении температуры на 10°C ток примерно удваивается.

Тиристорные оптопары используют в качестве ключей для коммутации больших токов и высоковольтных цепей как радиоэлектронного ($U = 50 \dots 600 \text{ В}$, $I = 0,1 \dots 10,0 \text{ А}$), так и электротехнического ($U = 100 \dots 1300 \text{ В}$, $I = 6 \dots 320 \text{ А}$) назначения.

Время переключения тиристорных оптопар составляет от десятков микросекунд до десятков миллисекунд.

Достоинство этих приборов состоит в том, что, управляя значительными мощностями в нагрузке, они потребляют малую мощность цепями управления и поэтому совместимы по входу с интегральными микросхемами.

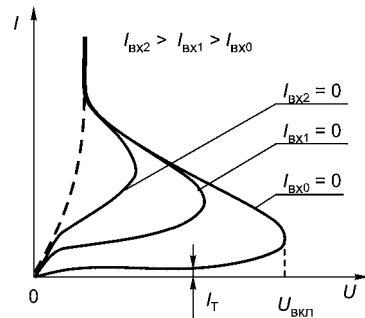


Рис. 7.13
Семейство вольт-амперных характеристик фототиристорного оптрона

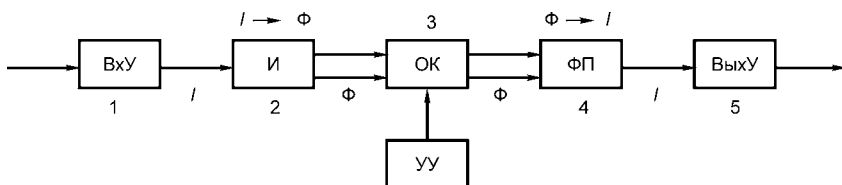
Тестовые вопросы к главе 7
«ОПТРОНЫ»

7.1. Что называется оптроном:

- а) прибор, использующий преобразование электрической энергии в оптическую;
- б) прибор, использующий преобразование оптической энергии в электрическую;
- в) прибор, использующий преобразование электрической энергии в оптическую и оптической в электрическую;
- г) прибор, использующий излучатель и фотоприемник, не связанные между собой?

7.2. Какое преобразование реализуется узлом оптрона, соответствующим номеру 1:

- а) преобразование электрического сигнала в электрический;
- б) преобразование электрического сигнала в оптический;
- в) преобразование оптического сигнала в электрический;
- г) преобразование оптического сигнала в оптический?



7.3. Какое преобразование реализуется узлом оптрона, соответствующим номеру 3 (см. рис. к вопросу 7.2):

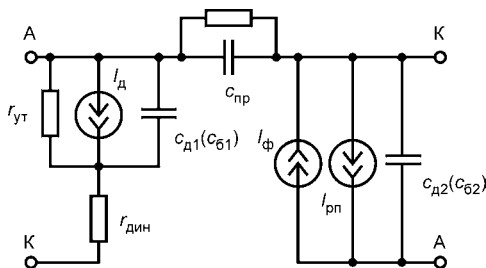
- а) преобразование электрического сигнала в электрический;
- б) преобразование электрического сигнала в оптический;
- в) преобразование оптического сигнала в электрический;
- г) преобразование оптического сигнала в оптический?

7.4. Какие оптроны могут иметь коэффициент передачи больше единицы:

- а) диодные;
- б) диодно-резисторные;
- в) диодно-транзисторные;
- г) тиристорные?

7.5. Какая емкость на схеме характеризует работу СИД при прямом включении:

- а) $C_{Д1}$;
- б) $C_{Д2}$;
- в) $C_{Б2}$;
- г) $C_{ПР}$?

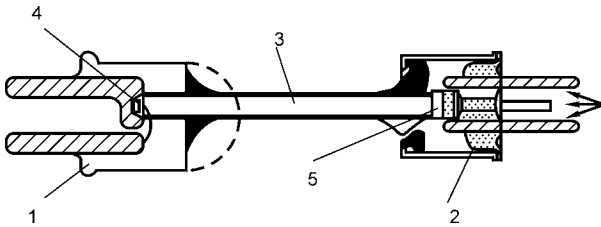


7.6. Какая емкость на схеме к вопросу 7.5 характеризует работу ФД при прямом включении:

- а) $C_{Д1}$;
- б) $C_{Д2}$;
- в) $C_{Б2}$;
- г) $C_{ПР}$?

7.7. Какой номер на схеме соответствует корпусу СИД:

- а) 1;
- б) 2;
- в) 3;
- г) 4?



7.8. Какой номер на схеме к вопросу 7.7 соответствует корпусу ФД:

- а) 1;
- б) 2;
- в) 3;
- г) 4;
- д) 5?

7.9. Какой номер на схеме к вопросу 7.7 соответствует световоду:

- а) 1;
- б) 2;
- в) 3;
- г) 4;
- д) 5?

7.10. Какой номер на схеме к вопросу 7.7 соответствует фотоприемнику:

- а) 1;
- б) 2;
- в) 3;
- г) 4;
- д) 5?

ИНДИКАТОРНЫЕ ПРИБОРЫ

8.1. ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ

8.1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В 1888 г. австрийский ботаник Ф. Рейнитцер впервые описал необычное поведение бензоата холестерина, который плавился при 145°C , превращаясь в мутную жидкость, причем мутность исчезла при температуре 179°C , выше которой вещество вело себя как обычная прозрачная жидкость. В 1889 г. физик О. Леманн обнаружил, что в указанном температурном интервале бензоат холестерина обладает оптической анизотропией, свойственной твердым кристаллам. Так как это вещество было еще и текучим, О. Леманн ввел для подобного его состояния термин «жидкий кристалл» (ЖК).

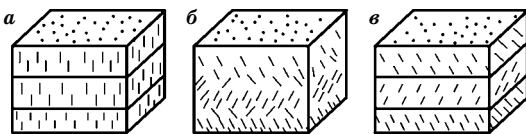
В дальнейшем выяснилось, что ЖК-состояние наблюдается примерно у одного из 200 органических соединений, причем у некоторых в строго определенном интервале температур (термотропные ЖК), у других — при определенном диапазоне концентраций раствора (лиотропные ЖК). Кроме того, было установлено, что в зависимости от молекулярного строения возможны различные структуры жидких кристаллов: холестерическая, нематическая и смектическая, представленные на рис. 8.1.

В основе принципиальной возможности практического использования ЖК лежит зависимость их структуры от внешних факторов: температуры, давления, электрического и магнитного полей. Эта зависимость объясняется слабостью межмолекулярных сил, обеспечивающих упорядоченную структуру ЖК, и потому даже небольшие изменения внешних факторов могут вызывать существенные изменения структуры. В электронике используются лишь термотропные ЖК.

У чистых веществ температурный интервал ЖК-состояния невелик, но он расширяется при смешивании жидких кристаллов различной молекулярной структуры. При этом наблюдается по-

Рис. 8.1
Структуры жидких кристаллов:

a — смектическая; *б* — нематическая; *в* — холестерическая.



нижение температуры перехода в твердокристаллическое состояние и изменение температуры перехода в изотропную жидкость. В настоящее время термотропные ЖК-металлы (чистые вещества и смеси) используются при температуре $-20 \dots 250^\circ\text{C}$.

Все ЖК состоят из молекул вытянутой формы. Ван-дер-Ваальсовы взаимодействия обеспечивают упорядоченное расположение молекул, так что их длинные оси в среднем ориентированы вдоль некоторого общего направления. Тепловое движение приводит к отклонениям длинных осей отдельных молекул от этого среднеквадратического направления на угол до 40° . Разные структуры ЖК отличаются характером упорядочения молекул.

Наиболее широкое практическое использование нашли нематические жидкие кристаллы (НЖК).

Нематические ЖК структурно менее упорядочены по сравнению со смектическими, как видно на рис. 8.1 *a*, *б*. Объем НЖК можно разбить на небольшие области, различающиеся направлениями преимущественной ориентации молекул, вследствие чего возникает оптическая неоднородность среды и наблюдается сильное рассеяние света. Поэтому ЖК и в проходящем, и в отраженном свете предстает мутным. Если одинаково ориентировать молекулы под действием внешнего поля, можно добиться однородности и практически полного просветления ЖК.

Важными характеристиками НЖК являются оптическая и диэлектрическая анизотропия. Мерой оптической анизотропии служит разность

$$\Delta n = n_{\text{пар}} - n_{\text{перп}}, \quad (8.1)$$

где $n_{\text{пар}}$ и $n_{\text{перп}}$ — показатели преломления для световой волны, электрический вектор которой параллелен и перпендикулярен направлению преимущественной ориентации соответственно.

Для всех НЖК характерно $\Delta n > 0$. Обычно $\Delta n > 0,2$, а средний показатель преломления $n_{\text{ср}} = (n_{\text{пар}} + n_{\text{перп}})/2$ находится в интервале от 1,4 до 1,8. Мерой диэлектрической анизотропии (ДА) служит величина

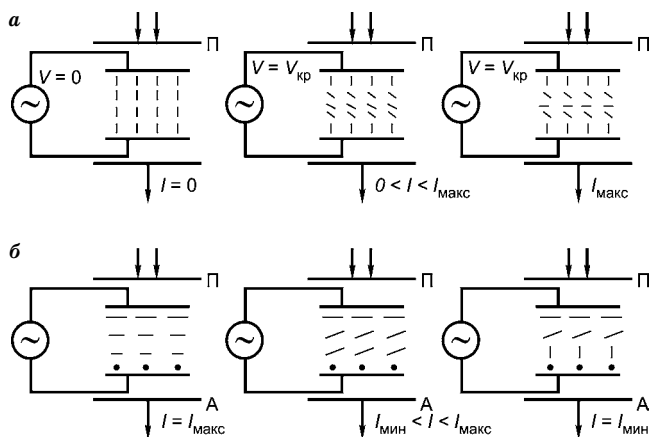
$$\Delta \epsilon = \epsilon_{\text{пар}} - \epsilon_{\text{перп}}, \quad (8.2)$$

где $\epsilon_{\text{пар}}$ и $\epsilon_{\text{перп}}$ — диэлектрическая проницаемость, измеряемая вдоль и поперек направления преимущественной ориентации соответственно.

В соответствии со знаком $\Delta\epsilon$ различают положительную ДА ($\Delta\epsilon > 0$) и отрицательную ($\Delta\epsilon < 0$). Величина и знак $\Delta\epsilon$ зависят от частоты поля. При частоте несколько десятков килогерц возможно изменение знака. Вследствие ДА внешнее однородное электрическое поле вызывает ориентацию молекул НЖК: при положительной ДА длинные оси молекул стремятся расположиться вдоль направления поля, при отрицательной ДА — поперек. Именно эти свойства НЖК используют в подавляющем большинстве ЖК-устройств, в частности для электрического управления двойным лучепреломлением и динамического рассеяния света.

Эффект электрического управления состоит в том, что при неизменном направлении распространения света в НЖК внешнего электрического поля происходит переориентация молекул НЖК, величина переориентации растет с ростом напряженности поля. Таким образом, изменяется взаимная ориентация луча света и оптической оси ЖК. В результате разность хода между обычным и необыкновенным лучами можно менять от 0 до $d\Delta n$ (d — толщина ЖК вдоль луча) или от $d\Delta n$ до 0 (в зависимости от исходной взаимной ориентации луча и осей молекул и от знака $\Delta\epsilon$). Эффект динамического рассеяния заключается в следующем. В НЖК с отрицательной ДА вводится органическая легирующая примесь, вследствие диссоциации которой в объеме НЖК появляются свободные носители заряда (ионы). Включение внешнего переменного электрического поля вызывает преимущественную ориентацию молекул НЖК и колебания пространственного заряда. Сочетание этих явлений приводит к тому, что при напряженности внешнего поля меньше некоторой пороговой в ЖК устанавливается течение в виде цилиндрических вихрей (доменов Вильямса). При дальнейшем росте поля возрастают токи проводимости, которые при величине поля, равной критической, приводят к разрушению упорядоченной структуры ЖК, созданной полем, а также к турбулентности молекул, вследствие чего проявляется оптическая неоднородность, сопровождаемая сильным рассеянием света.

Для работы ЖК-устройства весьма существенна ориентация молекул ЖК относительно поверхности пластин. Различают следующие ориентации: гомеотропную (длинные оси молекул перпендикулярны плоскости пластин), гомогенную (длинные оси молекул параллельны некоторому общему направлению в плоскости пластин), квазигомогенную (длинные оси молекул различных областей ЖК параллельны различным направлениям в плоскости пластин). При отсутствии внешних полей ориентация молекул



в ЖК-ячейке определяется ориентацией молекул, находящихся вблизи поверхности стеклянных пластин, поэтому поверхностные свойства внутренних плоскостей пластин имеют очень большое значение для характеристик ЖК-устройств. Специальная обработка поверхности пластин позволяет ориентировать поверхностные молекулы ЖК гомеотропно, гомогенно и квазигомогенно. Для создания полупрозрачных проводящих покрытий обычно используют смесь SnO_2 и In_2O_3 .

Наибольшее распространение на практике получили два типа ЖК-ячеек: на основе эффекта динамического рассеяния и твист-эффекта. На рис. 8.2 представлены схемы работы ячеек этих типов.

8.1.2. ЯЧЕЙКИ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ДИНАМИЧЕСКОГО РАССЕЯНИЯ (ДР-ЯЧЕЙКИ)

Первоначальная укладка молекул может быть любой (рис. 8.2а), но для большего контраста желательна гомеотропная. Используются нематические ЖК с отрицательной ДА, поэтому при напряженности электрического поля меньше пороговой в объеме ЖК устанавливается гомогенная ориентация (оптическая ось перпендикулярна лучу света), а при напряженности больше пороговой — хаотическая, приводящая к рассеянию, которое сопровождается депolarизацией света. Следовательно, если электроды на дальней от наблюдателя пластине сделать зеркальными, а на ближней — полупрозрачными, то при напряженности поля между электродами меньше пороговой ЖК будет прозрачным и зеркальные электроды будут хорошо различимы (в отраженном свете). Если

напряженность поля превысит пороговую, то ЖК станет мутным и зеркальные электроды будут не видны. Таким образом, создав на обеих пластинах систему электродов и меняя управляющее напряжение, на них можно получить то или иное видимое изображение.

8.1.3. ЯЧЕЙКИ НА ОСНОВЕ ТВИСТ-ЭФФЕКТА

Схема работы ячейки на основе твист-эффекта — скручивания нематической структуры (СНС-ячейки) представлена на рис. 8.2б. Укладка молекул вблизи обеих пластин гомогенная, причем направление ориентации молекул на одной пластине перпендикулярно направлению ориентации молекул на другой. Вследствие этого в объеме ЖК формируется спиральная укладка нематических плоских структур (всего четверть витка спирали), приводящая к тому, что проходящий через ЖК плоскополяризованный свет превращается в слабо эллиптически-поляризованный, азимут которого поворачивается на 90° относительно исходного состояния.

Используется НЖК с положительной ДА, поэтому при включении внешнего поля в объеме ЖК постепенно устанавливается гомеотропная ориентация и при напряженности поля, превышающей пороговую, весь объем ЖК превращается в одноосный кристалл, в котором свет распространяется вдоль оптической оси, т. е. эффект вращения плоскости поляризации исчезает.

Ячейки при таком эффекте, в отличие от динамического рассеяния, могут работать только «на просвет», т. е. в проходящих лучах света. Если по обе стороны ячейки поставить скрещенные поляризатор и анализатор, то при отсутствии управляющего напряжения на электродах свет будет свободно проходить через анализаторы и участок ЖК-ячейки окажется светлым. Если включить напряжение, превышающее пороговое, то плоскость поляризации света не будет вращаться, свет через анализатор не пройдет и этот участок ячейки станет темным.

Основными характеристиками ЖК-устройств являются оптические (контраст и пропускание), электрооптические (зависимость контраста и пропускания от управляющего напряжения), а также быстродействие.

Контраст и пропускание определяются как отношение интенсивностей выходящего из ЖК-устройства света в исходном и возбужденном состояниях ЖК-ячейки. Это отношение называется пропусканием, если наблюдение ведется навстречу входящему

лучу, и контрастом — в остальных случаях. Для ДР-ячеек контраст составляет от 15 до 100, пропускание — 20 в расходящихся лучах и 2500 при лазерном излучении. Для ячеек на основе твист-эффекта контраст и пропускание обычно составляют от 40 до 100.

Зависимость контраста и пропускания от управляющего напряжения представлена на рис. 8.3.

Частота управляющего напряжения в ДР-ячейках ограничена сверху и снизу. Нижний предел (5...10 Гц) обусловлен необратимыми электролитическими процессами. Уменьшение контраста при высоких частотах объясняется сокращением периода ускорения ионов, вследствие чего ионы не успевают приобрести энергию, необходимую для возникновения турбулентных течений.

Ячейки на основе твист-эффекта могут работать и при постоянном напряжении, но электролитические процессы сокращают их срок службы до 2000 часов.

Верхний предел определяется частотой 10...100 кГц, при которой $\Delta\varepsilon$ становится равной нулю, а затем меняет знак.

Однако вследствие роста емкостных токов с увеличением частоты обычно выбирается частота диапазона $f \approx 1...10$ кГц. При подаче управляющего напряжения наблюдается плавное изменение контраста, наступающее с некоторой задержкой, показанной на рис 8.4, а затем спад. Время задержки включения t^{01} (реакции) пропорционально отношению $\eta/(\Delta\varepsilon E^2)$, где η — вязкость ЖК; $\Delta\varepsilon$ — ДА; E — напряженность поля, $E = U/d$; d — толщина ЖК, а время выключения t^{10} (релаксации) пропорционально $3d^2$. Время t^{01} и t^{10} тем короче, чем лучше обеспечена в процессе производства первоначальная ориентация молекул.

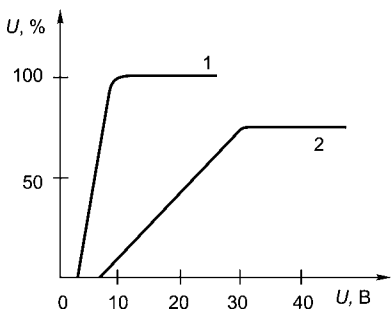


Рис. 8.3

Зависимость контраста и пропускания от управляющего напряжения:

1 — пропускание ячейки на основе твист-эффекта; 2 — контраст ДР-ячейки.

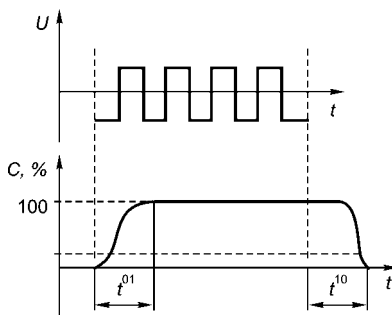


Рис. 8.4

Характеристика быстродействия ЖК-ячеек

8.1.4. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ И ПАРАМЕТРЫ ЖКИ

Принципиально жидкокристаллические индикаторы (ЖКИ) состоят из двух плоскопараллельных стеклянных пластин, между которыми находится слой жидких кристаллов толщиной 12...20 мкм, как показано на рис. 8.5.

На одной стеклянной пластине прозрачным токопроводящим покрытием нанесены электроды, которые представляют собой конфигурацию в виде сегментов, с помощью которых можно воспроизвести цифры от 0 до 9. На другой пластине прозрачным токопроводящим покрытием нанесен электрод, являющийся общим для цифр. Пластины покрытыми поверхностями обращены друг к другу.

Существуют индикаторы, работающие в отраженном свете («на отражении») и в проходящем («на просвет»). В первом случае на заднее стекло индикатора наносится отражающий слой, во втором — за индикатором должен быть дополнительный источник света.

При подаче управляющего напряжения жидкие кристаллы в зоне действия электрического поля теряют прозрачность, и если задняя отражающая поверхность белая, то наблюдатель видит темную цифру на светлом фоне. Если задний отражатель черный и внутренние поверхности корпуса индикатора также зачернены, то матово-светлые цифры будут хорошо заметны на черном фоне.

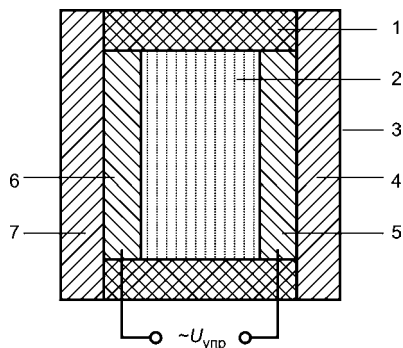


Рис. 8.5

Жидкокристаллический индикатор, использующий эффект динамического рассеивания:

1 — прокладка; 2 — жидкие кристаллы; 3 — отражающее покрытие; 4 — заднее стекло; 5 — общий электрод; 6 — прозрачные электроды сегментов; 7 — переднее стекло.

При работе индикатора «на просвет» цифры темнее фона. Если при этом мощность установленного источника света 0,5 Вт, то яркость жидкокристаллического индикатора становится сравнимой с яркостью газоразрядного или светодиодного индикатора, используемого при обычной освещенности.

Выводы от сегментов выполнены в виде износостойких токопроводящих дорожек на стекле. Соединение выводов индикатора с элементами схемы управления осуществляется с помощью разъема.

Другим принципом, используемым для создания жидко-

Рис. 8.6

Жидкокристаллический индикатор, основанный на эффекте вращения плоскости поляризации слоем жидких кристаллов, исчезающем под действием электрического поля (твист-эффекте):

1 — стеклянная ячейка; 2 — отражающее покрытие; 3 — поляроидная пластина с вертикальной плоскостью поляризации; 4 — жидкие кристаллы; 5 — прокладка; 6 — прозрачные электроды; 7 — поляроидная пластина с горизонтальной плоскостью поляризации.

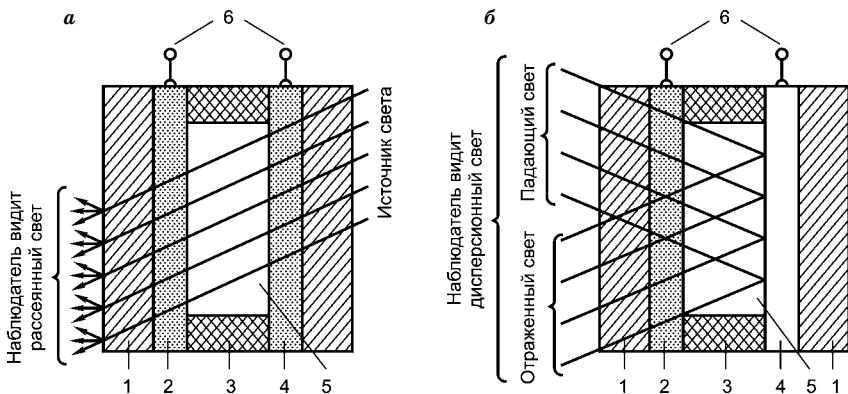
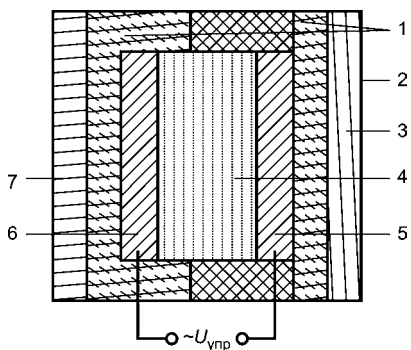


Рис. 8.7

ЖКИ, работающий по принципу пропускания (а) и отражения (б) света:

1 — стеклянная пластина; 2 — прозрачный электрод; 3 — изоляционная прокладка; 4 — прозрачный электрод; 5 — слой ЖК; 6 — выводы.

кристаллических индикаторов, является вращение плоскости поляризации поляризованного света слоем жидких кристаллов, исчезающее под действием электрического поля (твист-эффект). Индикаторы, работающие по этому принципу, получают, помещая капельку жидких кристаллов между двумя скрещенными поляроидными пластинами, которая растекается между ними в виде тонкой пленки. Сами скрещенные поляроиды, вследствие того что их плоскости поляризации света взаимно перпендикулярны, совершенно непрозрачны. Но если между этими пластинами находится слой нематических жидких кристаллов, которые в результате технологической обработки приобрели свойство вращения плоскости поляризации проходящего света на 90° , то такая оптическая система получается прозрачной, как можно видеть на рис. 8.6.

При приложении электрического поля все молекулы жидких кристаллов ориентируются вдоль поля и эффект вращения плоскости поляризации исчезает. В результате система, показанная на рис. 8.7а, не пропускает свет.

Если возбуждается не весь слой жидких кристаллов, а определенные участки в виде символа (цифры), то изображение символа (цифры) будет в проходящем свете темнее невозбужденной области (фона). Этот принцип индикации является более прогрессивным, так как дает значительный выигрыш в мощности потребления и позволяет получать больший контраст. Большинство серийно выпускаемых типов жидкокристаллических индикаторов работают по этому принципу.

Возбуждение жидкокристаллического слоя в индикаторах осуществляется переменным напряжением синусоидальной формы или формы типа «меандр» с эффективным значением (в зависимости от типа) от 2,7 до 30 В и частотой 30...1000 Гц. Постоянная составляющая напряжения не допускается из-за появления электролитического эффекта, который приводит к значительному сокращению срока службы индикатора.

Основными параметрами жидкокристаллических цифровых индикаторов являются:

- контраст знака относительно фона K — отношение разности коэффициента яркости фона и знака индикатора к коэффициенту яркости фона, выраженное в процентах;
- ток потребления $I_{\text{пот}}$ — среднее значение переменного тока, протекающего через индикатор (сегмент) при приложении к нему номинального напряжения управления рабочей частоты;
- напряжение управления $U_{\text{упр}}$ — номинальное эффективное переменное напряжение, приложенное к сегментам индикатора;
- рабочая частота напряжения управления $f_{\text{раб}}$;
- минимальное напряжение управления $U_{\text{упр. min}}$ — минимальное приложенное к сегментам индикатора эффективное переменное напряжение, при котором обеспечивается заданный контраст знака относительно фона;
- максимально допустимое напряжение управления $U_{\text{упр. max}}$ — максимальное приложенное к сегментам индикатора эффективное переменное напряжение, при котором обеспечивается заданная надежность индикатора при длительной работе;
- время реакции $t_{\text{реак}}$ — период при включении, в течение которого ток потребления увеличивается до 0,8 максимального значения;

- время релаксации $t_{\text{рел}}$ — период при включении, в течение которого ток потребления снижается до 0,2 максимального значения.

Важнейшей характеристикой цифрознакового жидкокристаллического индикатора как прибора отображения информации является зависимость контраста знака от напряжения управления. С увеличением напряжения контраст резко растет до порогового значения, после чего с увеличением $U_{\text{упр}}$ практически не повышается. $U_{\text{упр. min}}$ выбирается на пологом участке кривой, вблизи порога. Отметим, что контраст знака индикатора является функцией эффективного $U_{\text{упр}}$ и практически не зависит от его формы.

Жидкокристаллический индикатор как элемент электрической цепи эквивалентен конденсатору. Вследствие этого вольт-амперная характеристика $I_{\text{пот}} = f(U_{\text{упр}})$ при номинальной частоте управляющего напряжения близка к линейной, а частотная характеристика $I_{\text{потр}} = \varphi(f_{\text{раб}})$ имеет вид монотонно возрастающей функции. Постоянная составляющая управляющего напряжения не должна превышать 1% эффективного его значения.

Важной особенностью жидкокристаллического индикатора является низкий ток потребления — единицы или сотни микроампер (в зависимости от принципа работы). В интервале рабочих температур (1...50°C) ток потребления несколько увеличивается с ростом температуры. Жидкокристаллический индикатор отличается низким быстродействием, связанное с инерционными процессами перестройки структур органических кристаллов. Быстродействие существенно зависит от температуры. В зоне температур, близких к нижнему пределу, быстродействие резко падает.

Система обозначений жидкокристаллических индикаторов включает несколько букв и цифр. Сочетание ИЖК означает: индикатор жидкокристаллический. Четвертый элемент обозначения — буква: Ц — цифровой, С — символьный. Пятый элемент — цифра, указывающая номер разработки. Цифра после дефиса указывает число разрядов индикатора, а число через косую черту соответствует высоте цифры (символа) разряда в миллиметрах.

Приборы, разработанные до введения описанной системы, обозначены иначе. Например, наименование ЦИЖ-5 расшифровывается следующим образом: цифровой индикатор жидкокристаллический, номер разработки 5. ИЖК-2 — индикатор жидкокристаллический, номер разработки 2.

Основные параметры жидкокристаллических индикаторов сведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Основные параметры индикаторов

Тип	Принцип действия	Область применения	Число разрядов	Основные параметры			
				Контраст знака, %	Ток потребления, мкА	Напряжение управления, В	Высота цифры, мм
ИЖКЦ-1-1/18	Твист-эффект	Отображение цифровой информации в устройствах пневматоматики	1	83,3	7	7	18
ЦИЖЗ-1; ЦИЖЗ-2	Динамическое рассеяние	Отображение цифровой информации в устройствах пневматоматики	1	90	200	20	35
ЦИЖ-8	Динамическое рассеяние	Отображение информации на табло группового пользования	1	90	1500	24	40
ЦИЖ-6	Твист-эффект	Отображение цифровой информации в малогабаритных приборах точного времени	4	83,3	1	4,5	3
ЦИЖ-2	Твист-эффект	Отображение цифровой информации в малогабаритных приборах точного времени	4	83,3	1,5	4,5	4,5
ИЖКЦ2-4/5; ИЖКЦ3-4/5	Твист-эффект	Отображение цифровой информации в малогабаритных приборах точного времени	4	83,3	1	2,7	5
ИЖКЦ1-4/16	Динамическое рассеяние	Отображение цифровой информации в настольных электронных часах и измерительных приборах	4	90	2000	24	16
ИЖКЦ1-4/18	Твист-эффект	Отображение цифровой информации электронной аппаратуры	4	87,5	100	7	18
ИЖКЦ1-4/24; ИЖКЦ2-4/24	Твист-эффект	Отображение цифровой информации в электронных настольных часах	4	80	9,5... 5	3	24
ИЖКЦ1-6/17; ИЖКЦ2-6/17	Твист-эффект	Отображение цифровой информации в электронных приборах точного времени	6	90	45	6	16,6

Продолжение табл. 8.1

Тип	Принцип действия	Область применения	Число разрядов	Основные параметры			
				Контраст знака, %	Ток потребления, мкА	Напряжение управления, В	Высота цифры, мм
ИЖКЦ3-6/17; ИЖКЦ4-6/17	Твист-эффект	Отображение информации в радиоприемных устройствах	6	90	70	9	17
ЦИЖ-5	Динамическое рассеяние	Отображение цифровой информации в электронных приборах точного времени	6	90	60	15	16
ЦИЖ-9	Твист-эффект	Отображение информации в малогабаритных приборах точного времени	6	83	2	2,7	5
ИЖКЦ1-8/5	Твист-эффект	Индикация в микрокалькуляторах	9	83,5	8	9	5
ЦИЖ-4; ЦИЖ-4/1	Динамическое рассеяние	Отображение цифровой информации в приборах с автономным питанием	9	90	100	20	6

Использование жидкокристаллических индикаторов в радиоэлектронной аппаратуре стимулируется их особенностями: низкими токами потребления и напряжениями управления, совместимостью работы с интегральными микросхемами, низкой стоимостью. Возможно их применение в индикаторных устройствах измерительной аппаратуры, электронных часах и микрокалькуляторах, информационные панели и указатели.

Весьма важной сферой применения жидкокристаллических приборов (особенно многоразрядных индикаторов) являются средства управления.

8.1.5. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ЖКИ

На рис. 8.8 показана схема возбуждения сегментов сигналом переменного напряжения [18]. Устройство состоит из двух логических схем, выполняющих операцию, — $DD2$, $DD3$, инвертора $DD1$ и ключа-формирователя на транзисторе VT . На коллектор транзистора подается напряжение, равное двойной амплитуде

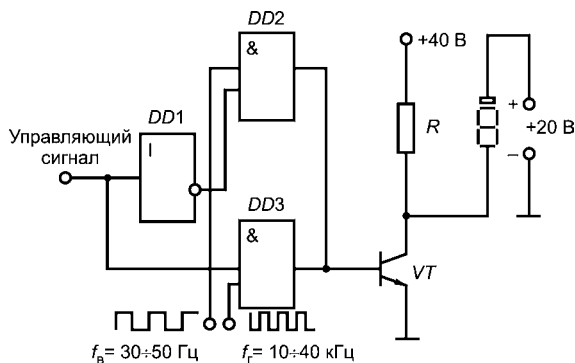


Рис. 8.8
Схема возбуждения сегментов жидкокристаллического индикатора переменным напряжением разной частоты

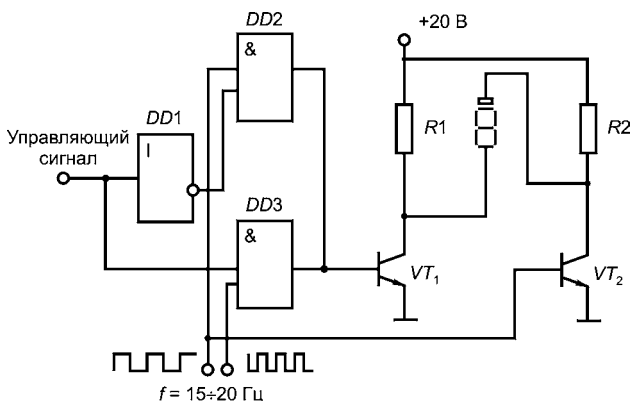


Рис. 8.9
Схема возбуждения сегментов жидкокристаллического индикатора по методу сдвига фаз управляющего напряжения

номинального переменного напряжения возбуждения данного жидкокристаллического индикатора.

С транзистора VT на сегмент индикатора подается однополярное переменное напряжение прямоугольной формы амплитудой 40 В. Для уничтожения постоянной составляющей импульсного питающего напряжения (она недопустима ввиду физических условий работы жидких кристаллов) к общему электроду прикладывается постоянное напряжение 20 В.

На вход $DD2$ подается напряжение возбуждения с частотой $f_b = 30 \dots 50$ Гц, а на вход $DD3$ — напряжение гашения с частотой $f_r = 10 \dots 40$ кГц. На низком логическом уровне управляющего сигнала открывается $DD2$ и транзистор работает в импульсном режиме с частотой, соответствующей частоте возбуждения жидкокристаллического сегмента. Управляющий сигнал с высоким логическим уровнем, поступающий с дешифратора на управляющий

вход, открывает *DD3*. В результате устройство формирует напряжение повышенной частоты, на которое жидкокристаллический сегмент не реагирует. С учетом того, что устройство управления по потребляемой мощности должно соответствовать жидкокристаллическому индикатору, все логические схемы выполнены на основе КМДП.

Кроме описанного, используется также другой тип устройства возбуждения жидкокристаллических индикаторов. Его схема показана на рис. 8.9.

На входе логических схем *DD2* и *DD3* от внешнего генератора подается импульсное напряжение с частотой $f_{\text{в}} = 15 \dots 20$ Гц и со сдвигом фаз 180° . В зависимости от уровня управляющего сигнала на сегмент индикатора через ключ-формирователь (транзистор VT_1) подается напряжение прямоугольной формы, прямое либо сдвинутое по фазе. На общий электрод индикатора через другой ключ-формирователь (транзистор VT_2) постоянно подается сигнал одной фазы.

При совпадении фаз на электродах сегмент не возбуждается; при различии фаз происходит возбуждение сегмента. Фазовый способ управления позволяет понизить напряжение питания индикатора в два раза.

При использовании многоразрядных индикаторов требуется большое количество внешних соединений, необходимых для управления сегментами. Это заставляет прибегнуть к созданию мультиплексорного управления. На рис. 8.10 показан принцип управления 4-разрядным индикатором с разделенными общими электродами

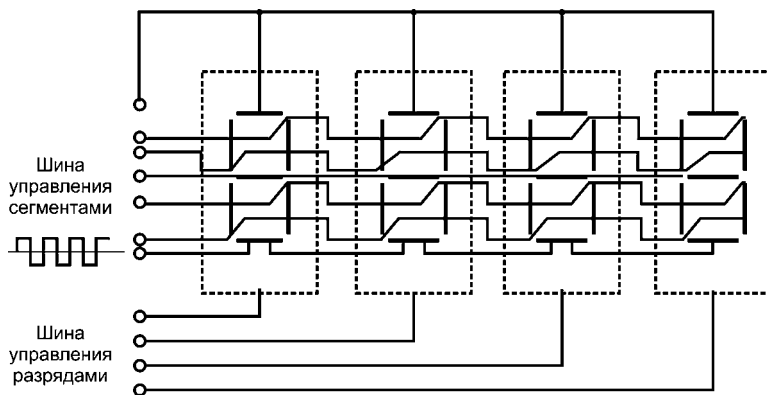


Рис. 8.10

Схема соединений сегментов при мультиплексном управлении многоразрядными цифровыми жидкокристаллическими индикаторами

для каждого разряда. Он заключается в объединении идентичных сегментов по всем разрядам и последовательной адресации данных в соответствующие разряды.

Процесс отображения 4-разрядного числа осуществляется по тактам. В каждом такте переменное управляющее напряжение прикладывается к шине управления сегментами и к линии общего электрода того разряда, который возбуждается в данном такте. Благодаря длительной релаксации жидких кристаллов, цифры разрядов в период между тактами возбуждения продолжают читаться без приложения напряжения.

8.1.6. СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОРАЗЯДНЫМИ ИНДИКАТОРАМИ

Рассмотрим принцип и схемы управления многоразрядными цифровыми индикаторами, имеющими восемь и более разрядов. Такие индикаторы необходимы в электронных калькуляторах и измерительных приборах для работы с многозначными числами. Каждый разряд индикатора состоит из семи сегментов, позволяющих набрать любую цифру, и восьмого сегмента (точки) для обозначения порядка многозначного числа.

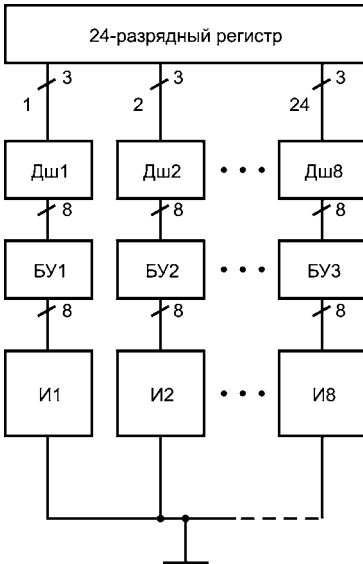


Рис. 8.11

Схема управления знаковыми индикаторами в непрерывном режиме

Для индикации нужной цифры достаточно между выводами сегментов, составляющих данную цифру, и общим выводом индикатора приложить соответствующее типу индикатора управляющее напряжение. Рассмотрим, каким образом можно подать управляющее напряжение в случае многоразрядных (например, 8-разрядных) индикаторов.

Возможны два режима работы: непрерывный и мультиплексорный (или метод стробирования). В обоих случаях информация, выводимая за индикатор, хранится в виде двоичных кодов, знаков, чисел в запоминающих устройствах или регистрах. Например, для рассматриваемого случая каждый знак числа представлен 3-разрядным

кодом ($2^3 = 8$), а все восьмизначное число хранится в 24-разрядном регистре ($24 = 3 \times 8$). Непрерывный режим работы индикаторов осуществляется по схеме, представленной на рис. 8.11.

Код каждого разряда индикатора поступает на соответствующий дешифратор (Дш). Выходные сигналы дешифратора логически являются управляющими сигналами соответствующих знаков индикатора, однако по электрическим параметрам они могут не соответствовать нужному уровню тока или напряжения. Поэтому после дешифратора установлено буферное устройство (БУ), преобразующее выходные напряжения дешифратора до уровня, необходимого для управления индикатором.

Из буферного устройства сигнал поступает непосредственно на индикатор (И). Функции буферного устройства может выполнять и дешифратор, если его выходные сигналы пригодны для управления индикатором.

Для жидкокристаллических индикаторов подходят дешифраторы, сделанные на МДП-транзисторах.

Недостатком непрерывного режима работы является необходимость большого количества выводов к многоразрядным индикаторам (для 8-разрядного индикатора 65 выводов), а также большого количества дешифраторов и буферных устройств. Кроме того, поскольку все разряды индикатора действуют одновременно, то потребляется большая мощность (особенно при светодиодном индикаторе).

Перечисленных недостатков лишен мультиплексный режим работы индикаторов, основанный на инерционности человеческого глаза. Он заключается в следующем. Все разряды индикатора опрашиваются не одновременно, а поочередно, с достаточно высокой частотой. Так как глаз обладает инерционностью $1/30 \dots 1/40$ с, то при частоте $f > 50$ Гц человек будет воспринимать все знаки светящимися одновременно.

Схема, реализующая мультиплексный режим, показана на рис. 8.12. В этой схеме задающий генератор запускает 3-разрядный счетчик, управляющий коммутаторами и ключами (К) к знакам индикатора.

В каждом состоянии счетчика (Сч) коммутатор соединяет с дешифратором те разряды запоминающего регистра, которые содержат код знака с номером, равным номеру состояния счетчика. Одновременно открывается ключ к этому знаку, и знак оказывается в течение данного такта под действием тех же управляющих сигналов, что и в непрерывном режиме. Общие выводы остальных знаков в это время отключены от управляющей схемы, поэтому

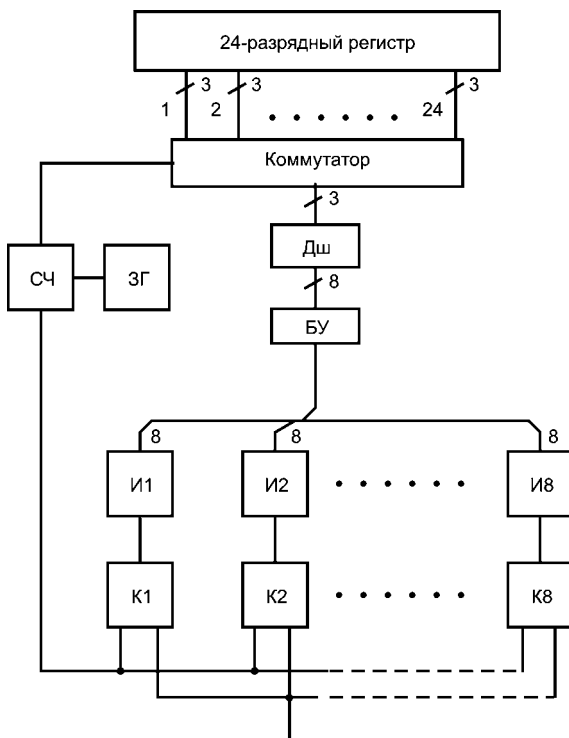


Рис. 8.12
 Схема управления знаковыми индикаторами
 для работы в мультиплексном режиме

в данном такте будет светиться один знак. Для получения такой же средней яркости свечения (для световых индикаторов), как и в случае непрерывного режима, необходимо, чтобы амплитуда импульса тока была равна произведению среднего тока в непрерывном режиме и числа знаков индикатора. Поскольку для светодиодов пиковый ток может превышать среднее значение приблизительно в 20 раз, таким методом можно управлять индикаторными панелями на светодиодах, содержащих до 20 разрядов.

Более сложная схема, чем при непрерывном режиме, оправдывается для многоразрядных индикаторов существенным сокращением количества внешних выводов с индикаторов (для 8-разрядного индикатора — с 65 до 16, а для больших индикаторов выигрыш еще больше) и сокращением количества обслуживающих схем дешифраторов и буферных устройств — их требуется всего по одной, независимо от количества разрядов индикатора.

8.2. ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ИНДИКАТОРЫ (ЭЛИ)

8.2.1. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЭЛИ

Электролюминесцентный индикатор представляет собой плоский конденсатор, одной обкладкой которого является сплошной прозрачный электрод, а другой — электрически разделенные металлические площадки (мозаичный электрод), как можно видеть на рис. 8.13.

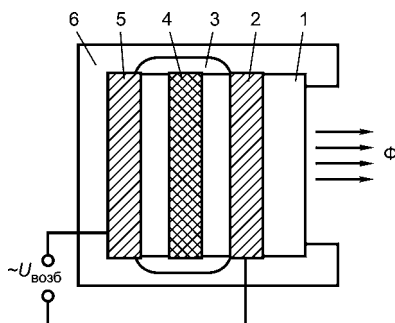
Между электродами размещается токопленочная структура из люминесцентного порошка, приготовленного на основе сульфида цинка, легированного специальными активаторами. При приложении к электродам индикатора переменного напряжения в слое люминесцентного порошка возникает световое излучение. В зависимости от активатора цвета свечения разные: зеленый, желтый, голубой, красный. Технологически для получения индикатора используют стеклянную подложку, на которую методом электронно-лучевого испарения в вакууме наносится рабочая пленка люминесцентного порошка, заключенная между двумя изолирующими слоями, например пленками оксида иттрия.

Передний электрод делается прозрачным, задний изготавливается из непрозрачной алюминиевой пленки заданной конфигурации.

Напыление на алюминиевые сегменты и контактные площадки наносится методом испарения металла в вакууме и с помощью специального трафарета. Для создания сложных рисунков используется фотолитография. Возбуждение электролюминесцентных индикаторов осуществляется переменным напряжением синусоидальной или прямоугольной формы с эффективным значением до 250 В и частотой от 400 Гц до 5 кГц.

Рис. 8.13
Устройство
электролюминесцентного
индикатора:

1 — стекло; 2 — прозрачный электрод; 3 — изолирующая пленка; 4 — слой люминофора; 5 — металлический электрод; 6 — пластмассовый корпус.



8.2.2. ТИПЫ И ПАРАМЕТРЫ ЭЛИ

Электролюминесцентные индикаторы могут применяться как информационное табло, информационные записи и световые указатели (особенно больших форматов), плоские источники рассеяного света. Их несомненные преимущества: низкая потребляемая мощность, получение всех цветов свечения, низкая себестоимость.

Есть перспективы создания электролюминесцентного телевизионного экрана. В отличие от электронно-лучевой трубки, электролюминесцентный экран плоский, проще в управлении, не требует высокого напряжения, а также может отображать весь цветовой спектр. В настоящее время наиболее целесообразно применение электролюминесцентных индикаторов в крупногабаритных многоцветных системах отображения информации группового пользования. Например, индикатор типа З ЭЛ2 предназначен для использования в виде отдельных панелей в сборных многоцветных крупноформатных мнемосхемах, применяемых для отображения состояния сложных систем. Индикатор З ЭЛ1 предназначен для отображения информации, в том числе для индикации положения объекта на рабочем поле из 133 светящихся строк.

Особенностью применения электролюминесцентных индикаторов (ЭЛИ) является необходимость коммутировать переменное напряжение 220 В.

Характеристики ЭЛИ приведены в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Основные характеристики электролюминесцентных индикаторов

Тип	Функциональные возможности	Область применения	Основные параметры	
			Яркость, кд/м ²	Напряжение возбуждения, В
И ТЭЛ1, И ТЭЛ2, И ТЭЛ3	Одноэлементные ЭЛИ	Крупногабаритные пульты, экраны, табло	10...30	220
З ЭЛ-41, З ЭЛ-42	Многоэлементные ЭЛИ. Число элементов — 35	Устройства индикации	20	220
З ЭЛ1	Многоэлементные ЭЛИ. Число элементов в виде светящихся зеленых полосок — 133	Устройства индикации	25	220
И ЭМ1-160М, И ЭМ1-200М, И ЭМ2-200М, И ЭМ2-160М	Мнемонические ЭЛИ разного цвета свечения	Предназначены для отображения информации на мнемонических схемах и пультах	10...25	220

8.2.3.
СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ЭЛИ

В схеме, представленной на рис. 8.14, роль коммутирующего элемента выполняет транзистор.

При отсутствии сигнала на базе транзистор $T1$ заперт, ток через первичную обмотку трансформатора не протекает, индикатор не возбужден. При подаче на базу транзистора сигнала частотой 40 Гц на вторичной обмотке повышающего трансформатора появляется переменное напряжение с эффективным значением около 220 В.

На рис. 8.15, 8.16 представлены бестрансформаторные схемы коммутации электролюминесцентных индикаторов. В схеме на рис. 8.15 при поступлении положительного сигнала на управляющий электрод коммутационный транзистор переходит в проводящее состояние. Особенностью транзистора данного типа является

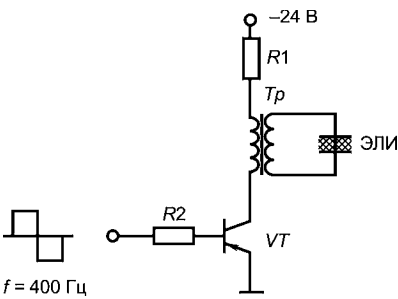


Рис. 8.14
Трансформаторная схема коммутации индикатора

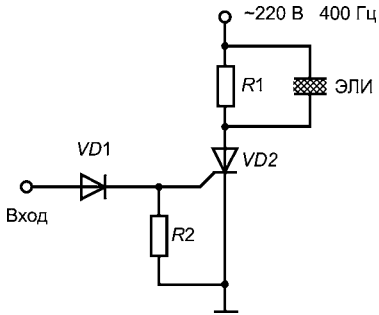


Рис. 8.15
Бестрансформаторная схема коммутации индикатора

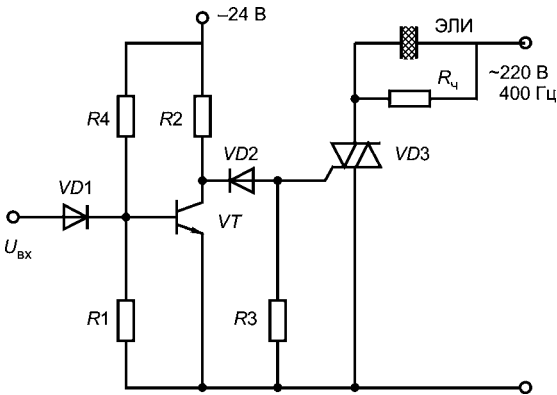


Рис. 8.16
Схема коммутации сегмента с большой светящейся площадью

его двунаправленная проводимость. После того как транзистор открывается, все рабочее напряжение внешнего питающего генератора прикладывается к соответствующему сегменту индикатора.

На рис. 8.16 приведена схема применения более мощного симметричного тиристора типа КУ208Г для коммутации электролюминесцентного индикатора. Входной сигнал, поступающий на базу транзистора VT_1 , формирует на коллекторе отрицательный импульс, который, проходя через диод на управляющий электрод симметричного тиристора VD_3 , открывает его. При этом загорается соответствующий сегмент или знак индикатора. Для устранения засветки индикатора от токов утечки симметричного тиристора параллельно сегментам включается шунтирующий резистор. Перспективным прибором для коммутации электролюминесцентного индикатора является резистивный оптрон, который отличается высокой надежностью, простотой управления, практически исключает паразитную засветку сегментов индикатора.

Управление электролюминесцентными матричными индикаторами с построчной адресацией имеет свои особенности. Структурная схема управления для индикатора с организацией семь строк на пять столбцов показана на рис. 8.17.

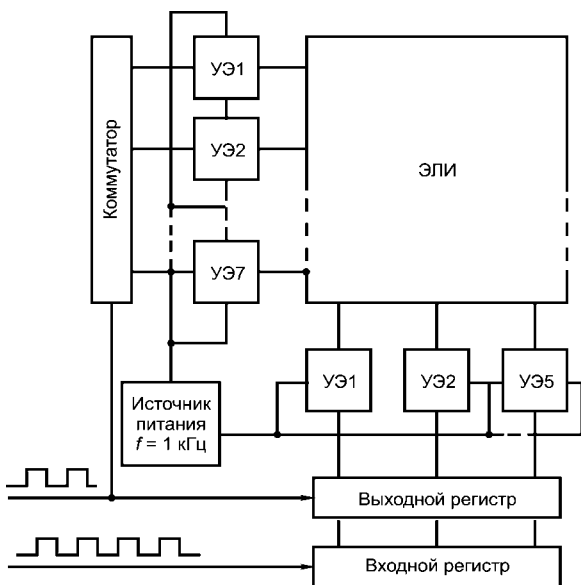


Рис. 8.17
Структурная схема управления матричным электролюминесцентным индикатором

Все сегменты матрицы связаны с источником питания: построчно через управляющие элементы УЭ1...УЭ7, а по столбцам — через УЭ1...УЭ5. Схема содержит коммутатор строк и два регистра, связанных со столбцами индикатора. Входная информация, соответствующая состоянию первой строки, в виде двоичного 5-разрядного числа поступает на входной регистр. Затем на регистры и коммутатор подаются два установочных импульса, первый из которых возвращает устройство в исходное состояние (обнуляет), а второй дает команду передачи информации из входного регистра в выходной и одновременно сигнал коммутатору на включение управляющего элемента первой строки матрицы.

В это время во входной регистр вводится новый двоичный код, соответствующий состоянию возбуждения второй строки, и процесс повторяется. Работая в таком режиме, индикатор может отображать непрерывно меняющуюся информацию.

8.3. ПЛАЗМЕННЫЕ ПАНЕЛИ И УСТРОЙСТВА НА ИХ ОСНОВЕ

Перспективными устройствами отображения информации являются плазменные панели, объем продаж которых к 2005 г. достиг 90 млрд долларов [37].

Основными достоинствами плазменных панелей являются:

- отсутствие вредного воздействия на организм человека;
- большой угол обзора (до 160°);
- малое время готовности;
- большой срок службы;
- высокая надежность, механическая и климатическая устойчивость.

Плазменные панели используются в телевизионных видеомодулях, мониторах специального применения, экранах коллективного пользования и других системах.

Одна из первых разработок телевизионного модуля содержала плазменную панель с диагональю 40 дюймов и обеспечивала яркость 300 кд/м². Конструкция ячейки индикации телевизионного модуля показана на рис. 8.18, структура индикаторной ячейки

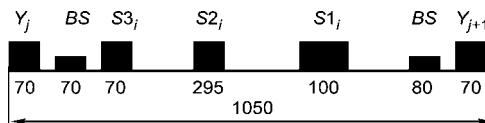


Рис. 8.18

Конструкция ячейки индикации телевизионного модуля

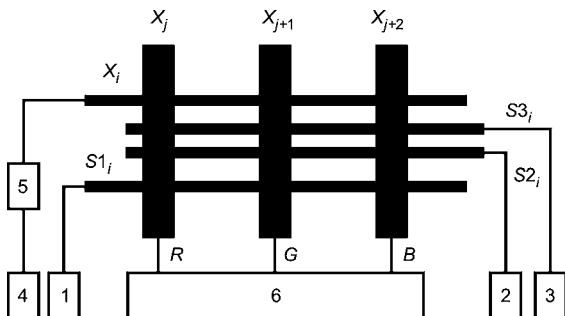


Рис. 8.19
Структура индикаторной ячейки

изображена на рис. 8.19, временная диаграмма импульсов приведена на рис. 8.20.

На основе плазменных панелей создаются цветные мониторы с числом элементов от 128×128 до 1024×1024 с шагом расположения $0,7 \dots 0,28$ мм.

Параметры мониторов оранжево-красного и зеленого цветов свечения приведены в табл. 8.3.

Современные плазменные панели содержат 1024×1024 триад элементов, а мониторы на их основе обеспечивают яркость до 500 кд/м² и контраст до $500 : 1$.

Принципиально новым видом панелей для экранов коллективного пользования (ЭКП) являются плазменные панели переменного тока. Они могут эффективно использоваться для отображения компьютерной и телевизионной информации. По сравнению с ЭКП на панелях постоянного тока новые панели обладают в $5 \dots 6$ раз большей яркостью без увеличения потребляемой мощности, способны отображать до 256 градаций по каждому цвету и экологически безвредны (в составе газового наполнения панелей отсутствует ртуть). Как и ЭКП на панелях постоянного тока, плазменные панели характеризуются небольшим весом (40 кг/м²) и малой толщиной (до 8 см), широким углом обзора (до 140°), высокой надежностью, простотой обслуживания.

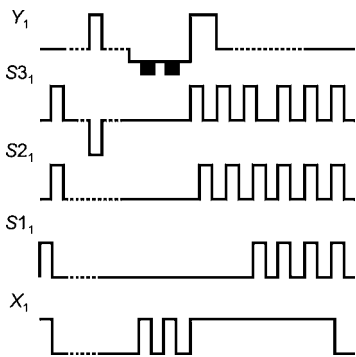


Рис. 8.20
Временная диаграмма импульсных напряжений

Сравнению с ЭКП на панелях постоянного тока новые панели обладают в $5 \dots 6$ раз большей яркостью без увеличения потребляемой мощности, способны отображать до 256 градаций по каждому цвету и экологически безвредны (в составе газового наполнения панелей отсутствует ртуть). Как и ЭКП на панелях постоянного тока, плазменные панели характеризуются небольшим весом (40 кг/м²) и малой толщиной (до 8 см), широким углом обзора (до 140°), высокой надежностью, простотой обслуживания.

Таблица 8.3

Параметры мониторов оранжево-красного и зеленого цветов свечения

Наименование параметра, единица измерения	Мониторы	
	оранжево-красного цвета свечения	зеленого цвета свечения
Информационная емкость, пикселей	640×480	640×480
Яркость свечения, кд/м ²	35	200
Размер элемента отображения, мм	0,28	0,42
Размер рабочего поля по диагонали, дюймов	10	14
Читаемость информации при освещенности, лк	30 000	75 000
Потребляемая мощность при 20% засветке, Вт, не более	12	30
Габаритные размеры (без блока питания), мм	240×195×90	320×256×105
Присоединительные размеры (винты М5 с лицевой стороны монитора), мм	266×181	320×265
Температурный диапазон эксплуатации мониторов, °С	-40...+55	-40...+55

Последовательность импульсов, изображенных на временной диаграмме (рис. 8.20), образует одно субполе кадра и позволяет рассмотреть режимы инициализации (подготовительного общего стирания, общего зажигания и общего стирания), адресации (селективной записи), подготовки индикации и самой индикации.

Режим подготовительного общего стирания используется для создания одинакового состояния всех индикаторных ячеек перед режимом общего зажигания путем формирования на всех электродах нулевого напряжения в течение периода, равного длительности процесса деионизации разряда.

Режим общего зажигания заключается в возбуждении разрядов между электродами Y и $S3$. Для этого на электродах Y формируют положительный импульс с амплитудой U_2 , а на электроде $S3$ — импульс отрицательной полярности с амплитудой, которая не превышает U_2 . Формирование двух следующих друг за другом импульсов общей записи на электродах Y и $S3$ позволяет расширить диапазон управления, но приводит к уменьшению собственного яркостного контраста индикаторных ячеек.

Режим общего стирания реализуется сразу после режима общего зажигания и аналогичен режиму подготовительного общего стирания. При этом все индикаторные ячейки ГИП переводятся в «выключенное» состояние, т. е. такое, при котором последующая подача импульсов поддержки на электроды ГИП не приведет к возникновению разрядов и свечению каких-либо ячеек. Режим

общего стирания создает оптимальные условия для селективной записи индикаторных ячеек в режиме адресации.

Режим адресации (селективной записи) обеспечивает перевод адресуемых (выбранных) индикаторных ячеек ГИП в состояние «включено», т. е. такое, при котором подача на электроды Y , $S3$ и $S2$ импульсов поддержки в режиме подготовки индикации приведет к возбуждению разрядов в этих ячейках, а последующая подача импульсов поддержки на электроды $S3$, $S2$ и $S1$ — к свечению этих ячеек в течение индикации.

Селективная запись в адресуемых ячейках производится с участием электродов управления X . На индикаторных электродах Y устанавливают напряжение «полки» U_Y , а на электродах $S3$, $S2$ и $S1$ — нулевое напряжение. На электродах Y последовательно, с $Y1$ до $Y480$, формируются импульсы сканирования отрицательной полярности с амплитудой $U_{СК}$, суммирующиеся с напряжением U_Y (адресация строк). На выбранных в соответствии с выходными данными электродах X устанавливается напряжение U_X , а на остальных электродах X — низкое напряжение. При этом в адресуемой строке Y_i инициируется разряд в ячейках с высоким напряжением U_X , который вызывает разряд между электродами Y и X , переводя эти ячейки в состояние «включено».

Режим подготовки индикации стабилизирует процесс разряда между Y и $S3$ путем подачи на электроды Y импульса положительной полярности, в течение периода деионизации разряда. Последующая подача на электроды $S3$ и $S2$ противофазных импульсов поддержки обеспечивает стабилизацию разряда между электродами $S3$ и $S2$ перед режимом индикации.

В режиме индикации на электроды $S3$ и $S2$ поступают синфазные импульсы поддержки, а на электроды $S1$ подаются противофазные им импульсы поддержания разряда с амплитудой $U1$. При этом на электродах X устанавливают уровень напряжения U_X . Серия разрядов с интенсивным свечением продолжается до окончания режима индикации и перевода ячеек в состояние «выключено» импульсом общего стирания. Видеомодули на 40-дюймовых ГИП имеют следующие основные параметры:

Информационная емкость, пикселей	853×480
Шаг расположения пикселей, мм	1,05
Яркость, кд/м ²	400...450
Контраст	300 : 1
Число градаций яркости по каждому цвету без Y -коррекции	256
Потребляемая мощность, Вт	300

Принципиальным отличием панелей, разработанных ОАО «Плазма», от известных зарубежных аналогов является отсутствие тонкопленочных прозрачных и армирующих электродов индикации. Применяется толстопленочная технология изготовления электродов индикации. Наличие черной матрицы и черных электродов индикации обеспечивает высокий контраст. В течение индикации основной разряд в ячейке происходит между электродами, удаленными на такое расстояние, которое обуславливает формирование в разрядном промежутке положительного столба. В результате достигаются высокие яркость и светоотдача.

8.4. ЭЛЕКТРОХРОМНЫЕ ИНДИКАТОРЫ

К этому классу относятся индикаторы, в которых под влиянием внешнего электрического поля изменяется цвет активного материала. В качестве веществ, меняющих цвет, могут использоваться триоксид вольфрама (WO_3), иридиево-оксидные пленки, ряд других неорганических оксидов, а также некоторые органические вещества — виологены, биперилловые соли, некоторые жидкие кристаллы.

Схематическое изображение электрохромного индикатора представлено на рис. 8.21. Слой WO_3 толщиной $0,1 \dots 1$ мкм создается на стеклянной подложке — наносится на прозрачный электрод (пленку In_2O_3 толщиной $0,1 \dots 0,2$ мкм), например, методом термического напыления. Поверх активного слоя напыляют слой диэлектрика (например, SiO_2 толщиной $0,05$ мкм) и затем пленочный электрод (золото, толщина пленки $0,01$ мкм).

Если на прозрачный электрод такой ячейки подается отрицательный потенциал, из него в WO_3 будут инжектироваться электроны. В результате на катоде происходят реакции образования вольфрамовой бронзы и в активном слое возникают центры окрашивания: пленка становится синей. Реакция образования вольфрамовой бронзы обратима: при перемене полярности питающего напряжения индикатор восстанавливает начальный цвет (инъекции электронов из пленки золота препятствует слой SiO_2). Рабочее напряжение подобных индикаторов составляет доли вольт, контраст 2 : 1 достигается примерно за секунду.

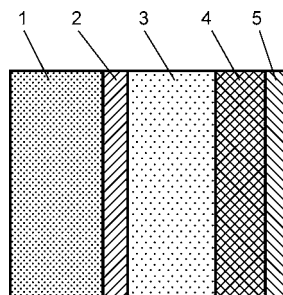


Рис. 8.21
Устройство твердотельного электрохромного индикатора:

1 — стеклянная пластина; 2 — прозрачный электрод; 3 — слой аморфного WO_3 ; 4 — слой диэлектрика; 5 — электрод.

Важной особенностью электрохромного индикатора является наличие памяти: окраска активного слоя может сохраняться в течение многих часов, пока не будет подан импульс стирающего напряжения противоположной полярности. Заряд, требуемый для изменения цвета индикатора, оказывается очень мал (до 5 мКл/см²). Таким образом, приборы этого типа более экономичны, чем жидкокристаллические.

Основные недостатки электрохромных индикаторов: инерционность (время переключения может достигать 1 с) и невысокая долговечность. Они выдерживают не более $1 \cdot 10^7$ переключений, а это означает, что, например, при использовании в часах для высвечивания секундной цифры их срок службы составит не более 3000 ч. Быстродействие таких индикаторов можно повысить, используя в качестве активного материала не твердое вещество, а жидкость, однако срок их службы при этом еще больше снижается (внутри ячейки могут происходить неконтролируемые химические реакции); слабее в последнем случае оказывается выражен и эффект памяти.

Таблица 8.4

Параметры оптоэлектронных индикаторов

Тип индикатора	Яркость, кд/м ²	Цвет свечения	Время переключения, с	Управляющее напряжение, В	Расходуемая мощность на знак, мВт	Угол обзора
Активные						
Вакуумные накаливаемые	500...20 000	Желтый, синий	$10^{-2} \dots 10^{-1}$	5	50...1000	$\pm 60^\circ$
Вакуумные люминесцентные	30...1000	Зеленый, желтый, красный	10^{-3}	50...70	100	$\pm 45^\circ$
Газоразрядные	50...900	Зеленый, желтый, красный	$10^{-4} \dots 10^{-3}$	70...300	30...500	$\pm 45^\circ$
Светодиодные	10...400	Красный, голубой	$10^{-8} \dots 10^{-6}$	0,5...10	10...700	$\pm 50^\circ$
Электролюминесцентные	10...70	Зеленый, желтый, красный	10^{-2}	115...220	5	$\pm 80^\circ$
Пассивные						
Жидкокристаллические	—	—	10^{-1}	3...30	$10^3 \dots 10^{-1}$	$\pm 30^\circ$
Электрохромные	—	—	$10^{-2} \dots 1$	0,1...1	$10^{-3} \dots 10^{-1}$	$\pm 60^\circ$

В целом, однако, электрохромные индикаторы вполне пригодны для высвечивания медленно меняющейся информации, когда отчетливее выявляются их достоинства — экономичность и высокий (не ниже, чем у жидкокристаллических индикаторов) контраст. Температурный же диапазон работы электрохромных индикаторов даже шире (от -20 до 70°C), вдобавок информация может считываться при больших углах обзора, чем в случае жидкокристаллических индикаторов.

Параметры основных типов оптоэлектронных индикаторов приведены в табл. 8.4.

8.5. ОТОБРАЖЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ ИНДИКАТОРНЫМИ ПРИБОРАМИ

Приборы предоставляют наблюдателю двоичную информацию при помощи светящегося и несветящегося состояний либо сигнальной информации. В отличие от них, индикаторные устройства могут предоставлять значительно больший объем информации, поскольку они способны отобразить не только светящееся или несветящееся, но и дополнительные состояния. На каждой позиции цифрового индикатора могут отображаться цифры от 0 до 9, а на каждой позиции буквенно-цифрового индикатора — цифры или буквы (в некоторых случаях весь алфавит), а также несколько

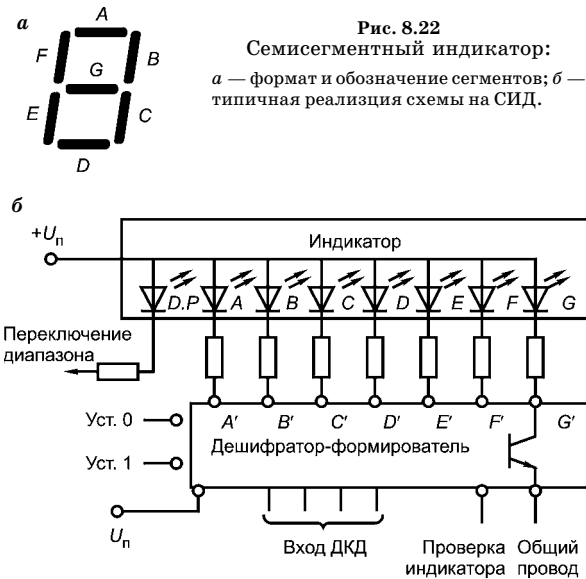


Таблица 8.5

Таблица истинности

Входной ДКД-код				Состояния дешифратора-формирователя							Отображаемые цифры
2 ³	2 ²	2 ¹	2 ⁰	A'	B'	C'	D'	E'	F'	G'	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1
0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	2
0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	3
0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	4
0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	5
0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	6
0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	7
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	9

Логический уровень 0 — сегменты светятся, логический уровень 1 — сегменты не светятся.

специальных символов. Индикаторы могут содержать один или множество цифровых разрядов или знакомест. В свою очередь, каждая позиция индикатора состоит или из набора прямоугольных сегментов, или из матрицы точек.

Расположение элементов и схема управления 7-сегментным индикатором представлены на рис. 8.22. Возможные комбинации входных цифровых управляющих сигналов для индикации цифр от 0 до 9 приведены в табл. 8.5.

На рис. 8.23...8.26 приведены примеры наиболее употребительных форматов шрифтов и показаны типичные цифры, буквы и символы, которые они позволяют отображать.

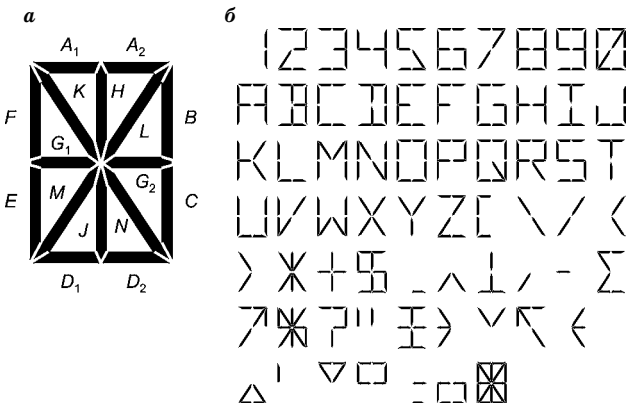


Рис. 8.23
14-сегментный шрифт:

а — формат и обозначение сегментов (сегменты А и D состоят из двух половинок, которые возбуждаются одновременно); б — типичный набор отображаемых символов.

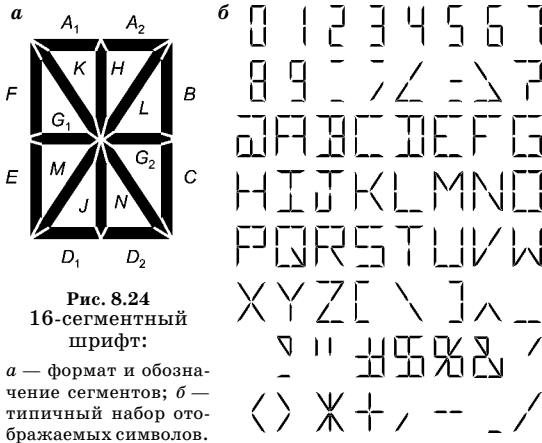


Рис. 8.24
16-сегментный шрифт:

a — формат и обозначение сегментов; *б* — типичный набор отображаемых символов.



Рис. 8.25
Модифицированный точно-матричный шрифт 4 + 7:

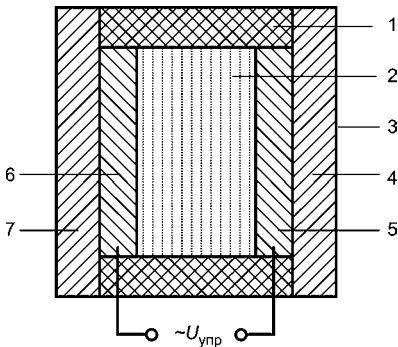
a — формат точек; *б* — типичный набор отображаемых шестнадцатеричных символов.



Рис. 8.26
Полный точно-матричный шрифт:
a — формат 5x7; *б* — типичный набор символов кода ASCII.

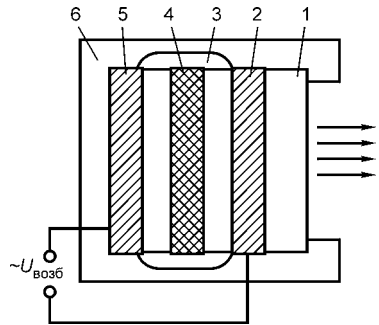
Тестовые вопросы к главе 8
«ИНДИКАТОРНЫЕ ПРИБОРЫ»

- 8.1. На каком явлении основан принцип действия жидкокристаллических индикаторов с динамическим рассеянием:
 а) рассеяние электронов;
 б) рассеяние дырок;
 в) рассеяние ионов;
 г) рассеяние фотонов?
- 8.2. На каком явлении основан принцип действия жидкокристаллических индикаторов с твист-эффектом:
 а) рассеяние электронов;
 б) рассеяние дырок;
 в) рассеяние ионов;
 г) рассеяние фотонов?
- 8.3. Какая цифра на схеме ЖКИ с динамическим рассеянием обозначает прокладку:
 а) 1;
 б) 2;
 в) 3;
 г) 4;
 д) 5;
 е) 6;
 ж) 7?



- 8.4. Какая цифра на схеме ЖКИ с динамическим рассеянием (см. вопрос 8.3) обозначает жидкие кристаллы:
 а) 1;
 б) 2;

- в) 3;
 г) 4;
 д) 5;
 е) 6;
 ж) 7?
- 8.5. Какая цифра на схеме электролюминесцентного индикатора обозначает стекло:
 а) 1;
 б) 2;
 в) 3;
 г) 4;
 д) 5;
 е) 6?



- 8.6. Какая цифра на схеме электролюминесцентного индикатора (см. вопрос 8.5) обозначает прозрачный электрод:
 а) 1;
 б) 2;
 в) 3;
 г) 4;
 д) 5;
 е) 6?
- 8.7. Какая цифра на схеме электролюминесцентного индикатора (см. вопрос 8.5) обозначает изолирующую пленку:
 а) 1;
 б) 2;
 в) 3;
 г) 4;

- д) 5;
е) 6?
- 8.8. Какая цифра на схеме электролюминесцентного индикатора (см. вопрос 8.5) обозначает слой люминофора:
- а) 1;
б) 2;
в) 3;
г) 4;
д) 5;
е) 6?
- 8.9. Какая цифра на схеме электролюминесцентного индикатора (см. вопрос 8.5) обозначает металлический электрод:
- а) 1;
б) 2;
в) 3;
г) 4;
д) 5;
е) 6?
- 8.10. Какая цифра на схеме электролюминесцентного индикатора (см. вопрос 8.5) обозначает пластмассовый корпус:
- а) 1;
б) 2;
в) 3;
г) 4;
д) 5;
е) 6?

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

9.1. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

9.1.1. БЛОКИНГ-ГЕНЕРАТОР

Вариант импульсного устройства типа блокинг-генератора представлен на рис. 9.1. Применение диодного оптрона позволяет исключить импульсный трансформатор, не поддающийся микроминиатюризации. Оptron пропускает постоянный ток, поэтому схема формирует импульсы прямоугольной формы, длительность которых ограничена лишь инерционностью транзистора и зависит от емкости конденсатора C . Достоинством оптрона является высокая помехоустойчивость устройства по цепи питания.

Рассмотрим схему работы оптрона, представленную на рис. 9.1а. При поступлении на вход запертого транзистора запускающего сигнала i_r , транзистор переходит в активный режим, через СИД оптрона начинает протекать ток коллектора транзистора i_k и в базу транзистора через фотодиод оптрона и конденсатор C поступает ток обратной связи $i_б$. Под действием сигнала обратной связи транзистор переходит в режим насыщения. Амплитуда выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ и амплитуда коллекторного тока насыщения $I_{\text{кн}}$ равны.

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{п}} - U_{\text{н}} - U_{\text{сд}}; \quad (9.1)$$

$$I_{\text{кн}} = \frac{U_{\text{вых}}}{R_{\text{к}}};$$

$$i_б(t_{\text{н}}) = I_{\text{бн}} = I_{\text{б0}} e^{-t_{\text{н}}/\tau_e}, \quad (9.2)$$

где $I_{\text{бн}} = I_{\text{кн}}/\beta$; β — коэффициент передачи по току транзистора.

Современные СИД, в отличие от транзистора, характеризуются меньшим максимально допустимым прямым током. Поэтому предельное значение выходного тока в схеме определяется не транзистором, а СИД оптрона и составляет 100...200 мА. Длительность выходного импульса $t_{\text{н}}$ равна времени, в течение которого базо-

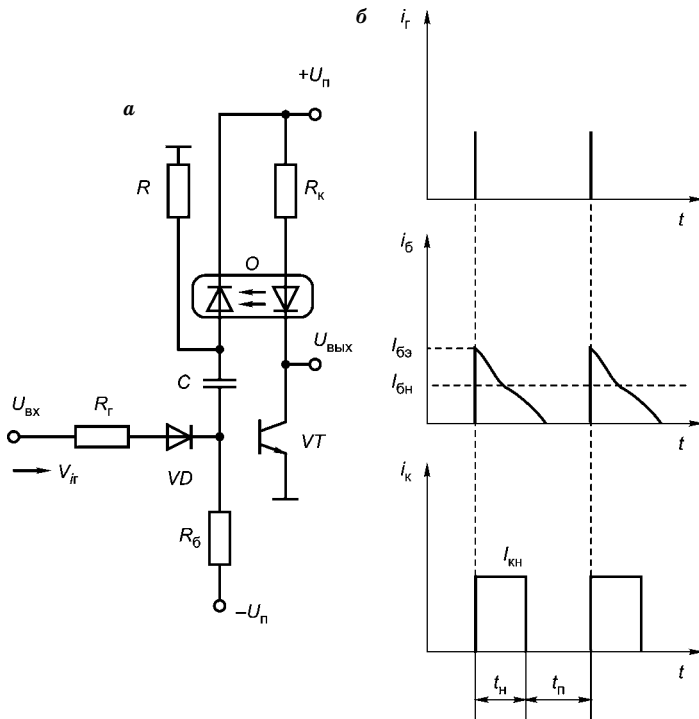


Рис. 9.1
 Оптронный блокинг-генератор:
 а — схема; б — диаграмма работы.

вый ток транзистора падает от начального значения $I_{б0}$ до тока на границе насыщения $I_{бн}$, т. е.

$$I_{б0} = \frac{I_{кн}}{K_I} \frac{R}{R + r_б}, \tag{9.3}$$

где k_1 — коэффициент передачи по току оптрона; $r_б$ — сопротивление базы транзистора; τ_c — постоянная времени спада тока; $\tau_c = r_б C$. Запишем выражение для расчета длительности импульса:

$$t_{и} = \frac{\tau_c \ln I_{б0}}{I_{бн}} = \tau_c \ln k_1 \beta. \tag{9.4}$$

Таким образом, для формирования импульсов большой длительности необходимо применение транзисторов с большим β , так как k_1 диодных оптронов меньше $5 \cdot 10^{-2}$.

Длительность паузы между импульсами t_n определяется временем восстановления базовой цепи — длительностью разряда хранирующего конденсатора C через резистор R :

$$t_{\text{п}} = 2,3 \frac{r_6 R}{r_6 + R} C. \quad (9.5)$$

Оптронный блокинг-генератор по сравнению с трансформаторным обладает повышенной термостабильностью, так как с ростом температуры коэффициент передачи оптрона уменьшается, а транзистора — увеличивается; кроме того, схема конструктивно проще, технологичнее. Недостатком схемы является снижение энергии выходного импульса, связанное с малой допустимой мощностью рассеяния СИД оптрона.

В импульсных схемах оптрон может выступать как многофункциональный элемент, т. е. возможно использование дополнительно к электрической изоляции других свойств оптрона. Например, наличие на вольт-амперных характеристиках фотодиодов диодных оптронов участков с большим дифференциальным сопротивлением позволяет использовать их в качестве источника постоянного тока для заряда емкости в генераторах линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН).

9.1.2. ГЕНЕРАТОР ЛИНЕЙНО ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Схема ГЛИН изображена на рис. 9.2. Длительность рабочего (прямого) хода t_p выходного напряжения задается открытым состоянием диодного оптрона O_1 , длительность обратного хода — разрядом конденсатора C через транзисторный оптрон O_2 . Амплитуда выходного напряжения составляет примерно $U_{\text{п}}$. Таким образом, для расчета t_p из схемы (рис. 9.2б) имеем

$$t_p = \frac{U_{\text{п}} C}{k_1 I_{\text{ВХ}}}, \quad (9.6)$$

где k_1 — коэффициент передачи O_1 по току.

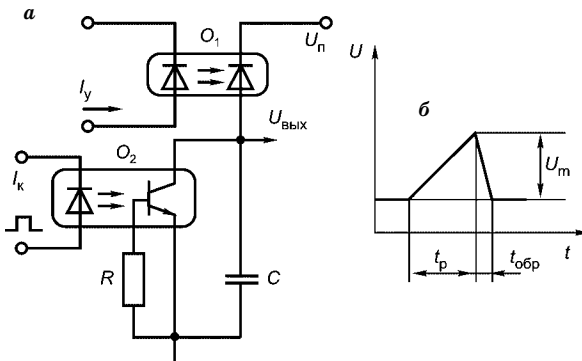


Рис. 9.2
Оптронный генератор
линейно изменяюще-
гося напряжения:
а — схема; б — диаграм-
ма работы.

В диапазоне напряжения 0,5...15 В изменение тока фотодиода для современных оптронов составляет 0,2...1 мкА. Включение в цепь базы транзистора O_2 резистора R позволяет регулировать длительность обратного хода ГЛИН, что используется для получения импульсов треугольной формы.

9.1.3. ГЕНЕРАТОР С МОСТОМ ВИНА

Схема генератора с мостом Вина приведена на рис. 9.3. Устройство содержит операционный усилитель DA и полосовую фазирующую цепь, состоящую из конденсаторов C и фоторезисторов R_{Φ} . На частоте генерации полосовая фазирующая цепь вносит нулевой фазовый сдвиг, а подключение ее к неинвертирующему входу ОУ обеспечивает баланс фаз. Баланс амплитуд обеспечивается элементами цепи отрицательной обратной связи: резисторами $R2$ и $R1$. Если коэффициент усиления ОУ с ООС равен затуханию фазирующей цепи на частоте генерации A_0 , то устройство генерирует колебания синусоидальной формы.

Если

$$\frac{R2}{R1} \gg A_0,$$

то устройство генерирует колебания прямоугольной формы.

Частота колебаний зависит от сопротивлений фоторезисторов, управляемых прямым током, протекающим через светодиод VD :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi CR_{\Phi}}. \tag{9.7}$$

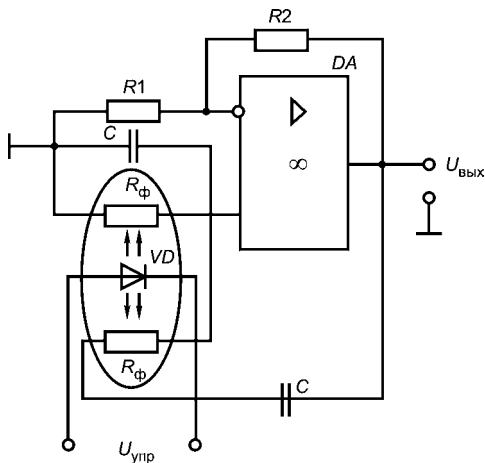


Рис. 9.3
Схема оптоэлектронного генератора с мостом Вина

9.2. ПРИМЕНЕНИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ В АНАЛОГОВЫХ КЛЮЧАХ И РЕГУЛЯТОРАХ

Аналоговые оптроны используются в широкополосных трансформаторных устройствах, усилителях различных сигналов, аналоговых ключах и регуляторах. Схема простого усилителя и аналогового ключа на основе оптрона, обеспечивающего электрическую развязку от остальной части схемы, представлена на рис. 9.4.

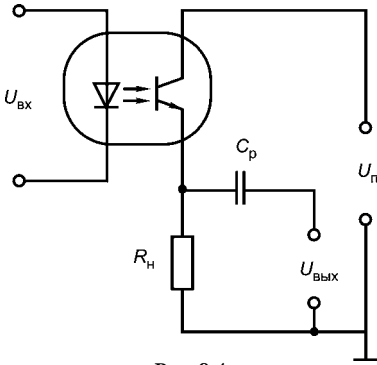


Рис. 9.4

Пример применения оптронов
в аналоговом устройстве

Входной сигнал, подаваемый на вход оптрона, после преобразования в излучение попадает на базу фототранзистора, осуществляя тем самым управление амплитудой тока на выходе оптопары и напряжением — на сопротивлении нагрузки R_n . Коэффициент передачи всего устройства определяется значением K_I используемого транзисторного оптрона. Если на вход светодиода подать запирающее напряжение $U_{упр}$, то коммутации аналогового сигнала не будет (состояние «выключено»).

В состоянии «включено» к светодиоду прикладываются отпирающее напряжение смещения и коммутируемое напряжение.

Электронный регулятор и ключ потенциометрического типа могут быть выполнены по схеме, представленной на рис. 9.5. В ней используется диодно-резисторный оптрон. Фоторезистор выступает в качестве сопротивления управляемого световым потоком светодиода. Коэффициент передачи определяется по формуле

$$K = \frac{R_n}{R_n + R_{\Phi}}$$

При $U_{упр} = 0$ коэффициент передачи близок к нулю.

В аналоговых устройствах используют диодные и резисторные, а также (в некоторых случаях) транзисторные оптопары. Требования к аналоговым оптронам определяются конкретными условиями их применения, поэтому общего критерия качества, подобного тому, который имеет место в случае цифровых оптронов (добротности), для них нет.

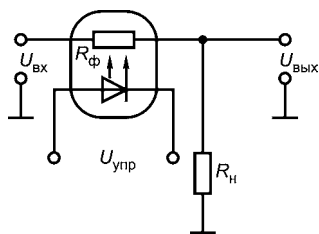


Рис. 9.5
 Схема электронного регулятора и ключа потенциометрического типа

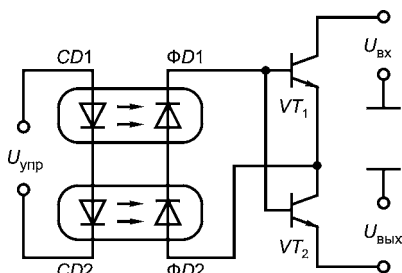


Рис. 9.6
 Принципиальная схема оптоэлектронной ИМС К249КН1

В то же время для сохранения формы передаваемого сигнала желательна линейность передаточной характеристики (постоянство K_I в достаточно широком диапазоне токов). Этому требованию в наибольшей мере отвечают диодные оптроны, хотя у них интервал значений I_1 , при которых K_I постоянен, не слишком велик. Так, например, у оптопары АОД 101 даже при термостатировании передача аналогового сигнала с нелинейностью менее 2% обеспечивается в узком диапазоне входных токов (примерно три раза). Ввиду этого при проектировании аналоговых устройств, использующих оптроны, необходимо предусматривать дополнительные меры по линеаризации передаточной характеристики. Перспективно применение дифференциальных оптронов (с одним излучателем и двумя фотоприемниками), у которых коэффициенты передачи по току между излучателем и первым фотоприемником и между излучателем и вторым фотоприемником одинаковы, причем в равной мере меняются в зависимости от условий работы (T , I_1 , U_1). Фотоприемники включают таким образом, чтобы при подаче сигнала входной ток одного из них увеличивался, а другого — в той же мере уменьшался. Увеличение K_I , первого канала оптрона примерно компенсируется уменьшением K_I — коэффициента передачи тока второго, а общая передаточная характеристика оптопары выравнивается.

Принципиальная схема оптоэлектронной ИМС К249КН1 приведена на рис. 9.6. Микросхема предназначена для коммутации аналоговых сигналов. Она содержит два диодных оптрона и электронный ключ на транзисторах VT_1 и VT_2 , выходы которых включены встречно последовательно для уменьшения остаточного напряжения до 0,1 мВ. При протекании прямого тока через светодиоды $CD1$ и $CD2$ возникает световой поток, воздействующий на фотодиоды $ФД1$ и $ФД2$, работающие в фотогальваническом режиме.

Фотодиоды включены последовательно с целью формирования суммарной фото-ЭДС, достаточной для надежного открывания биполярных транзисторов в состоянии «включено». В этом случае биполярные транзисторы имеют низкое выходное сопротивление и коммутирующее напряжение $U_{\text{вх}}$ с малым затуханием поступает в нагрузку ключа.

Если управляющее напряжение отсутствует, светодиоды свет не излучают, следовательно, фото-ЭДС равна нулю, биполярные транзисторы находятся в закрытом состоянии, а ключ обеспечивает состояние «выключено». Микросхема выполнена по гибридно-пленочной технологии, так как светодиоды невозможно изготовить с использованием кремниевой технологии полупроводниковых ИМС.

9.3. ПРИМЕНЕНИЕ ОПТРОНОВ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛОГИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ

Использование оптронов (прежде всего диодных и транзисторных) в цифровых и импульсных устройствах связано с возможностью их быстрого переключения из состояния с низким уровнем сигнала на выходе в состояние с высоким уровнем или наоборот. В качестве примера можно привести оптоэлектронные элементы,

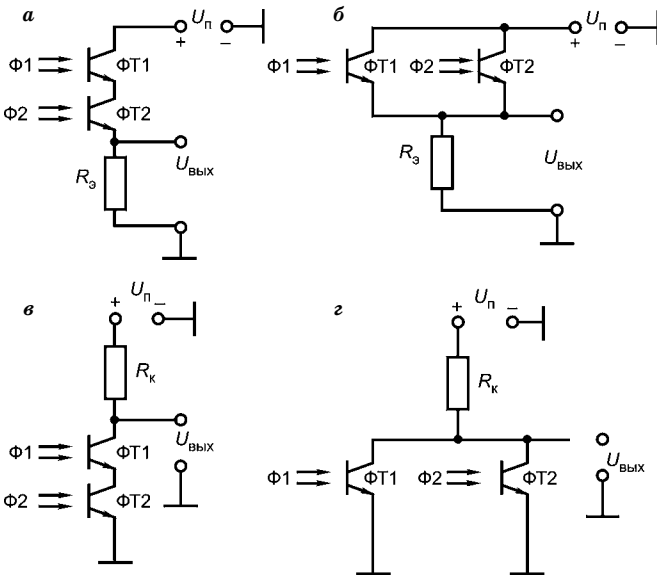


Рис. 9.7
Логические
оптоэлектронные
элементы для
выполнения
операций:
а — И; б — ИЛИ; в —
И-НЕ; г — ИЛИ-НЕ.

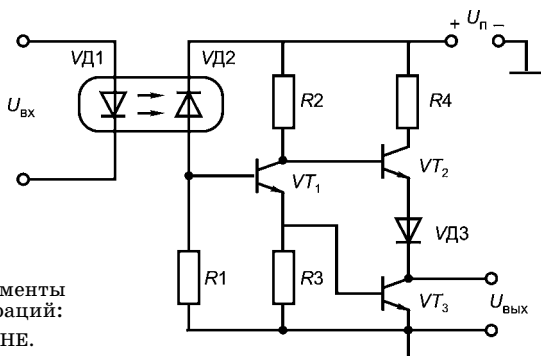


Рис. 9.8
Логические
оптоэлектронные элементы
для выполнения операций:
a — И-НЕ; *б* — ИЛИ-НЕ.

позволяющие реализовать основные логические функции в устройствах цифровых систем.

Так, схема, представленная на рис. 9.7*a*, моделирует операцию логического умножения (И), а схема на рис. 9.7*б* — операцию логического сложения (ИЛИ). В первом случае выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ поддерживается на высоком уровне, близком к напряжению $U_{\text{вх}}$, только если оба фототранзистора — ФТ1 и ФТ2 включены и через них идет ток, близкий к насыщению, а во втором случае — при выходе на насыщение вольт-амперной характеристики любого фототранзистора — ФТ1 или ФТ2. Оптроны могут также с успехом применяться для моделирования и других логических операций, в частности И-НЕ (рис. 9.7*в*) и ИЛИ-НЕ (рис. 9.7*г*).

Еще одним примером использования оптронов в цифровых устройствах может служить оптоэлектронная микросхема серии 249ЛП1, которая изображена на рис. 9.8. При протекании по цепи арсенид-галлиевого светодиода номинального входного тока в цепи фотоприемника (кремниевого фотодиода) возникает фототок, одновременно являющийся базовым для транзистора VT_1 ; этого тока достаточно для отпирания транзистора. Эмиттерный ток транзистора VT_1 поступает в базу транзистора VT_3 и переводит его в режим насыщения. При этом напряжение на выходе микросхемы оказывается равным падению напряжения на насыщенном транзисторе (примерно 0,3 В). Если же входной ток оптрона меньше номинального, то через его фотоприемник течет лишь малый темновой ток и транзистор VT_1 остается запертым. В этом случае через резистор R_2 течет базовый ток транзистора VT_2 , причем его значение таково, что VT_2 находится в режиме насыщения. В результате напряжение на выходе оптопары соответствует потенциалу логической «1» — для микросхемы такого типа это 2,5...3,5 В.

9.4. ПРИМЕНЕНИЕ ОПТРОНОВ КАК АНАЛОГОВ ЭЛЕКТРОРАДИОКОМПОНЕНТОВ

Оптроны внедряются во все новые области электроники, вычислительной техники, автоматики.

Элементарные оптроны и ОЭС широко используются в цифровых устройствах для связи блоков, выполненных на различной основе (например, для сопряжения биполярных и МОП-ИС, туннельно-диодных и транзисторных схем и т. п.); для управления силовыми цепями моторов и реле переменного и постоянного тока от низковольтных маломощных логических схем; для связи логических схем с периферийным оборудованием ЭВМ; в качестве элементов развязки от земли в источниках питания; в качестве мало-мощных реле в электролюминесцентных системах отображения информации; в контрольно-измерительных устройствах, непосредственно подключаемых к силовым цепям переменного тока.

Оптроны, пригодные для передачи аналоговых сигналов, находят все более широкое применение в качестве коммутирующих элементов в линиях телефонной связи, в цепях связи различных датчиков с ЭВМ, в медицинской электронике.

Оптоизоляторы и оптроны с гибким световодом применяются в аппаратуре контроля высоковольтных линий электропередачи; в измерительных системах, предназначенных для работы в условиях сильных помех (СВЧ-наводки, искрение и т. п.); в устройствах управления и контроля высоковольтных электровакуумных приборов (клинстрах, ЭЛТ, ЭОП и т. п.); в технике физического эксперимента.

Оптроны с открытым оптическим каналом (оптопрерыватели и отражательные оптроны) незаменимы в устройствах считывания информации с перфоносителей при ее вводе в ЭВМ, в качестве индикаторов положения объектов и состояния их поверхностей, в качестве датчиков вибрации, заполнения объемов жидкостью и т. п.

Широта функциональных возможностей оптронов обусловлена тем, что они являются схемотехническими аналогами многих традиционных электрорадиокомпонентов, деталей, устройств, что подтверждает табл. 9.1.

Следует в заключение отметить важную роль оптронов в исследовании новых видов излучателей и фотоприемников. Опробование согласованных пар для оптических линий связи проще всего предварительно провести в оптронах. Исследовать временную

Таблица 9.1

Оптрон как аналог электрорадиокомпонентов

Электрорадиокомпонент		Оптронный аналог	
Наименование	Схема	Наименование	Схема
Импульсный трансформатор		Транзисторный и диодный оптроны	
Переключатель		Тиристорный, резисторный и транзисторный оптроны	
Переменный резистор		Резисторный оптрон	
Потенциометр		Сдвоенный резисторный оптрон	
Переменный конденсатор		Оптрон с варикапом	
Разъем		Оптоэлектронный разъем	
Линия связи		Оптрон с гибким световодом	
Батарея		Изолированный источник питания	
Радиолампа		Оптрон с управляемым оптическим каналом	

деградацию, радиационную стойкость, термостабильность, инерционность нового вида излучателя удобнее всего, используя этот излучатель в оптроне с фотоприемником, соответствующие свойства которого хорошо изучены. Оптронные конструкции удобны и для исследования светопередачи в различных оптических средах.

9.5. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Характерным примером оптоэлектронной линейной схемы может служить линейный дифференциальный усилитель, представленный на рис. 9.9а. Оптический канал передачи сигналов, построенный на транзисторных оптопарах, должен быть тщательно симметрирован.

Оптопары подобраны с идентичными характеристиками и параметрами. В режиме покоя через СИД оптопар протекают одинаковые токи ($I_{сд1} = I_{сд2}$). Фототоки оптопар $I_{сд1}$ и $I_{сд2}$ при этом направлены навстречу друг другу и не оказывают влияния на выходной усилитель DA_3 . Возможные временные и температурные изменения электрического статического режима и параметров взаимно компенсируются. С другой стороны, входной сигнал $U_{вх}$, воздействующий на усилитель DA_1 , передается через оптопару и усиливается усилителем DA_3 . Нелинейность передаточных характеристик оптопары в таком устройстве не компенсируется.

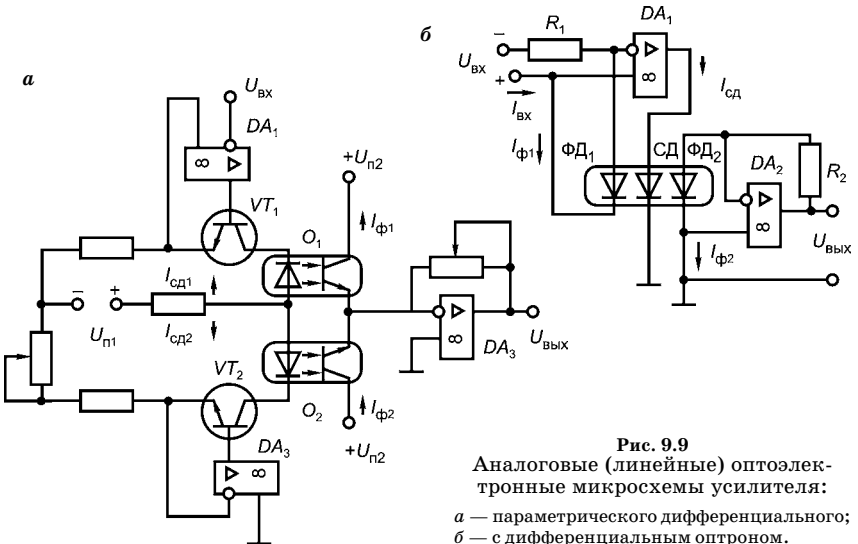


Рис. 9.9
Аналоговые (линейные) оптоэлектронные микросхемы усилителя:
а — параметрического дифференциального;
б — с дифференциальным оптроном.

В результате при высоком $U_{\text{вх}}$ коэффициент передачи K_{i1} оптопары O_1 изменяется, а K_{i2} оптопары O_2 постоянен, так как ток $I_{\text{сд}2}$ фиксирован. Нелинейность усиления такого усилителя составляет 1...5%, стабильность K_i в течение 100 000 ч при 25°C примерно 5...20%.

Значительно повышается качество передачи аналогового сигнала при использовании дифференциальных оптронов. Рассмотрим принцип улучшения линейности передаточной характеристики с помощью дифференциального оптрона на примере схемы на рис. 9.9б. СИД оптрона освещает два однотипных, имеющих идентичные параметры фотодиода: $\Phi Д_1$ и $\Phi Д_2$. Ток светодиода СД в такой схеме определяется не только входным током $I_{\text{вх}}$, но и током обратной связи $I_{\text{ф}1}$:

$$I_{\text{сд}} = K_1(I_{\text{вх}} + I_{\text{ф}1}) = K_1(I_{\text{вх}} + K_{i1}I_{\text{сд}}), \quad (9.8)$$

где K_1 — коэффициент усиления каскада на ИМС DA_1 ; K_{i1} — коэффициент передачи по току пары СД– $\Phi Д_1$ дифференциального оптрона.

При глубокой обратной связи $K_1 K_{i1} \gg 1$, ток СИД $I_{\text{сд}} = I_{\text{вх}}/K_{i1}$ и фототок пары СД– $\Phi Д_2$ оптрона $I_{\text{ф}2} = K_{i2}I_{\text{вх}}/K_{i1}$. Для однотипных пар в дифференциальном оптроне коэффициенты K_{i1} и K_{i2} одинаковы и изменяются в равной степени. В результате $i_{\text{ф}2}(t) = i_{\text{вх}}(t)$ и не зависит от нелинейности и нестабильности характеристик оптрона. Усиление полезного сигнала обеспечивается каскадом DA_2 . Нелинейность усиления такого усилителя с дифференциальным оптроном составляет 0,01...0,2%, стабильность K_1 в течение 100 000 ч равна 0,075%.

9.6. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ЦИФРОВЫХ КЛЮЧЕЙ

Сравнение динамических параметров различных типов оптронов с аналогичными параметрами дискретных диодов, транзисторов и микросхем показывает, что оптроны уступают указанным приборам по быстродействию. Оptronные схемы, вообще говоря, уступают по быстродействию однотипным устройствам без оптических связей. Снижение быстродействия, связанное с введением оптронов, оказывается сравнительно небольшим лишь при согласовании режима эксплуатации элементов оптрона. Использование в оптронах излучателей (СИД) и диодных или транзисторных фотоприемников приводит к тому, что быстродействие таких оптронов определяется в основном барьерными емкостями излучателя

и приемника оптрона. Например, емкости излучателей быстродействующих оптронов составляют 20...300 пФ, а емкости фотодиодов и фототранзисторов — 5...15 пФ. Поэтому для уменьшения длительности переключения оптрона необходимо: 1) форсировать перезаряд входной емкости излучателя; 2) уменьшить длительность перезаряда выходной емкости фотоприемника, изолировав или компенсировав емкостную нагрузку и уменьшив амплитуду выходного напряжения.

Быстрое переключение излучателя с одновременным обеспечением мощного и стабильного потока излучения достигается при управлении оптронами током значительной амплитуды. При этом следует, во-первых, фиксировать уровень прямого тока СИД, чем обеспечить стабильность светового потока; во-вторых, не превышать предельно допустимый ток СИД. Важно также обеспечить универсальность схем питания излучателя, чтобы режим работы СИД не менялся при замене какого-либо компонента схемы.

Рассмотрим, например, переключение излучения от интегральной микросхемы. В схеме ИС, приведенной на рис. 9.10а, используется принцип переключения тока I , заданного в цепи высокоомным резистором R (режим источника тока). Если выходной потенциал ИМС $U_{\text{вых}}$ превышает напряжение $(U_0 - U_{\text{сд}})$, то диод VD заперт, а ток I протекает через светоизлучающий диод, обеспечивая генерацию стабильного светового потока. При переключении ИМС ее выходной потенциал снижается, диод VD отпирается и практически весь ток I переключается на вход ИМС. Светоизлучающий диод быстро запирается. В качестве входной ИМС можно успешно использовать ИМС типа ТТЛ, а также ИМС с эмиттерными связями.

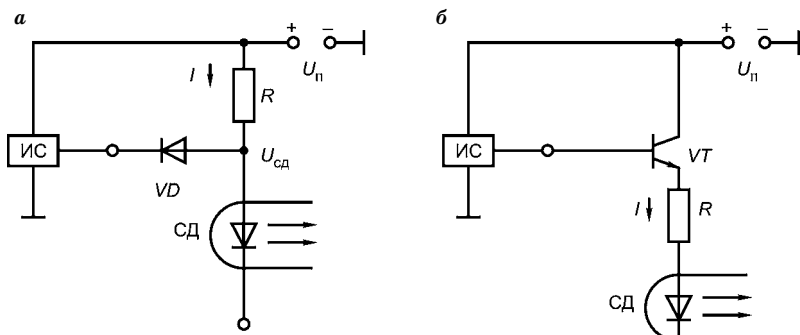


Рис. 9.10

Согласование ИМС со входом оптрона:

а — с помощью диода и резистора; б — с помощью транзисторного усилителя.

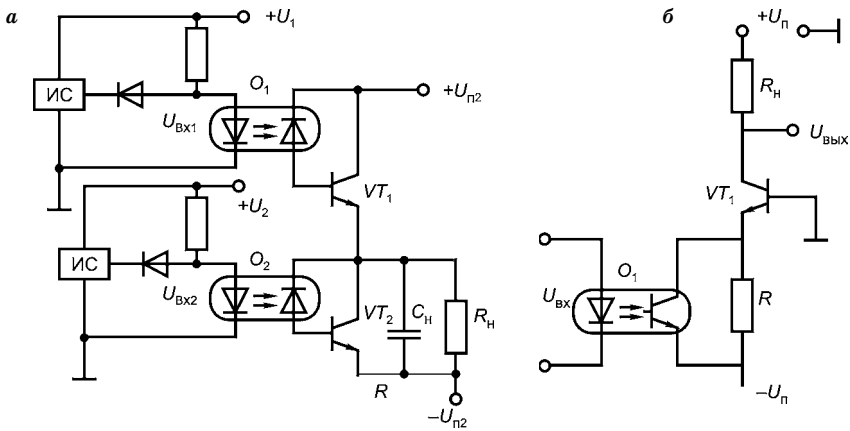


Рис. 9.11
Согласование оптронов с нагрузкой:

a — в виде последовательно соединенных транзисторов; *б* — в виде эмиттерного резистора усилительного каскада.

В качестве согласующего элемента используется также эмиттерный повторитель, как показано на рис. 9.10б. Очевидно, что при этом выходной ток ИМС составляет $(0,01 \dots 0,03) I$ в зависимости от коэффициента передачи по току транзистора. Следует иметь в виду, что эмиттерный повторитель управляется выходным напряжением ИМС, поэтому ток светодиода I может меняться при смене ИМС.

Рассмотрим условия эффективной работы цифровых оптронов на нагрузку. Выходной ток современных диодных фотоприемников относительно невелик, быстродействие фотоприемников ниже быстродействия современных микросхем, поэтому для оптимального согласования выхода диодного фотоприемника с нагрузкой необходимо введение промежуточных усилителей тока, а также форсирование перезаряда выходной емкости фотоприемника и емкости нагрузки.

При работе на значительную емкостную нагрузку эффективна схема, представленная на рис. 9.11а, с последовательным соединением транзисторов в паре с диодным оптроном. При подаче логической «1» (высокий уровень напряжения) на V_{x1} и логического «0» (низкий уровень напряжения) на U_{Bx2} отпираются оптрон O_1 и транзистор VT_1 , а конденсатор C_n быстро заряжается большим эмиттерным током I_{s1} . Транзистор VT_2 и оптрон O_2 при этом закрыты. При изменении сигналов («0» на U_{Bx1} и «1» на U_{Bx2}) конденсатор C_n быстро разряжается через открытый транзистор VT_2 .

Выходные динамические характеристики оптронов улучшаются в схеме на рис. 9.11б, что связано главным образом с уменьшением сопротивления нагрузки фотоприемника.

В цепь связи транзисторного фотоприемника и нагрузочного резистора R_n введен быстродействующий транзистор по схеме с общей базой. Выход фототранзистора оказывается нагруженным на низкоомное входное сопротивление транзистора, что ускоряет перезаряд барьерной емкости. Формирование сигнала на R_n определяется быстродействующим транзистором.

9.7.

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ И УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВАМИ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Весьма интересно применение линейных оптронов в измерительной технике. Например, при измерении напряжения свыше 5 кВ традиционными методами необходимо: 1) использовать высоковольтный разделительный трансформатор; 2) использовать незаземленный синхронизированный осциллограф; 3) измерять напряжения по отношению к «земле» с помощью делителей напряжения. Перечисленные методы трудоемки, требуют громоздкого оборудования, характеризуются низкой точностью.

Хорошие перспективы для снижения массогабаритных показателей измерительного оборудования и улучшения точности измерения высоких напряжений у аналоговых оптронов. Главные их преимущества — простота изоляции и высокое быстродействие. На рис. 9.12 приведены схемы таких оптоэлектронных измерителей. В схеме на рис. 9.12а СИД СД включен последовательно с шунтирующим силовой прибор резистором, что увеличивает потребление мощности и не позволяет измерять обратные напряжения. В схеме на рис. 9.12б измеряемый сигнал $U_{\text{дел}}$ поступает на СИД через понижающий делитель напряжения. Светоизлучающий диод находится под постоянным напряжением $U_{\text{оп}}$, обеспечиваемым компаратором К.

Далее через высоковольтный световод, промодулированный по напряжению $U_{\text{дел}}$, световой сигнал поступает на фотоприемник и затем на измерительное устройство (электронный осциллограф ЭО). Преимущества подобного метода измерения высоких напряжений: 1) небольшие масса и габариты системы измерения, позволяющие встраивать ее в испытательное оборудование; 2) высокое входное сопротивление; 3) возможность работы с заземленным

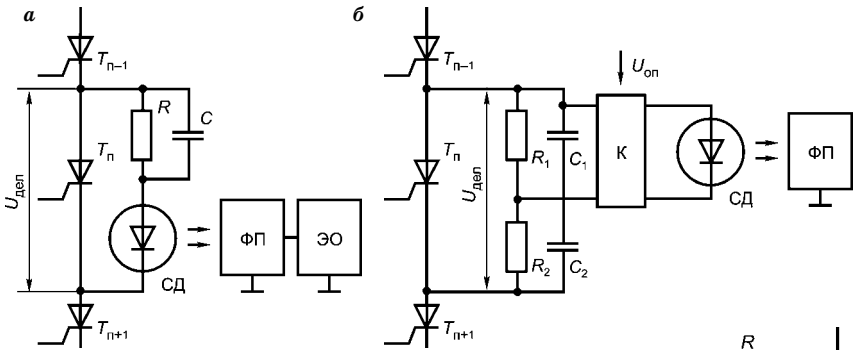


Рис. 9.12
Измерительные оптоэлектронные преобразователи:
а — с последовательным включением шунтирующего резистора; б — с использованием компаратора К.

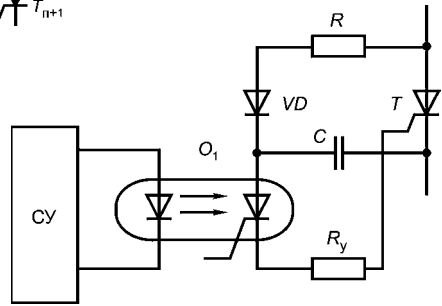


Рис. 9.13
Оптронный формирователь импульсов

оборудованием на стороне измерения. Оптроны в ключевых схемах используются для бесконтактного управления элементами силовых высоковольтных цепей с помощью слаботочных управляющих устройств. Так, применение мощных тиристорных оптопар типа ТО-6,3, ТО-10 и других позволяет переключать напряжение до 1300 В и ток до 320 А с помощью интегральных схем в цепи управления тиристорной оптопарой.

Такие приборы находят применение аналогично обычным тиристорам. Тиристорные оптопары меньшей мощности типа АОУ103 или оптопары с составным транзистором типа АОТ110 используют в схемах формирователей импульсов средней мощности (с амплитудой тока 1...5 А).

Схема такого формирователя для запуска мощного тиристора представлена на рис. 9.13. Конденсатор C предварительно заряжается от источника питания силового тиристора T через резистор R и диод VD , а затем разряжается при поступлении импульса от системы управления $СУ$ на вход тиристорной оптопары O_1 через тиристор оптопары, резистор R_y и управляющий переход тиристора T . Выключение O_1 происходит быстро, так как к моменту запираения через него протекает малый ток, равный $\Delta U/R$ (ΔU — разница падений напряжения на тиристоре T и в O_1).

9.8. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ОПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ЗАПИСИ ИНФОРМАЦИИ

Необходимость разработки оптических записывающих устройств (ЗУ) продиктована тем, что устройства того же назначения, основанные на других физических принципах (магнитной и полупроводниковой памяти), не способны полностью удовлетворить непрерывно возрастающие требования вычислительной техники по объему хранимой информации и плотности ее записи.

Создание и эксплуатация первых образцов оптических ЗУ показали, что эти системы действительно могут дать качественный скачок по ряду определяющих параметров. В то же время выяснилось, что оптические ЗУ сложнее и дороже, чем их неоптические аналоги, менее надежны и долговечны. Для устранения перечисленных недостатков необходимо прежде всего совершенствовать элементную базу оптических ЗУ, а также разработать оптимальную взаимосвязь этих устройств с процессором ЭВМ (более широкое распространение аналоговых методов обработки, методов картинной логики и т. п.). В большой степени решение проблемы обмена информацией между ЗУ и процессором будет зависеть от развития средств связи, также основанном на прогрессе оптоэлектроники.

При создании устройств оптической памяти используются два метода записи и выборки информации: последовательный (поразрядный) и параллельный (постраничный). Структурные схемы и работа соответствующих двух типов запоминающих устройств существенно различаются, как видно на рис. 9.14. В устройствах первого типа используют лишь направленность светового луча, в устройствах второго, голографического типа используют когерентность лазерного излучения и возможность его пространственной модуляции.

В ЗУ последовательного типа (рис. 9.14*a*) запись данных осуществляется выжиганием сфокусированным лазерным лучом отверстий в металлической пленке на прозрачной основе. Адресация лазерного луча осуществляется либо механически (изменением взаимного положения луча и запоминающей среды), либо с помощью дефлектора, отклоняющего световой луч по заданной программе.

В одном из первых устройств подобного типа использовались металлизированные (висмутом или родием) полоски полиэфирной пленки длиной 80 см и шириной 12 см. Каждая такая лента

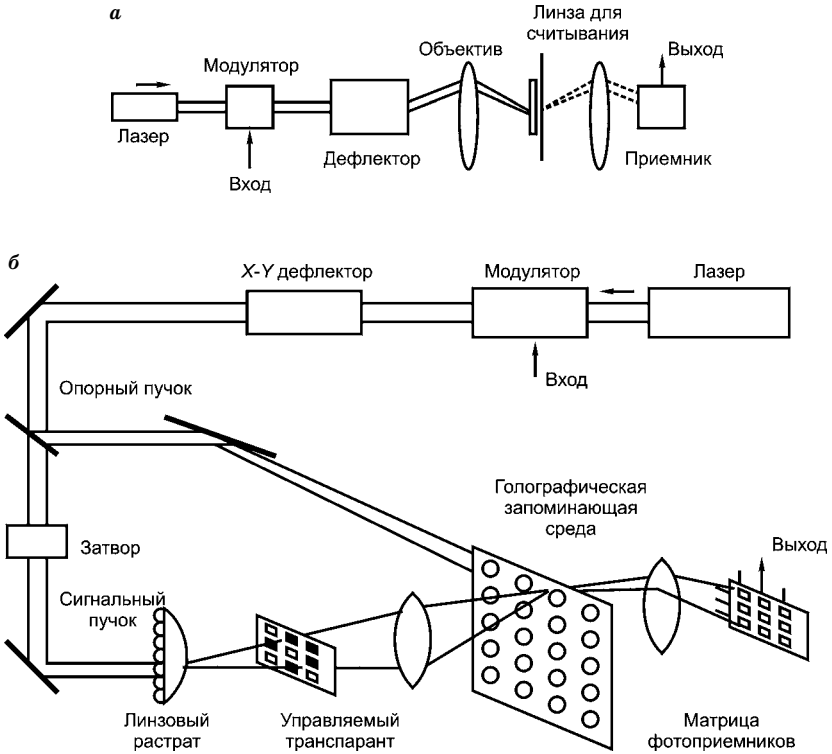


Рис. 9.14
Структурные схемы оптических ЗУ с последовательной (а) и параллельной (б) организацией записи и считывания

имела 18 500 информационных дорожек (расстояние между ними менее 10 мкм) общей емкостью $2,2 \cdot 10^9$ бит (плотность примерно $3 \cdot 10^8$ бит/см²). Для считывания и записи полоски крепились на вращающемся барабане; объединение в одном устройстве 400 барабанов позволяло получить терабитную систему памяти общей емкостью около 10^{12} бит. При записи выжженное отверстие в металлической пленке соответствовало логической единице, а его отсутствие — логическому нулю. Скорость записи при использовании многоканальной лазерной головки составляла $3 \cdot 10^6$ бит/с. По отражению лазерного луча в процессе записи одновременно контролировалась правильность вводимой информации. При считывании время поиска нужной полосы, одной из 400, составляло 5 с, а время поиска данных в пределах одной полосы не превышало 0,2 с.

В качестве оптической запоминающей среды могут использоваться фотографические пленки и пластинки, фоторезисты, фотополимеры. Эти материалы характеризуются очень высокой разрешающей способностью (тысячи линий на миллиметр), но требуют для проявления «мокрой» химической обработки и значительного времени. Кроме того, при длительном хранении органические материалы подвержены старению. Наивысшую стабильность при долговременном хранении информации в оптических ЗУ обеспечивают пленки хрома на стекле.

Поразрядная запись информации нашла широкое применение в лазерных видеопроекторных устройствах, являющихся, по существу, первыми массовыми промышленными оптическими запоминающими устройствами.

В лазерном видеопроекторном устройстве используются отражающие или прозрачные диски, информация на которых записывается в виде точек или насечек, располагающихся на спиральной дорожке с шагом 2...2,5 мкм. Плотность записи достигает примерно 10^7 бит/см, что позволяет на диске стандартного размера ($\varnothing \approx 30$ см) записать 20...30-минутную цветную телепрограмму. При вращении пластинки под воспроизводящей головкой насечки отклоняют сфокусированный на них лазерный луч и изменяют положение светового пятна на матрице фотоприемников, расположенных под пластиной. Полный видеосигнал формируется путем усиления и обработки последовательности фотосигналов.

Основные трудности при конструировании лазерного видеопроекторного устройства связаны с необходимостью обеспечения взаимной точной механической юстировки лазерной головки, пластинки и фотоприемников и создания системы автоматического слежения луча за дорожкой. Несмотря на очень маленькие элементы и расстояния между ними, оптическая видеозапись вполне реальна, так как для этих систем характерны жесткая программа выборки и не очень высокие требования в отношении вероятности сбоев и ошибок.

По оценкам, стоимость видеопроекторного устройства может быть вполне приемлемой (не выше стоимости цветного телевизора), а стоимость записи телепрограммы — на один-два порядка ниже, чем стоимость записи на магнитных лентах.

Все это в сочетании с малыми габаритами делает лазерный проектор весьма перспективным бытовым электрорадиоприбором; именно по этому пути лазер быстрее всего войдет в повседневную жизнь.

9.9. ПРИНЦИП ЛАЗЕРНО-ОПТИЧЕСКОГО СЧИТЫВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Считывание информации представляет собой регистрацию колебаний луча маломощного лазера, отраженного от металлической поверхности диска. Лазер посылает сфокусированный луч света на нижнюю часть диска, а светочувствительный фоторецептор улавливает отраженный луч. Луч лазера, попавший на площадку (плоскую поверхность дорожки), всегда отражается; в свою очередь, луч, попавший во впадину на дорожке, не отражается.

Диск вращается над лазером и рецептором (приемником), поэтому лазер непрерывно излучает свет, а рецептор воспринимает то, что в сущности является набором световых вспышек, повторяющих рисунок впадин и площадок, по которым проходит лазерный луч. Всякий раз, когда луч лазера пересекает границы впадины, изменяется состояние отраженного сигнала. Каждое такое изменение, вызванное пересечением границы впадины, преобразуется в бит со значением «1». Микропроцессоры накопителя пересчитывают переходы светлый–темный и темный–светлый (т. е. границы впадины) в единицы («1»); область, не содержащая перехода, обозначается нулем («0»). Полученный набор двоичных разрядов преобразуется в данные или звук.

Глубина отдельных впадин, образующих дорожку компакт-диска, составляет 0,125 мк, а их ширина — 0,6 мк ($1 \text{ мк} = 10^{-6} \text{ м}$). Минимальная длина впадин или площадок составляет 0,9 мк, максимальная — 3,3 мк, как показано на рис. 9.15.

Высота впадины относительно плоскости площадки имеет особое значение, так как она непосредственно связана с длиной волны луча лазера, используемого при чтении диска. Высота впадины (штриха) составляет ровно $1/4$ часть длины волны лазерного луча. Таким образом, луч лазера, попавший на площадку, проходит расстояние, которое на половину длины волны ($1/4 + 1/4 = 1/2$) больше расстояния, пройденного лучом, отразившимся от впадины. Это означает, что световой луч, отраженный от впадины, на $1/2$

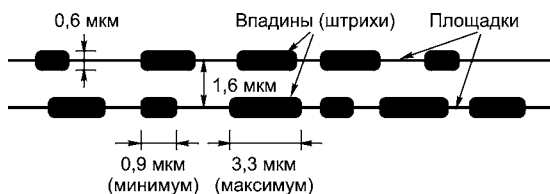


Рис. 9.15
Геометрия впадин
и площадок, образующих дорожку компакт-диска

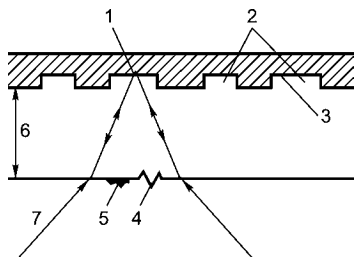


Рис. 9.16

Сечение видеодиска и грампластинки с лазерной записью:

1 — фокальное пятно ($\varnothing \approx 1$ мкм); 2 — структура микроуглублений; 3 — зеркальное покрытие; 4 — царапина; 5 — частица пыли; 6 — прозрачный защитный слой; 7 — луч лазера.

длины волны не совпадает по фазе со световыми лучами, отраженными от поверхности диска. Волны, находящиеся в противофазе, гасят друг друга, тем самым значительно уменьшая количество отражаемого света. В результате впадины, хотя и выстланы металлической отражающей пленкой, становятся «черными» (т. е. не отражающими свет).

Считывающий лазер, используемый в дисковом CD, представляет собой маломощный лазер с длиной волны 780 нм (нанометров) и мощностью около 1 мВт (милливатт). Поликарбонатная пластмасса, используемая при изготовлении компакт-дисков, характеризуется коэффициентом преломления 1,55. Таким образом, свет проходит через пластмассу диска в 1,55 раза медленнее, чем через окружающую среду. Так как частота света остается постоянной, это приводит к уменьшению длины волны в пределах диска с тем же коэффициентом. Следовательно, длина волны с 780 нм уменьшается до 500 нм ($780/1,55 = 500$ нм). Четвертая часть 500 нм составляет 125 нм, или 0,125 мк, это и есть высота впадины (штриха).

Пыль и царапины на защитном слое не мешают, поскольку они находятся вне плоскости фокусировки считывающей оптики, что показано на рис. 9.16.

При считывании микроскопических маленьких структур используются эффекты дифракции и интерференции света.

Оптическая считывающая система для видеодисков включает:

- лазер (мощностью 1 мВт), который излучает линейно поляризованный свет;
- делитель пучка, который разделяет свет на три пучка с соотношением интенсивностей 1 : 3 : 1 (дифракционная решетка, работающая на просвет с минус первым, нулевым и плюс первым порядками дифракции);
- призму Волластона (оптическая длина пути зависит от направления поляризации);
- пластинку $\lambda/4$;

- считывающий объектив, перемещаемый по принципу катушки с подвижным сердечником в направлении оптической оси (ограниченный дифракцией микрообъектив очень малой массы);
- систему фотоприемников, а также цилиндрическую линзу.

Рассеянный в обратном направлении от диска свет лазерного пучка фиксируется приемником, а лучи, использованные для слежения за дорожкой, попадают на приемники слежения, как показано на рис. 9.17.

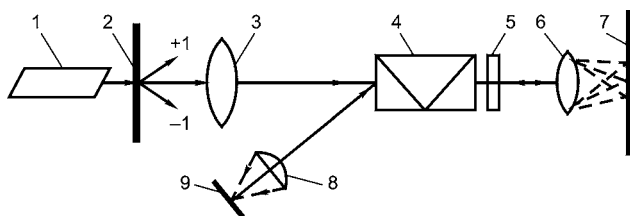


Рис. 9.17

Оптическая схема считывающей головки для считывания информации, записанной на видеодиске:

1 — He-Ne-лазер; 2 — решетка; 3 — согласующая оптика; 4 — призма Волластона; 5 — пластинка $\lambda/4$; 6 — считывающий объектив; 7 — видеодиск; 8 — цилиндрическая линза; 9 — плоскость приемника.

Благодаря приемникам становится возможным формирование управляющих сигналов для коррекции фокусировки считывающих лучей на информационной дорожке и обеспечение слежения за дорожкой.

9.10. ПРИНЦИПЫ ЦИФРОВОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ С КОМПАКТ-ДИСКОВ

9.10.1. УСТРОЙСТВО КОМПАКТ-ДИСКА

Конструкция диска CD-DA (Compact Disk — Digital Audio, компакт-диск — цифровой звук) и способ записи звука на нем описываются стандартом, изданным фирмами Sony и Philips в 1980 г. под названием Red Book («Красная книга»). Стандартный компакт-диск (CD) состоит из трех слоев: основы, отражающего слоя и защитного. Основа выполнена из прозрачного поликарбоната, на котором методом прессования сформирован информационный рельеф. Поверх рельефа напыляется металлический отражающий слой (из алюминия, золота, серебра, других металлов и сплавов).

Отражающий слой покрывается защитным слоем поликарбоната или нейтрального лака — так, чтобы вся металлическая поверхность была защищена от контакта с внешней средой. Толщина диска 1,2 мм.

Информационный рельеф диска представляет собой непрерывную спиральную дорожку, начинающуюся в центре и состоящую из последовательности углублений — питов (pits). Промежутки между питами носят название lands. Посредством чередования питов и промежутков различной длины на диске записывается закодированный цифровой сигнал: переход от промежутка к питу и наоборот обозначает единицу, а длина пита или промежутка — длину серии нулей. Расстояние между витками дорожки выбирается от 1,4 до 2 мкм, стандарт определяет расстояние 1,6 мкм.

9.10.2. ЗАПИСЬ НА КОМПАКТ-ДИСКИ

В настоящее время широко используются следующие системы записи компакт-дисков: однократная (CD-Recordable — записываемый CD) и многократная (CD-Erasable — стираемый CD, CD-ReWritable — перезаписываемый CD). CD-RW и CD-E обозначают одно и то же — диск с возможностью стирания и перезаписи. Причем название CD-RW практически вытеснило CD-E. CD-R, CD-E и CD-RW — это обозначения как устройств для записи, так и дисков.

Для однократной записи используются так называемые болванки, представляющие собой обычные компакт-диски, в которых отражающий слой выполнен преимущественно из золотой или серебряной пленки, а между ним и поликарбонатной основой находится регистрирующий слой из органического материала, темнеющего при нагревании. При записи лазерный луч нагревает выбранные точки слоя, которые темнеют и перестают пропускать свет к отражающему слою, образуя участки, аналогичные питам.

На CD-R организуется та же информационная структура, что и на штампованных дисках, устройство которых рассмотрено в разделе 9.10.1. Это позволяет при помощи соответствующего программного обеспечения записывать звуковые, фото- и видеодиски, которые могут затем проигрываться в бытовых звуковых и видеопроигрывателях. Однако отражающая способность зеркального слоя и четкость питов у дисков CD-R ниже обычных, отчего некоторые устройства могут работать с ними неустойчиво.

В перезаписываемых дисках используется промежуточный слой из органической пленки, меняющей под воздействием луча

фазовое состояние с аморфного на кристаллическое и обратно, в результате чего меняется прозрачность слоя. Фиксация изменений состояния происходит благодаря тому, что материал регистрирующего слоя при нагреве выше критической температуры переходит в аморфное состояние и сохраняет его после остывания, а при нагреве до температуры значительно ниже критической восстанавливает кристаллическое состояние. Существующие диски выдерживают от нескольких тысяч до десятков тысяч циклов перезаписи. Однако их отражающая способность существенно ниже штампованных и однократных CD, что затрудняет их считывание в обычных приводах. Для чтения CD-RW формально необходим привод с автоматической регулировкой усиления фотоприемника (Auto Gain Control), хотя некоторые обычные приводы CD-ROM и бытовые проигрыватели способны читать их наравне с обычными дисками.

Перезаписываемый диск может иметь ту же структуру дорожек и файловую систему, что и CD-R, либо на нем может быть организована специальная файловая система UDF (Universal Disk Format — универсальный дисковый формат), позволяющая динамически создавать и уничтожать отдельные файлы на диске.

Рассмотрим возможности лазерной записи и воспроизведения информации на примере компакт-дисков CD-ROM (Compact Disk — Read Only Memory). CD-ROM — это оптический носитель информации. На покрытом алюминием 5-дюймовом пластмассовом диске может храниться до 650 Мбайт данных, что соответствует примерно 333 000 страницам текста или 74 минутам высококачественного звучания. Термин CD-ROM относится как к дискам, так и к дисководам (накопителям), в которых считывается информация.

В 1982 г. фирмы Philips и Sony опубликовали стандарт, которым определялись методы квантования сигналов, способы их записи, а также размер диска: внешний диаметр 120 мм, диаметр центрального отверстия 15 мм, толщина 1,2 мм. На одном диске можно было записать Девятую симфонию Бетховена.

Компьютерные компакт-диски выглядят так же, как и звуковые, но, помимо музыки, на них может быть записана и другая информация. Дисководы CD-ROM, которые подключаются к компьютерам, напоминают проигрыватели звуковых компакт-дисков.

Компакт-диск сделан из полимерного материала (на основе поликарбонатов) и покрыт слоем металла (обычно одним из сплавов алюминия). Информация считывается именно со стороны металлической пленки. Поверх алюминия наносится еще один слой полимерного покрытия (лака), защищающего металл и соответственно записанные на диске данные от повреждений. Все этикетки

и надписи наносятся на верхнюю сторону диска, а считывание информации осуществляется с нижней поверхности.

С CD-ROM надо обращаться так же аккуратно, как с фотографическими негативами. Для его воспроизведения используются оптические устройства, поэтому во избежание потерь информации поверхность диска должна быть чистой и без царапин. Некоторые накопители могут работать только с дисками, уложенными в специальные подающие устройства (caddy), которые позволяют не касаться руками носителей.

Разный цвет рабочей поверхности диска объясняется разными материалами регистрирующего и отражающего слоев. В качестве регистрирующего слоя для дисков CD-R чаще всего используются органические соединения, известные под условными названиями «цианин» (Cyanine) и «фталоцианин» (Phtalocyanine). Цианин голубого (суан) цвета (от которого и происходит название материала, не имеющее отношения к цианидам — химическим производным циановодорода) и характеризуется средней стойкостью к облучению светом и перепадам температуры. Фталоцианин золотистого цвета и значительно превосходит цианин по стойкости к внешним воздействиям.

В качестве отражающих материалов используют золото и серебро, реже — алюминий и сплавы. Соответственно рабочая поверхность диска с отражающим слоем из бесцветного металла имеет цвет своего регистрирующего слоя, а отражающий слой из золота меняет цвет цианина с голубого на зеленоватый.

Органический слой дисков CD-RW обычно серо-коричневого цвета.

9.10.3. ОТЛИЧИЕ ДИСКОВ CD-R/CD-RW ОТ ШТАМПОВАННЫХ

Прежде всего, диски CD-R/CD-RW изготавливаются со вспомогательной разметкой (pregroove), в которой закодирована временная сетка (Actual Time In Pregroove (ATIP) — действительное время по разметке), одновременно служащая для разбивки диска на кадры (блоки), и дополнительная информация о диске: коды, рекомендуемые значения скорости вращения и мощности записывающего лазера. Разметка используется для нахождения служебных и пользовательских областей диска и для облегчения слежения за информационной дорожкой в процессе записи. При считывании слежение производится, как обычно, по записанной информационной дорожке.

Кроме этого, диск содержит две служебные области: PCA (Power Calibration Area — область калибровки мощности) и PMA (Program Memory Area — область памяти программы). PCA используется для выбора оптимальной мощности лазера перед каждой записью, а PMA — для временного хранения параметров дорожек в случае записи одной сессии в несколько приемов.

PCA и PMA являются таблицами фиксированной длины емкостью 100 элементов каждая, что ограничивает общее число как случаев записи, так и этапов формирования незакрытых сессий.

Минимальной единицей информации, записываемой на CD-R за один прием, является дорожка (track) в формате CD-DA или CD-ROM. Минимальная длина дорожки — 300 блоков (600 кб, 4 с). В начале каждой дорожки формируется содержащий ее параметры служебный зазор (pre-gap) размером 150 блоков (300 кб, 2 с) для однотипных дорожек и 225 блоков (450 кб, 3 с) — для дорожек разных типов.

Одна или несколько дорожек образуют программную область (Program Area); она может формироваться в несколько приемов, между которыми адреса и параметры дорожек (TOC) сохраняются в PMA. На этом этапе доступ к записанным дорожкам имеют только приводы CD-R, так как обычные приводы CD-ROM не знают о PMA и требуют, чтобы программная область была обрамлена зонами Lead-In (4500 блоков — 9 Мбайт, 1 мин) и Lead-Out (2250 блоков — 4,5 Мбайт, 30 с), а в Lead-In содержались параметры дорожек. Структура из Lead-In, Program Area и Lead-Out называется сессией, а процесс записи Lead-In и Lead-Out вокруг области данных — закрытием сессии.

9.10.4. МАРКИРОВКА ДИСКОВ

Обозначениями CD-R и CD-RW маркируются однократные и перезаписываемые диски. Диски CD-R можно использовать для записи в приводах CD-RW, но диски CD-RW в приводах CD-R — нет.

На всех дисках указывается максимальное гарантированное время записи (обычно 74 минуты, 333 000 блоков). Если предварительная разметка сделана на большее время, возможна запись на диск более продолжительной программы, однако при недостаточной длине размеченной дорожки диск будет испорчен. Точное число доступных для записи блоков зависит от модели диска; его можно узнать, запросив свойства диска в записывающей программе. Некоторые диски имеют менее 333 000 доступных блоков.

На большинстве дисков указана их максимальная вместимость в мегабайтах данных (обычно 650 Мбайт при размере блока 2048 байт). На дисках некоторых производителей (например, Maxell) вместимость в рекламных целях указывается в миллионах байтов (680), но означает те же 650 Мбайт. Отдельные диски маркируются цифрой 780, что обозначает емкость диска в звуковых секторах (74 минуты по 176 кбайт). При записи в формате mode 2 за счет большей величины блока данных возможна запись более 650 Мбайт ценой снижения корректирующей способности кода.

На диске или коробке указывается также максимально допустимая скорость записи ($1 \times \dots 6 \times$). Для записи на повышенных скоростях требуется рассчитанный на эти скорости регистрирующий слой, и превышение допустимой скорости записи может привести к смазыванию информационных меток и последующей плохой читаемости диска либо полной его негодности. Отсутствие маркировки скорости или упоминания о ней в сопроводительном тексте свидетельствует о том, что запись на повышенных скоростях не гарантируется.

9.10.5. НАДЕЖНОСТЬ ДИСКОВ CD-R/RW В СРАВНЕНИИ СО ШТАМПОВАННЫМИ

Диски CD-R/RW тускнеют медленнее штампованных, поскольку в них отражающий слой обычно из золота и серебра, менее подверженных окислению, чем алюминий, применяемый в большинстве штампованных дисков. Однако материал регистрирующего слоя CD-R/RW более чувствителен к свету и также подвержен окислению и разложению. Кроме того, регистрирующая пленка находится в полужидком состоянии и потому страдает от ударов и деформаций диска, в частности от его изгиба при извлечении из коробки. Наиболее оптимистичная оценка времени жизни дисков на основе фталоцианина около 100 лет, однако реальные сроки для большинства современных дисков (из цианина и других материалов) гораздо меньше.

По массовой статистике, примерная долговечность среднего CD-R — 2...3 года при аккуратном обращении и около одного года при интенсивном использовании в сочетании с неаккуратным обращением (ударами, перегибами, воздействием тепла, влажности, яркого света и т. п.). Время жизни качественно изготовленных и записанных дисков при полном соблюдении условий хранения и эксплуатации минимум 10 лет.

9.10.6. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ТИРАЖИРОВАНИЕ КОМПАКТ-ДИСКОВ

Основной способ изготовления дисков — прессование с матрицы. Оригинал формируется с исходной цифровой мастер-ленты, содержащей подготовленный и закодированный цифровой сигнал, специальным высокоточным станком на стеклянном диске, покрытом слоем фоторезиста — материала, изменяющего растворимость под действием лазерного луча. При обработке записанного оригинала растворителем на стекле возникает требуемый рельеф, который методом гальванопластики переносится на никелевый оригинал (негатив), служащий матрицей при мелкосерийном производстве либо основой для снятия позитивных копий, с которых, в свою очередь, снимаются негативы для массового тиражирования.

Штамповка выполняется методом литья под давлением: с негативной матрицы прессуется поликарбонатная подложка с рельефом, поверх напыляется отражающий слой, который покрывается лаком. Поверх защитного слоя обычно наносятся информационные надписи и изображения.

Диски с возможностью записи (CD-R, болванки) изготавливаются таким же методом, но между основой и отражающим слоем наносится слой органического вещества, темнеющего при нагревании. В исходном состоянии слой прозрачен, при воздействии лазерного луча образуются непрозрачные участки, эквивалентные питам. Для облегчения слежения за дорожкой при записи на диске формируется предварительный рельеф (разметка), дорожка которого содержит метки кадров и сигналы синхронизации, записанные со сниженной амплитудой и впоследствии перекрываемые записываемым сигналом.

За счет органического фиксирующего слоя записываемые диски характеризуются более низким коэффициентом отражения по сравнению со штампованными, поэтому некоторые проигрыватели (Compact Disk Player — CDP), рассчитанные на стандартные алюминиевые диски и не имеющие запаса надежности чтения, воспроизводят диски CD-R менее надежно, чем обычные.

Хотя запись на так называемый мастер-диск осуществляется с помощью лазера, этот способ непригоден для производства сотен или тысяч копий. Один мастер-диск записывается более полутора часов. Кроме того, в качестве основы для мастер-дисков используются недостаточно прочные и надежные материалы. Если надо напечатать небольшой тираж компакт-дисков, с оригинала (мастер-диска) методами химического осаждения и последующей

гальванопластики снимается металлическая копия (матрица). Ее уже можно использовать для печати копий (таким способом штампуются виниловые грампластинки). Но таким способом можно получить лишь небольшое количество экземпляров, поскольку матрица постепенно изнашивается. Массовое производство дисков состоит из трех этапов. Сначала по мастер-диску вышеописанным способом делается первичная матрица. Затем с нее изготавливают копию мастер-диска уже из достаточно прочного металла. Эту копию многократно используют для изготовления вторичных (рабочих) матриц.

Так можно получить множество рабочих матриц с одной копии мастер-диска, причем оригинал сохраняется практически в неприкосновенности, а в технологическом процессе используются относительно недорогие материалы. Компакт-диски, которые продаются в магазине, штампуют на поликарбонатной основе, покрытой алюминием и защитным слоем пластика. Тонкое алюминиевое покрытие повторяет профиль поверхности основы, что позволяет по отражению лазерного луча определить, есть на ней углубление или нет. Описанная технология используется при производстве как звуковых дисков, так и CD-ROM.

Считывание информации с диска происходит за счет регистрации изменений интенсивности отраженного от алюминиевого слоя излучения маломощного лазера. Излучение поступает на фотодатчик, величина электрического сигнала с которого зависит от того, отразились лучи от гладкой поверхности или рассеялись на неоднородности. Углубления (штрихи), нанесенные на компакт-диск при записи, и представляют собой такие неоднородности. Сильный сигнал с датчика соответствует ровной поверхности («плато»), слабый — углублению. При прохождении луча вдоль дорожки записи (а точнее, при движении дорожки записи под лучом, поскольку диск вращается, а считывающее устройство перемещается вдоль радиуса диска) формируется последовательность импульсных электрических сигналов, преобразуемых специальным процессором либо в форму двоичных данных, либо в звук.

Глубина каждого штриха на диске 0,12 мкм, ширина — 0,6 мкм. Штрихи расположены вдоль спиральной дорожки, расстояние между соседними витками которой составляет 1,6 мкм. Это значит, что плотность дорожек (а точнее, витков одной дорожки) 16 000 TPI (*Tracks Per Inch* — дорожек на дюйм; единица измерения плотности расположения дорожек). Длина штрихов и участков плато вдоль дорожки записи может изменяться от 0,9 до 3,3 мкм. Дорожка на диске начинается на некотором расстоянии

от центрального отверстия диска и заканчивается примерно в 5 мм от его внешнего края (т. е. иначе, чем на грампластинках, дисках и т. д.). Общая длина спирали составляет около 5 км.

Если на компакт-диске (звуковом или информационном) надо найти место, где записаны определенные данные, то его координаты предварительно считываются в оглавлении диска, после чего считывающее устройство перемещается к нужному витку спирали и ждет появления определенной последовательности битов.

Запись и воспроизведение данных с компакт-диска выполняются при постоянной линейной скорости перемещения дорожки относительно считывающего устройства. Поэтому при считывании информации с внутренних витков спирали диск должен вращаться быстрее, чем при считывании с внешних. Этот способ воспроизведения достался накопителям на CD-ROM «в наследство» от звуковых проигрывателей, в которых скорость считывания данных была постоянной. По этой же причине все компакт-диски разбиваются на блоки (секторы), частота записи и воспроизведения составляет 75 штук в секунду, а это означает, что при полном времени «звучания», равном 74 минуты, на диске находится 333 000 блоков.

На дисках, записанных в формате CD-AD, в каждом блоке содержится 2352 байта данных. На CD-ROM 304 из них используются для синхронизации, идентификации и записи кодов коррекции ошибок (ECC — Error Correction Code), а оставшиеся 2048 байт представляют собой полезную информацию. Поскольку за секунду считывается 75 блоков, то стандартная скорость передачи данных для дисководов CD-ROM составляет 153 600 байт/с, или 150 кбайт/с. Нетрудно подсчитать, что при общем времени «звучания» 74 минуты максимальная емкость CD-ROM 650 Мбайт.

Компакт-диски с возможностью записи выпускаются в двух вариантах — на 74 и 63 минуты.

9.10.7. ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ КОМПАКТ-ДИСКА

При воспроизведении звуковой компакт-диск вращается с постоянной линейной скоростью (Constant Linear Velocity — CLV), при которой скорость движения дорожки относительно воспроизводящей головки приблизительно 1,25 м/с. Система стабилизации скорости вращения поддерживает ее на таком уровне, чтобы обеспечить скорость считываемого цифрового потока 4,3218 Мбит/с, поэтому в зависимости от длины питов и промежутков действительная скорость может меняться. Угловая скорость диска при

этом изменяется от 500 об/мин при считывании на крайних внутренних участках дорожки до 200 об/мин при считывании на крайних внешних.

Для считывания информации с диска используется полупроводниковый лазер с длиной волны около 780 нм (инфракрасный диапазон). Луч лазера, проходя через фокусирующую линзу, падает на отражающий слой, отраженный луч попадает в фотоприемник, где происходит определение питов и промежутков, а также проверка качества фокусировки пятна на дорожке и его расположения по центру дорожки. При нарушении фокусировки происходит перемещение линзы, работающей по принципу диффузора громкоговорителя (voice coil — звуковой катушки), при отклонении от центра дорожки — перемещение всей головки по радиусу диска. В сущности, системы управления линзой, головкой и шпиндельным двигателем в приводе являются системами автоматической регулировки (САР) и находятся в режиме постоянного слежения за выбранной дорожкой.

Полученный от фотоприемника сигнал в коде 8/14 демодулируется, в результате чего восстанавливается результат кодирования по CIRC с добавленными субкодами. Затем отделяются субкодные каналы, выполняется деперемежение и декодирование CIRC на двухступенчатом корректоре (С1 — для одиночных ошибок и С2 — для групповых), вследствие чего обнаруживается и исправляется большая часть ошибок, внесенных нарушениями при штамповке, дефектами и неоднородностью материалов диска, царапинами на его поверхности, нечетким определением пита/промежутка в фотоприемнике и т. п. В итоге поток «чистых» звуковых отсчетов направляется на ЦАП для преобразования в аналоговую форму.

В звуковых проигрывателях после корректора устанавливаются также интерполяторы различной сложности, приближенно восстанавливающие ошибочные отсчеты, которые не удалось исправить в декодере. Интерполяция может быть линейной (в простейшем случае), полиномиальной или с использованием сложных гладких кривых.

Для выполнения деперемежения любое CD-читающее устройство имеет буферную память (стандартный объем 2 кб), которая заодно применяется для стабилизации скорости цифрового потока. Для декодирования используется несколько разных стратегий, в которых вероятность обнаружения групповых ошибок обратно пропорциональна надежности их коррекции; стратегия выбирается по усмотрению разработчика декодера. Например, для

CD-проигрывателя с мощным интерполятором может быть выбрана стратегия с упором на максимальное обнаружение, а для CDP с простым интерполятором или привода CD-ROM — с упором на максимальную коррекцию.

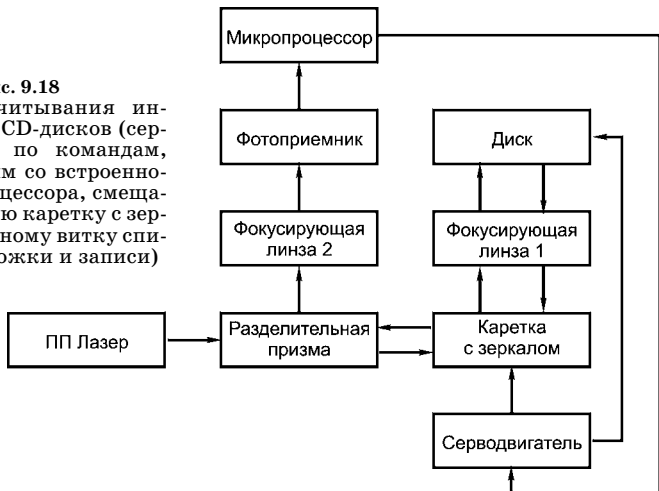
**9.10.8.
УСТРОЙСТВО НАКОПИТЕЛЕЙ НА CD-ROM**

Накопители на CD-ROM отличаются от проигрывателей музыкальных дисков в основном устройствами декодирования электрических сигналов. В звуковых проигрывателях записанные на компакт-диск цифровые данные преобразуются в аналоговые электрические сигналы, поступающие затем на стереоусилитель. При этом некоторые погрешности вполне терпимы — главное, чтобы они были за пределами чувствительности человеческого слуха. Но при считывании информации с CD-ROM такие вольности недопустимы. Каждый бит данных должен быть воспроизведен абсолютно достоверно. Поэтому довольно значительную часть всего объема CD-ROM занимают коды коррекции ошибок (ECC). С их помощью можно в большинстве случаев обнаружить и восстановить неправильно считанные данные (если, конечно, ошибки не слишком серьезные), что позволяет снизить вероятность сбоя до приемлемой.

Принцип считывания информации с CD-дисков представлен на рис. 9.18.

На рис. 9.19 приведена упрощенная схема устройства накопителя на CD-ROM.

Рис. 9.18
Принцип считывания информации с CD-дисков (серводвигатель по командам, поступающим со встроенного микропроцессора, смещает подвижную каретку с зеркалом к нужному витку спиральной дорожки и записи)



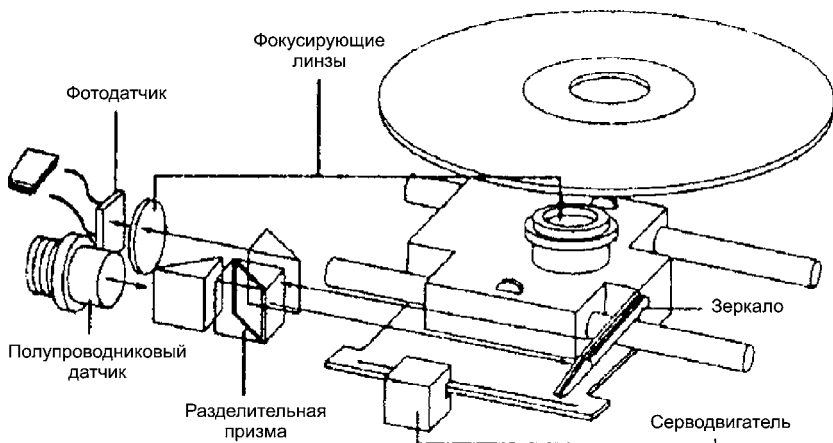


Рис. 9.19
Устройство накопителя на CD-ROM

Луч от маломощного полупроводникового инфракрасного лазера проходит через разделительную призму и попадает на зеркало, направляющее его через фокусирующую линзу на поверхность диска. Отраженный от диска луч снова фокусируется линзой, расположенной под диском, отражается от зеркала и возвращается на разделительную призму. Разделительная призма перенаправляет отраженный луч на другую фокусирующую линзу, расположенную непосредственно перед фотодатчиком. Фотодатчик преобразует падающее на него излучение в электрические сигналы. Сигналы с фотодатчика декодируются встроенным микропроцессором и передаются в компьютер в виде данных.

Штрихи, нанесенные на поверхность диска, различаются по длине. Интенсивность отраженного луча изменяется при его переходе со штриха на плато и наоборот. Появление соответствующего фронта (падающего или нарастающего) электрического импульса с фотодатчика совпадает по времени с этими переходами. (При записи компакт-диска формируется такой сигнал управления лазером, что переход от штриха к плато и обратно происходит при появлении в исходной последовательности двоичных данных единичного бита. Таким образом, при считывании данных каждый единичный бит представляется фронтом сигнала, а нулевой — отсутствием такового.)

Поскольку для программных файлов (да и любых файлов вообще) важен каждый бит, в накопителях на CD-ROM используются весьма сложные алгоритмы поиска и исправления ошибок. Бла-

годаря им вероятность того, что ошибка «проскочит» необнаруженной, удалось снизить до $10^{-25} \dots 10^{-26}$, т. е. без ошибок могут быть считаны данные с более чем 10^{15} CD-ROM. Высота стопки из такого количества дисков будет около 2 млрд километров.

Для реализации упомянутых методов коррекции ошибок к каждым 2048 полезным битам добавляется 288 контрольных. Это позволяет восстанавливать даже весьма существенно поврежденные последовательности данных, в том числе «провалы» длиной до 1000 бит. Использование столь сложных методов контроля и коррекции ошибок связано, во-первых, с тем, что CD весьма подвержены внешним воздействиям (пыль, грязь, искривление поверхности), а во-вторых, с тем, что подобные носители изначально разрабатывались лишь для записи звуковых сигналов, требования к точности воспроизведения которых не столь высоки.

Если данные в проигрывателе звуковых дисков считаны неверно, они интерполируются. Пусть, например, два последовательных значения сигнала выражаются числами 10, 13 и 20 и среднее значение из-за повреждения или загрязнения поверхности носителя прочитано неправильно (и пропущено в соответствии с алгоритмом обработки сигнала). С высокой степенью достоверности его можно вычислить («угадать») как среднее между предыдущим и последующим значениями (в данном случае оно будет принято равным 15). Хотя такое приближение и не обеспечивает абсолютной точности, слушатель не заметит подмены. Если же такая ситуация возникнет при считывании с CD-ROM, например, программного файла, то пропущенный бит может с равной вероятностью быть нулевым или единичным, и интерполировать его значение, естественно, невозможно.

Именно из-за столь высоких требований к точности воспроизведения накопители на CD-ROM для компьютеров явились позже своих «музыкальных» братьев, а их первые образцы были очень дорогими для массового потребителя. Кроме того, фирмы-изготовители несколько запоздали с принятием соответствующих стандартов, что сдерживало производство CD-ROM.

9.10.9. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ И ПАРАМЕТРЫ ЗВУКОВОГО СИГНАЛА НА CD

Исходный стереофонический звуковой сигнал подвергается оцифровке в 16-разрядные отсчеты (линейное квантование) с частотой дискретизации 44,1 кГц. Полученный цифровой сигнал носит название PCM (Pulse Code Modulation — импульсно-кодовой

модуляции (ИКМ)), так как каждый импульс исходного сигнала представляется специальным кодовым словом. Каждые шесть отсчетов левого и правого каналов оформляются в первичные кадры, или микрокадры, по 24 байта (192 бита), поступающие со скоростью 7350 штук в секунду. Кадры подвергаются кодированию при помощи двухуровневого кода CIRC (Cross Interleaved Reed-Solomon Code — избыточный код Рида–Соломона с перекрестным перемежением) по схеме: перемежение с задержкой на 1 байт, кодирование уровнем C2, перекрестное перемежение с переменной задержкой, кодирование уровнем C1, перемежение с задержкой на 2 байта. Уровень C1 обнаруживает и корректирует одиночные ошибки, а уровень C2 — групповые. В результате получается блок длиной 256 бит, данные в котором снабжены разрядами обнаружения и коррекции ошибок и к тому же «размазаны» по блоку, а это приводит к записи смежных звуковых данных в физически несмежных областях диска и снижает влияние ошибок на отдельные отсчеты.

Код Рида–Соломона имеет избыточность 25% и позволяет обнаруживать до четырех ошибочных байтов и корректировать до четырех потерянных или двух ошибочных байтов. Максимальная длина полностью исправляемого пакета ошибок около 4000 бит (~2,5 мм дорожки), однако не любой пакет такой длины может быть полностью исправлен.

После второго перемежения к каждому полученному блоку добавляются разряды субкодов: *P*, *Q*, *R*, *S*, *T*, *U*, *V*, *W*; каждый блок получает восемь субкодных битов. Затем каждые 98 блоков с субкодами оформляются в один сверхкадр длительностью 1/75 с (объем чистых звуковых данных — 2352 байта), называемый также сектором, в котором субкоды первых двух блоков служат признаком синхронизации, а оставшиеся 96 разрядов каждого субкода образуют *P*-слово, *Q*-слово и т. д. На протяжении всей дорожки последовательности субкодных слов называют также субкодными каналами.

Слова или каналы субкодов используются для управления форматом записи, индикации фрагментов фонограммы и т. п. Например, канал *P* служит для пометки звуковых дорожек и пауз между ними (0 — пауза, 1 — звук), а канал *Q* — для пометки формата дорожек и секторов, записи оглавления TOC (Table Of Contents — таблица содержимого) и временных меток, по которым отслеживается время воспроизведения. Канал *Q* может использоваться также для записи информации в ISRC (International Standard Recording Code — международный стандартный код записи), предназначен-

ном для представления сведений о производителе, времени выпуска и т. п., а кроме того, для разделения дорожки на отдельные фрагменты (всего на звуковом диске может быть до 99 звуковых дорожек, каждая из которых может включать до 99 фрагментов).

Оформленные таким образом кадры подвергаются каналному кодированию в терминах «пит-промежуток» с использованием избыточного кода 8/14 (Eight to Fourteen Modulation — EFM), в котором исходные байты кодируются 14-битными словами, повышающими разборчивость сигнала. Между словами вставляются три связующих бита для соблюдения ограничений на количество смежных нулей и единиц, что облегчает демодуляцию и уменьшает постоянную составляющую сигнала. В результате из каждого первичного микрокадра получается 588 канальных битов и полученный битовый поток записывается на диск со скоростью 4,3218 (588×7350) Мбит/с. Поскольку EFM-кодирование дает цифровой поток, в котором нулей больше, чем единиц, и была выбрана система представления единиц границами пита и промежутка, а количества нулей между единицами — длиной пита или промежутка.

В начале диска расположена так называемая вводная (lead-in) зона, содержащая информацию о формате диска, структуре звуковых программ, адресах фрагментов, названиях записанных произведений и т. п. В конце записывается выводная (lead-out) зона (дорожка с номером AA), выполняющая роль границы записанной области диска; бит *P*-кода в этой зоне изменяется с частотой 2 Гц. Ряд бытовых проигрывателей не могут опознать диск без этой зоны, однако многие могут обходиться без нее. Между вводной и выводной зонами записывается программная область (Program Memory Area — PMA), содержащая собственно звуковые данные. Программная область отделена от вводной зоны участком из 150 пустых блоков (2 с), играющим роль зазора (pre-gap).

Общее время записи на компакт-диске — 74 минуты, однако при уменьшении стандартного шага дорожки и расстояния между питами можно увеличить это время за счет снижения надежности считывания в стандартном дисковом приводе.

Стандартные параметры оцифровки — частота дискретизации 44,1 кГц и разрядность отсчета 16 — определяют следующие теоретически рассчитанные характеристики сигнала:

- диапазон частот 0...22 050 Гц;
- динамический диапазон 98 дБ;
- уровень шума 98 дБ;
- коэффициент нелинейных искажений 0,0015% (при максимальном уровне сигнала).

В реальных устройствах записи и воспроизведения CD верхние частоты нередко обрезаются на уровне 20 кГц для создания запаса по крутизне АЧХ-фильтра. Уровень шума может быть как ниже 98 дБ в случае линейного ЦАП и шумного выходного усилителя, так и выше — при передискретизации на более высокой частоте с использованием ЦАП типа Delta-Sigma, Bitstream или MASH и малошумящих усилителей. Коэффициент нелинейных искажений существенно зависит от применяемого ЦАП выходных цепей и качества источника питания.

Динамический диапазон 98 дБ определяется для CD исходя из разницы между минимальным и максимальным уровнем звукового сигнала, однако при малом сигнале значительно возрастает уровень нелинейных искажений, отчего реальный динамический диапазон, внутри которого сохраняется приемлемый уровень искажений, обычно не превышает 60 дБ.

Коэффициент детонации в системе «компакт-диск» лишен смысла, поскольку нестабильность скорости вращения диска не связана напрямую с нестабильностью выходного сигнала, которая практически целиком определяется задающими генераторами. Однако «тонкая» зависимость звука от работы механических и электронных систем CDP может проявляться благодаря распространению помех по цепям питания, наводкам между сигнальными линиями, микрофонному эффекту отдельных деталей и прочим паразитным воздействиям на звуковой тракт. В частности, помехи по питанию вызывают дрожание фазы (jitter) опорных генераторов, приводящее к такому же дрожанию фазы цифрового сигнала, поступающего на ЦАП, в результате чего меняются фазовые характеристики звукового сигнала, что ощущается на слух как частотные искажения и потеря локализации источников звука в пространстве.

9.10.10. ДЖИТТЕР

Джиттер — быстрое по отношению к длительности цифрового сигнала дрожание фазы цифрового сигнала, при котором нарушается строгая периодичность следования фронтов импульсов. Такое дрожание возникает из-за нестабильности тактовых генераторов, а также в местах выделения синхросигнала из комплексного сигнала методом PLL (Phase Locked Loop — петля с захватом фазы, или фазовая автоподстройка частоты (ФАПЧ)). Подобное выделение имеет место, например, в демодуляторе сигнала, считанного с диска, в результате чего образуется опорный синхросигнал, кото-

рый путем коррекции скорости вращения диска «подгоняется» к эталонной частоте 4,3218 МГц. Фаза и фаза информационного сигнала при этом непрерывно колеблются. Дополнительный вклад может вносить неравномерное расположение питов на диске, вызванное, например, некачественным прессованием или нестабильной записью.

Нестабильность считываемого сигнала с диска полностью компенсируется входным буфером декодера, так что любое дрожание и детонация, возникшие до помещения сигнала в буфер, на этом этапе уничтожаются. Выборка из буфера управляется стабильным генератором с фиксированной частотой, однако таким генераторам тоже присуща определенная, хотя и гораздо меньшая нестабильность. В частности, она может быть вызвана помехами по цепям питания, которые, в свою очередь, могут возникать в моменты срабатывания проигрывателей компакт-дисков (CD-R) системы автоматического регулирования САР и коррекции скорости диска или положения головки/линзы. На дисках низкого качества такая коррекция происходит чаще, давая ряду экспертов повод связывать стабильность выходного сигнала с качеством диска, хотя на самом деле причина в несовершенной работе систем.

9.11. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧЕЛОВЕКА С ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКОЙ

Сенсорные панели и экраны применяют в качестве интерфейсов ввода/вывода во многих современных компьютерных системах и сотовых аппаратах.

Сенсорные экраны обеспечивают дружелюбный и естественный интерфейс взаимодействия человека с электронной техникой. При создании таких экранов используются различные типы технологий, обеспечивающие чувствительность к прикосновению, нажатию или приближению к дисплейной поверхности пальцев рук или вспомогательных предметов — указок или контактных перьев (стилусов). По числу физически разных одновременных контактов оператора с сенсорной поверхностью различают одноконтактные (single point) и многоконтактные (multi-touch) устройства ввода.

При написании этого раздела использована специальная литература [87, 89, 90].

Возможность непосредственного управления объектами на экране при помощи только рук, исключая вспомогательные устройства — сенсорные коврики, указатели или стилосы, имеет большое значение для развития современных информационных технологий.

Отсутствие движущихся механических частей и дополнительных устройств повышает надежность работы электронной техники, в частности компьютерных систем.

Многоконтактные (multi-touch или multi-point) технологии обеспечивают определение положения координат одновременно нескольких точек касания. При работе с графическими объектами на экране сенсорного дисплея оператор может работать несколькими пальцами руки одновременно (multi-finger или bi-finger) или пальцами обеих рук (multi-hand, bi-manual). Технологии multi-touch также поддерживают интерфейс для работы с одним сенсорным дисплеем нескольких пользователей одновременно (режим multi-user). При этом обеспечивается не только определение координат сразу нескольких точек касания, но и идентификация пользователей, а также соответствующих образов пальцевых жестов при манипуляциях в экранном поле.

Разработаны алгоритмы интерфейса multi-touch, который позволяет работать нескольким пользователям сразу с несколькими разными дисплейными системами, множеством источников графической информации и разнообразными графическими объектами.

Интерфейс пользователя определяется двумя компонентами — физического (аппаратного) и программного уровня. Компонента физического уровня — это возможности сенсорной панели (разрешающая способность, чувствительность к силе нажатия, возможность масштабирования от малых до больших форматов экранов).

Программная компонента обеспечивает интерпретацию данных, полученных от устройства ввода, и реализацию логического управления объектами, представленными на экране графическими изображениями.

Для программной поддержки одноконтактных сенсорных панелей в основном использовалась эмуляция интерфейса мыши, что было вполне логично и адекватно выполняемым действиям.

Технологии multi-touch применяются довольно широко. Они используются как в больших настенных проекционных экранах площадью несколько квадратных метров, так и в мобильных ручных устройствах.

В настоящее время для реализации multi-touch сенсорных экранов используется несколько базовых технологий [89]. В первой применяются дисплеи (ЖК-дисплей, ЭЛТ) и накладная чувстви-

тельная прозрачная панель. В другой используется проецируемое изображение и чувствительная к нажатию панель (сенсорный планшет). В третьей положения пальцев пользователя или нескольких пользователей фиксируются с помощью нескольких видеокамер. Распознавание выполняется путем цифровой обработки изображения указателей (пальцев рук, стилосов). Устанавливается положение, ориентация, определение векторов движений при перемещении и повороте объектов.

Рассмотрим возможности технологий multi-touch на примере оптической сенсорной системы ThinSight.

ThinSight — оптическая чувствительная система, которая интегрирована в дисплей. Она реагирует на прикосновения нескольких пальцев одновременно с распознаванием жестов и интерпретацией в язык управления объектами на экране.

Интерфейс аппаратно реализуется в виде платы тонкого профиля, которая монтируется сзади ЖК-панели, например, ноутбука. Уникальная особенность разработки заключается в том, что устройство состоит исключительно из элементов, которые производятся серийно и доступны всем. Принцип его работы основан на использовании машинного зрения. В данном случае система зрения реализована на матрице дискретных фотодатчиков, которые фиксируют профиль изображения, полученный в результате отражения при облучении точечными сканируемыми ИК-светодиодами объектов (рук оператора), находящихся прямо перед экраном.

Принцип работы фотоприемников матричного зрения сенсорной системы ThinSight представлен на рис. 9.20.

На стороне, обращенной к поверхности ЖК-дисплея, расположен массив датчиков приближения. На обратной стороне платы находятся транзисторные полевые ключи, микроконтроллер Microchip и микросхема USB-интерфейса. Можно использовать контроллеры со встроенным USB. В системе используются датчики расстояния отражательного типа с аналоговым выходом. Чувствительность к приближению объекта — от 0 до 60 мм.

Датчики характеризуются низким темновым током и высоким отношением сигнал/шум вследствие сочетания высокой мощности инфракрасного излучателя и высокой чувствительности фотодетектора.

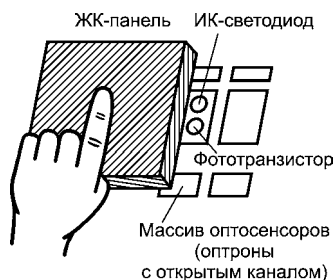


Рис. 9.20
Принцип работы фотоприемников матричного зрения

Инфракрасный поток проходит через структуру ЖК-дисплея и, отразившись от пальцев оператора, опять проходит через ЖК-панель и попадает на фотодатчики. Без ЖК-дисплея до 20% энергии возвращается к фотодатчику, отразившись от объекта, находящегося на расстоянии до 100 мм. При наличии ЖК-панели между излучателем и объектом за счет поглощения при обнаружении движений пальцев над поверхностью ЖК-панели порог чувстви-

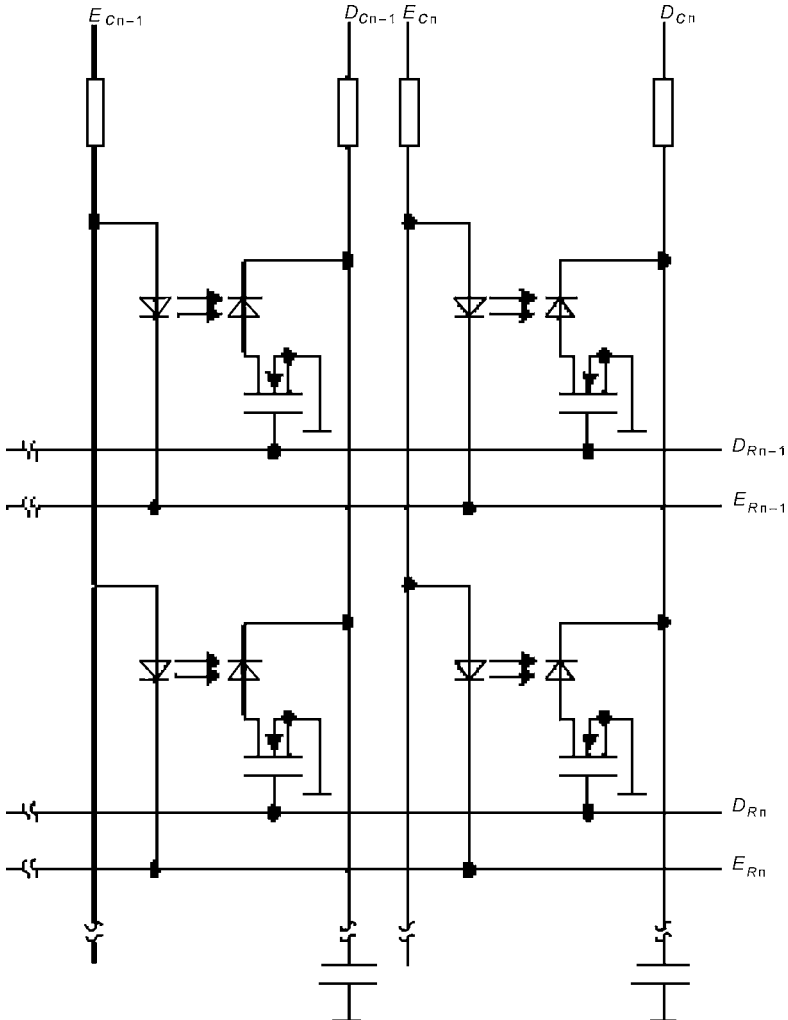


Рис. 9.21

Схема управления матричным фотосенсорным модулем

тельности снижается до 10 мм. Схема управления фотосенсорным модулем приведена на рис. 9.21.

Управление сканированием производится микроконтроллером Microchip. Считанные уровни напряжений подавались на входы встроенного в микроконтроллер АЦП, оцифровывались и передавались для окончательной обработки профиля изображений в персональный компьютер через USB-интерфейс. В прототипе использовались три одинаковых фотосенсорных модуля.

Аппаратная реализация интерфейса очень проста, доступна для повторения и не требует специальной технологии. Кроме того, разработчики придумали для своего детища множество приложений. Действительно, имея встроенный массив ИК-приемников и передатчиков, можно, например, обеспечить интерфейс с мобильными устройствами, подносимыми к экрану. Причем процесс установки связи не требует от оператора выбора специального режима настройки. Система ThinSight сама обнаружит в ближайшем окружении это устройство и установит связь. Другая функция, автоматически поддерживаемая ThinSight, — работа с ИК-указками, как показано на рис. 9.22. То есть оператор может дистанционно управлять объектами на экране с помощью ИК-курсорного указателя.

В работе [90] рассматривается технология оптического сенсорного экрана, интегрированного в ЖК-дисплей.

Новая технология базируется на использовании встроенной в конструкцию TFT ЖК-дисплея с активной адресацией на основе аморфного кремния (a-Si) матричной системы фотодатчиков.

В основе предложенного метода лежат следующие ключевые моменты:

- фоточувствительность a-Si-транзистора;
- совместимость технологии сенсорной матрицы с технологией активной матрицы адресации на основе аморфного кремния;
- цифровая обработка сигналов изображения;
- интегральная технология для создания недорогого драйвера сенсорной матрицы.

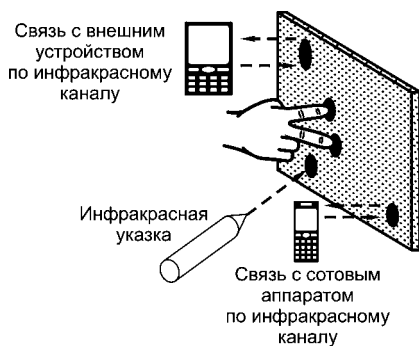


Рис. 9.22

Варианты использования интерфейса ThinSight в качестве интегрированного многофункционального интерфейса

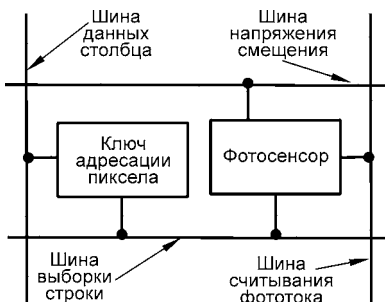


Рис. 9.23

Структура схемы активной адресации пиксела со встроенным фотодатчиком

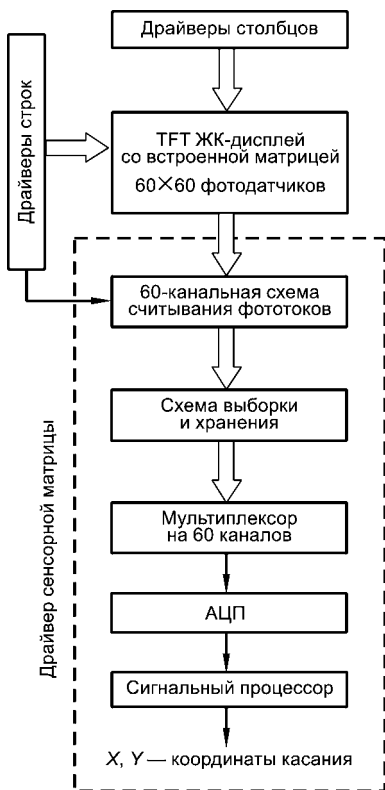


Рис. 9.24

Структура схемы управления дисплеем с фотосенсорным экраном

Конструкция оптической сенсорной панели представляет собой встроенный в дисплей матричный датчик изображения.

Для создания этой конструкции в схеме управления адресацией формируются дополнительные элементы, образующие модуль фотодатчика. Для обеспечения достаточного разрешения необязательно формировать модуль фотодатчика для каждого пиксела. По этой причине шаг матрицы фототранзисторов гораздо больше, чем шаг элементов изображения.

На рис. 9.23 показана структура схемы одного элемента активной адресации со встроенным фотодатчиком.

«Полезным» изображением является тень курсорного указателя, которым может являться контактное перо или же кончик пальца оператора. В качестве указателя может быть использовано и световое пятно от лазерной указки. Технология применима как для дисплеев отражательного типа, так и дисплеев с подсветкой.

Сотрудниками американской фирмы Planar Systems Inc. был создан опытный образец интегрированного оптического сенсорного экрана на основе TFT ЖК-дисплея диагональю 86 мм. Массив фотодатчиков имел формат 60×60. Шаг сенсорных датчиков составлял 0,96 мм.

Перед разработчиками устройства стояла непростая задача: необходимо было обеспечить работу в широком диапазоне освещенно-

стей — от 50 до 50 000 люкс, а также исключить влияние многих артефактов в виде фоновых теней, наличия градиента освещенности, технологического разброса параметров всех элементов. Кроме того, необходимо было производить первичную обработку изображения, нормирование сигналов изображения, определение факта касания, определение границ объекта и, наконец, вычисление координат касания с большой точностью.

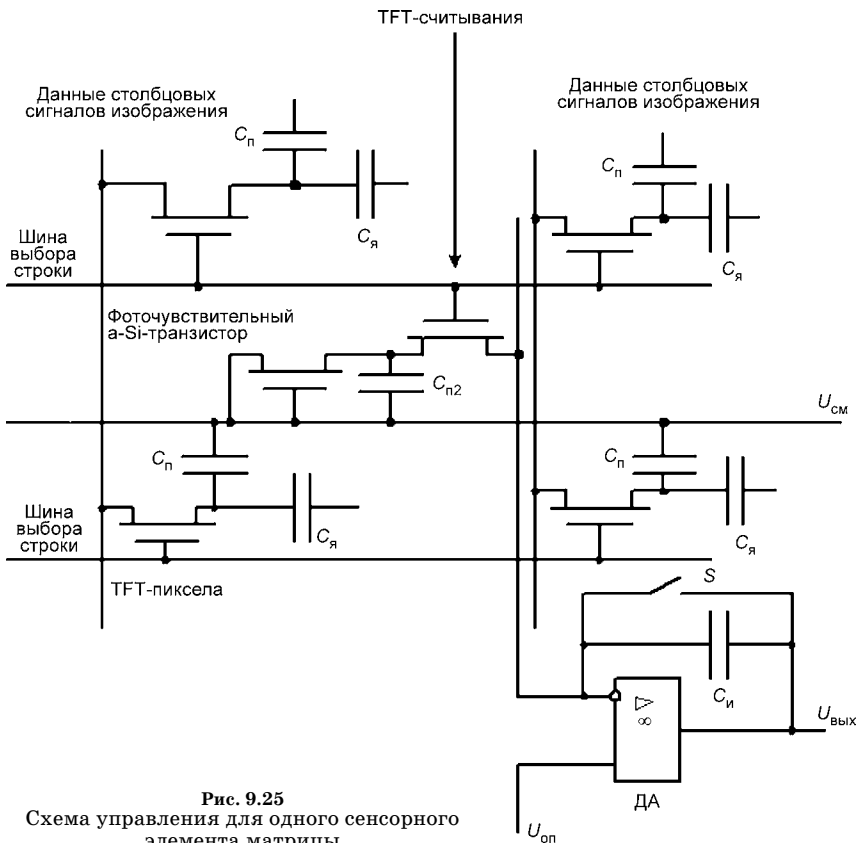
На рис. 9.24 показана структура схемы управления TFT ЖК-дисплеем со встроенной фотосенсорной матрицей.

Управление фототранзисторной матрицей датчиков и вычисление координат точки касания производится отдельным модулем — драйвером сенсорной матрицы. Драйвер содержит 60-канальную схему считывания фототоков строки и преобразования их в сигналы напряжения, схему выборки и хранения аналоговых сигналов строки, аналоговый мультиплексор на 60 каналов для поочередной коммутации сигналов датчиков, АЦП, сигнальный процессор и интерфейсную схему для передачи кодов координат в хост-контроллер.

Работа сенсорного устройства состоит из двух фаз. В первой фазе производится построчное сканирование матрицы фотодатчиков и считывание аналоговых сигналов профиля изображения. Изображение содержит фон и контур тени (или светового пятна) указателя. Во второй фазе изображение оцифровывается и затем подвергается обработке, в результате которой производится фильтрация и вычитание фонового изображения и выделение контура тени указателя. Для площади тени указателя вычисляются координаты центра тяжести, которые и используются как координаты курсора. Отслеживается также динамика перемещения тени указателя, фиксируется касание поверхности дисплея, а также короткий удар по экрану для осуществления выбора объекта изображения.

Считывание данных фототоков производится построчно и параллельно с разверткой TFT ЖК-дисплея. Для выборки строки фотодатчиков используется сигнал строчной развертки дисплея. Импульсом выборки строки пикселей экрана производится и выбор строки, состоящей из 60 сенсоров. Считывание сигналов производится по отдельным шинам. Частота сканирования матрицы совпадает с частотой развертки дисплея и составляет 60 Гц.

Дополнительно прокладываются шины считывания фототоков и общая для всех элементов матрицы датчиков шина напряжения смещения. На рис. 9.25 показана схема адресации одного пиксела со встроенным фотодатчиком.



Электрическая цепь датчика состоит из фототранзистора, запоминающей емкости на стоке фототранзистора $C_{п2}$, ключа чтения (ТФТ-считывания). Схема считывания находится в микросхеме драйвера. Каждый из 60 каналов считывания фототока представляет собой преобразователь тока в напряжение на основе ОУ, работающего в режиме интегратора тока. В обратной цепи ОУ включена интегрирующая емкость и ключ разряда.

Процесс считывания состоит из двух фаз — интегрирования и считывания.

Емкость $C_{п2}$ в момент считывания заряжается до уровня опорного напряжения $U_{оп}$. После того как ключ чтения закрывается, начинается разрядка этой емкости под действием света, падающего на затвор фотодатчика. Разрядка производится током утечки через затвор фотодатчика на шину напряжения смещения $U_{см}$.

В режиме насыщения при больших уровнях освещенности фототранзистора емкость $C_{п}$ разряжается до уровня $U_{см}$.

При считывании данных ключ ТФТ-считывания коммутирует емкость $C_{п2}$ на шину чтения. По данной шине емкость $C_{п}$ заряжается током, протекающим с обкладки запимающей емкости $C_{п2}$ на вход ОУ. Выходное напряжение ОУ пропорционально накопленному заряду на обкладках конденсатора за время интегрирования. После считывания производится разрядка интегрирующей емкости $C_{п}$. В следующем цикле чтения производится зарядка от фототока сенсорного элемента следующей строки матрицы датчиков.

В процессе считывания заряда на емкости $C_{п2}$ его потенциал доходит до первоначального значения. Например, если потенциал смещения имеет значение -5 В, а опорное напряжение на ОУ 5 В, то на конденсаторе $C_{п2}$ устанавливается напряжение 10 В.

Заряд на конденсаторе определяется следующим образом:

$$Q = C_{п2} \cdot (U_{оп} - U_{см}),$$

где $U_{см}$ — напряжение на шине смещения фототранзистора, а $U_{оп}$ — опорное напряжение на положительном входе интегрирующего ОУ.

Напряжение на выходе ОУ $U_{вых}$ следующее:

$$U_{вых} = \frac{\int_{t_0}^{t_0+T_f} I_{ф}(t) dt}{C_{п}},$$

где $I_{ф}(t)$ — фототок ТФТ-фототранзистора, t_0 — время считывания тока, $C_{п}$ — емкость конденсатора, стоящего в цепи обратной связи ОУ.

Обычно значение фототока является постоянной величиной для фиксированного времени периода развертки, однако при быстром движении контактного пера или пальца этот ток может изменяться. Максимальное значение выходного напряжения:

$$U_{вых.макс} = \frac{C_{п}(U_{оп} - U_{см})}{C_{п}}.$$

При касании экрана прохождение части света от внешнего источника на локальных участках матрицы датчиков блокируется — на них падает тень. Соответственно уменьшается значение фототока на данных элементах.

Матрицы фотодатчика.

Па рис. 9.26 показано поперечное сечение ТФТ ЖК-панели со встроенной матрицей фотодатчиков.

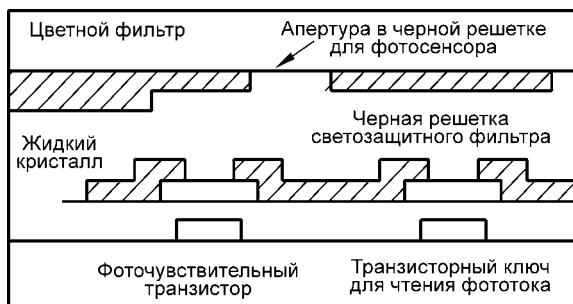


Рис. 9.26
 Поперечное сечение TFT ЖК-панели
 со встроенной матрицей фотодатчиков

На верхней подложке с внутренней стороны сформированы цветные фильтры и фильтр черной решетки. Сам транзистор активной матрицы на основе аморфного кремния (a-Si) обладает хорошей фоточувствительностью. Для нормальной работы в матрице активной адресации a-Si-транзистор экранируется от попадания потоков света как со стороны подсветки, так и со стороны внешней среды.

Черная решетка выполняет две функции: является светозащитным фильтром для ключевых транзисторов активной адресации и блокирует прохождения немодулируемого потока света в нерабочей зоне панели, там, где расположены шины адресации. Фильтрация нерабочей зоны увеличивает контрастность дисплея за счет уменьшения пропускания света в «черном» состоянии. Для прохождения света от внешнего источника в топологии черной решетки (black matrix) формируются отверстия — апертуры. Размер отверстий достаточно мал и неразличим глазом. Размер апертуры подобран с учетом чувствительности фототранзистора и диапазона освещенности. Чувствительные элементы (фототранзисторы) формируются на нижней подложке вместе с ключами активной адресации. Фоточувствительные зоны затворов транзисторов топологически размещены в проекции окон, сформированных в черной матрице для прохождения света. Структура элементов фоточувствительной матрицы формируется в едином с активной транзисторной структурой технологическом цикле и не требует проведения дополнительных операций. Дополнительный фототранзистор с ключом чтения занимает небольшую площадь и не влияет на работу ключа адресации пиксела. Для дисплеев отражательного типа при низких уровнях освещенности следует использовать в качестве указателя световое

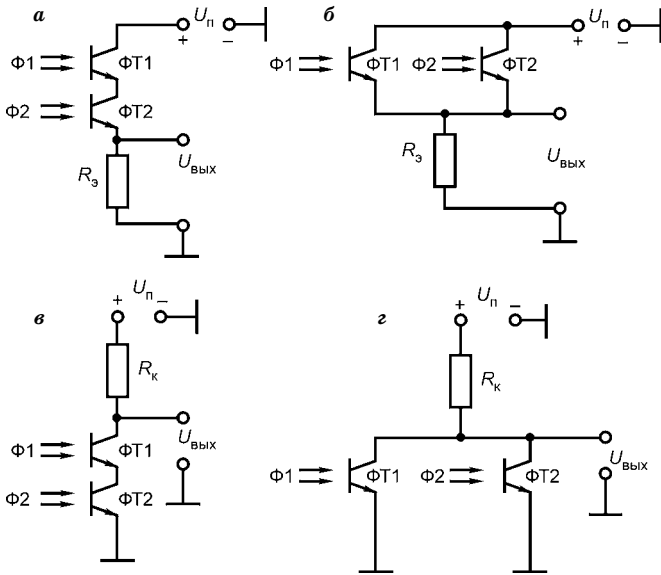
перо. Чрезмерный уровень освещенности также может приводить к неправильному функционированию сенсоров вследствие насыщения фототранзисторов.

Наличие способности измерять освещенность позволяет регулировать интенсивность подсветки без использования дополнительного датчика освещенности.

Тестовые вопросы к главе 9

«ПРИМЕНЕНИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ»

- 9.1. Что называется оптоэлектронным блокинг-генератором:
 - а) генератор прямоугольных импульсов;
 - б) генератор синусоидальных импульсов;
 - в) генератор колебаний пилообразной формы;
 - г) генератор трапецеидальных импульсов?
- 9.2. Какие особенности присущи оптоэлектронным ключам:
 - а) малая потребляемая мощность;
 - б) большая потребляемая мощность цепями управления;
 - в) плохая гальваническая развязка цепей управления и сигнала;
 - г) хорошая гальваническая развязка цепей управления и сигнала?
- 9.3. В каком режиме используются фотодиоды оптоэлектронной микросхемы типа К249КН1:
 - а) в фотодиодном;
 - б) в фоторезистивном;
 - в) в лавинном;
 - г) в режиме фото-ЭДС?
- 9.4. Какие особенности присущи логическим оптоэлектронным элементам:
 - а) плохая развязка цепей управления и сигнала;
 - б) хорошая развязка цепей управления и сигнала;
 - в) малая мощность, потребляемая цепями управления;
 - г) существенная мощность, потребляемая цепями управления?
- 9.5. От чего зависит длительность рабочего хода оптоэлектронного ГЛИН:
 - а) от входного тока СИД;
 - б) от фото-ЭДС $p-n$ -перехода транзистора;
 - в) от емкости;
 - г) от напряжения питания?
- 9.6. От чего зависит частота оптоэлектронного генератора с мостом Вина:
 - а) от коэффициента усиления операционного усилителя;
 - б) от сопротивлений элементов цепи ООС;
 - в) от сопротивления фоторезисторов;
 - г) от емкостей полосовой фазирующей цепи?
- 9.7. Какой принцип реализуется при считывании информации с компакт-дисков:
 - а) аналоговой демодуляции;
 - б) голографического считывания информации;
 - в) счета числа впадин и площадок дорожек компакт-диска;
 - г) отражения лазерного луча от площадок, образующих дорожки?



9.8. Какой элемент на схеме выполняет операцию ИЛИ:

- а) а;
- б) б;
- в) в;
- г) г?

9.9. Какой элемент на схеме (см. вопрос 9.8) выполняет операцию И-НЕ:

- а) а;
- б) б;
- в) в;
- г) г?

9.10. Какой элемент на схеме (см. вопрос 9.8) выполняет операцию ИЛИ-НЕ:

- а) а;
- б) б;
- в) в;
- г) г?

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

10.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Волоконно-оптическая система понимается как совокупность технических средств, с помощью которых осуществляется передача информации из одного пункта пространства в другой посредством физической среды, в качестве которой используется волоконный световод.

Идеальная волоконно-оптическая система передачи преобразует на передающей стороне входной электрический сигнал $U_{\text{вх}}(t)$ в оптический $P(t)$, как показано на рис. 10.1.

$$P(t) = P_0[a + mU_{\text{вх}}(t)], \quad (10.1)$$

где $|U_{\text{вх}}(t)| \leq 1$; a и m — параметры, принимающие такие значения, при которых функция $P(t)$ всегда остается положительной, а параметр P_0 равен средней мощности оптического сигнала.

Вследствие затухания в волоконном световоде на вход оптического приемника поступает уменьшенной мощности сигнал $K_c P(t)$ (здесь K_c — коэффициент передачи световода, $K_c = 10^{-\alpha L}$; α — погонное затухание световода, дБ/км; L — протяженность световода, км).

Идеальный оптический приемник преобразует свет в электрический сигнал, линейно связанный с входной оптической мощностью, т. е. в величину $K_{\text{п}} K_c P(t)$ (здесь $K_{\text{п}}$ — коэффициент передачи



Рис. 10.1
Обобщенная структурная схема ВОСС

идеального приемника). Приемное устройство может содержать или не содержать преобразователь первичного электрического сигнала (демодулятор, декодер). В общем случае на приемной стороне выделяется выходной электрический сигнал $U_{\text{вых}}(t)$.

Классифицировать ВОСС можно в зависимости от назначения, протяженности, быстродействия, используемых элементов и вида модуляции.

10.2. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

10.2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Световодные системы по виду используемой в них модуляции подразделяются на аналоговые и цифровые. Это деление соответствует общепринятому для других систем связи, с иной физической средой распространения сигнала. Напомним основные определения. Аналоговые ВОСС используют аналоговые методы модуляции, характеризующиеся непрерывным изменением одного из параметров переносчика сигнала (интенсивности оптического излучения при модуляции интенсивности, положения оптического импульса при ФИМ или его длительности при ШИМ и т. д.).

Цифровые ВОСС используют дискретные методы модуляции, характеризуются дискретным изменением одного из параметров переносчика сигнала, при этом область значений исходного параметра подразделяется на довольно большое число уровней квантования, каждому из которых ставится в соответствие определенный дискретный сигнал. При двоичной двухуровневой модуляции дискретный сигнал передается как набор нулей и единиц, которым в случае амплитудной модуляции соответствуют световые импульсы и паузы, а в случае фазоимпульсной (позиционной) модуляции — различные положения светового импульса в пределах выделенного временного интервала и т. п. Нестабильность выходной характеристики полупроводниковых излучателей ограничивает использование импульсных многоуровневых оптических сигналов.

По назначению и протяженности ВОСС можно подразделить на системы передачи, использующиеся в магистральных, зонавых и городских сетях связи, и системы распределения информации. ВОСС магистральных сетей предназначены для передачи сообщений на тысячи километров, зонавых сетей — для передачи информации в зоне до 600 км, а ВОСС городских сетей служат

соединительными линиями между АТС, вычислительными центрами, в качестве части распределительной сети кабельного телевидения и т. д. Как правило, эти системы передают широкополосные сигналы (телевизионный, видеотелефонный, многоканальный телефонный) и строятся на основе цифровых ВОСС с ретрансляцией. Они становятся сравнимыми по основным показателям с другими системами связи лишь при высоких скоростях передачи информации (около 10 Мбит/с) и большой протяженности участков приема (не менее 7...10 км). Для достижения таких скоростей передачи и дальностей в этих системах используются лазеры и кремниевые лавинные фотодиоды: кремниевые — при работе в диапазоне 0,8...1,1 мкм на основе AlGaAs-структур, лазеры и $p-i-n$ -фотодиоды на основе InGaAsP-структур — в диапазоне 1,3...1,7 мкм в сочетании с широкополосным градиентным или одномодовым волокном ($\Delta F > 1000$ МГц·км), имеющим низкое затухание ($\alpha < 3$ дБ/км). Однако при меньших скоростях передачи возможно применение и светодиодов, особенно в диапазоне 1,3...1,7 мкм, где очень мала дисперсия материала световода. Особенности построения компонентов таких систем будут рассмотрены ниже, при анализе цифровых ВОСС.

10.2.2. СХЕМЫ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

ВОСС можно использовать для сбора информации и обмена ею между удаленными оконечными устройствами (терминалами). Такие системы устанавливаются внутри объектов, учреждений, на борту корабля или летательного аппарата, служат в качестве распределительной сети интерактивного кабельного телевидения.

В настоящее время получили распространение несколько видов таких систем. На рис. 10.2 представлены упрощенные схемы таких систем с N терминалами:

- последовательная с ответвляющими соединениями (рис. 10.2а);
- последовательная замкнутая, или кольцевая (рис. 10.2б);
- параллельная с соединениями типа «звезда» (рис. 10.2в);
- гибридная, использующая соединение типа «звезда» и ответвляющие соединения (рис. 10.2г).

Эти ВОСС работают как в симплексном, так и в дуплексном режиме работы. Максимальное расстояние между терминалами может изменяться от десятков метров до нескольких километров, а ширина полосы передаваемого сигнала — от нескольких килогерц до десятков мегагерц. Отличительной особенностью таких

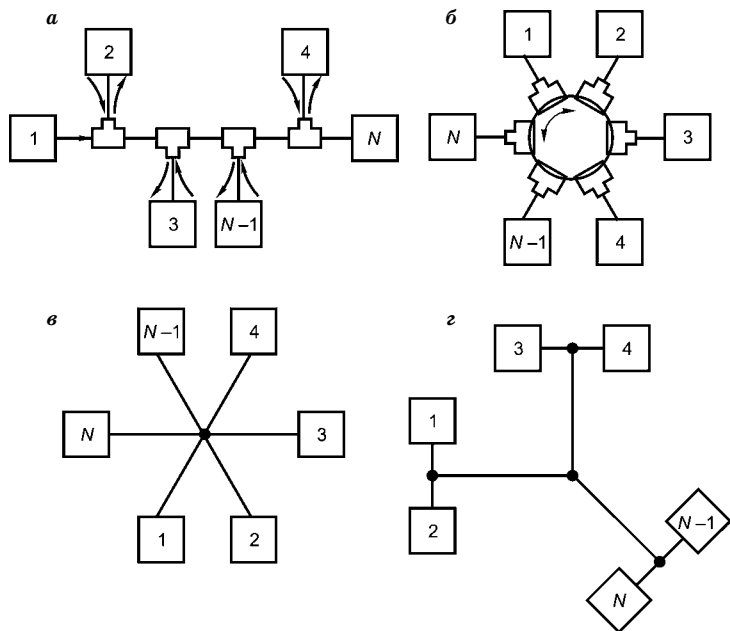


Рис. 10.2

Схемы волоконно-оптических систем распределения информации

систем является наличие компонентов, обеспечивающих подключение терминалов к информационным шинам и осуществляющих распределение информации. В этих компонентах возникают дополнительные потери, которые следует учитывать при выборе типа системы и ее проектировании.

В последовательной системе с одинаковыми и постоянными параметрами связующих компонент (вносимые потери в информационную шину, коэффициент ответвления направленного ответвителя и т. д.) наименьшее отношение оптической мощности на входе приемника к оптической мощности на выходе любого другого передатчика будет для терминалов с номерами 1 и N (рис. 10.2а); кроме того, приемные устройства должны иметь автоматическую регулировку усиления (АРУ) с большим динамическим диапазоном, чтобы обеспечить одинаковые условия приема сигнала любого передатчика.

В параллельной системе такая проблема не возникает, поскольку можно скорректировать разницу затуханий, вызванную различной длиной световодов.

Увеличение числа терминалов в последовательной системе приводит к быстрому уменьшению доли полезного сигнала на входе

приемников. В каждом конкретном случае требуется точный расчет характеристик систем с учетом всех влияющих факторов, на основании которого производится окончательный выбор схемы построения. Однако, как правило, при $N > 10$ оказывается целесообразнее применять параллельную систему распределения. При этом получается выигрыш в уровне сигнала и предъявляются менее жесткие требования к приемникам и передатчикам. Большое разнообразие типов распределительных систем и передаваемых по ним сигналов, различная длина соединительных информационных шин обуславливают существование множества схем их построения.

В распределительных ВОСС могут использоваться аналоговый и цифровой методы модуляции, двухслойные и градиентные световоды, различные сочетания излучателей и фотодетекторов. Например, бортовая система протяженностью несколько десятков метров, предназначенная для передачи сигнала с полосой несколько десятков килогерц, может быть выполнена (из соображений минимальной стоимости) с использованием недорогого двухслойного оптического волокна с затуханием 10 дБ/км и выше, светодиода в качестве источника излучения с аналоговой модуляцией и $p-i-n$ -фотодиода в качестве фотодетектора.

Система интерактивного кабельного телевидения, структурная схема которой изображена на рис. 10.3, обеспечивает двустороннюю передачу видеосигнала, сигналов звукового сопровождения и служебной связи. Коммутатор, управляемый ЭВМ, реализует двустороннюю видеосвязь абонентов, а также подключение абонентов к источникам видео- и звукового сигнала: телестудии, аудиостудии, банку служебной информации.

Создание таких систем при расстоянии между абонентами несколько километров потребует использования градиентного или одномодового оптического волокна, полупроводниковых лазеров с цифровой модуляцией излучения и ЛФД.

10.3. ОПТИЧЕСКИЕ ПЕРЕДАТЧИКИ

Обобщенная структурная схема оптического передатчика приведена на рис. 10.3. Оптический передатчик содержит переключатель тока, управляющий током накачки полупроводникового излучателя (СИД или лазер), и цепи стабилизации уровня излучений.

Регенерированный цифровой сигнал от устройства обработки сигнала поступает на вход переключателя тока, который соответственно включает (при передаче единицы) или выключает (при

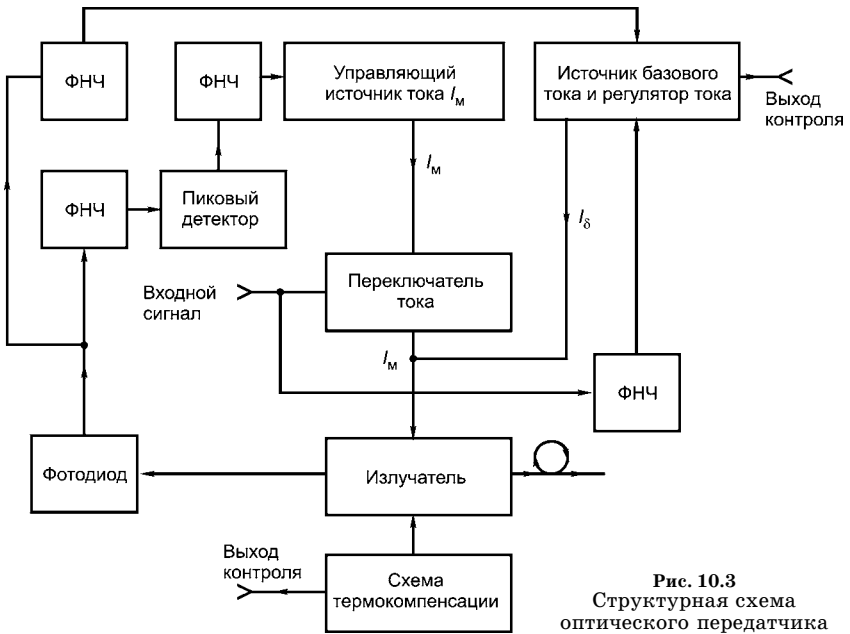


Рис. 10.3
Структурная схема
оптического передатчика

передаче нуля) источник смещения тока I_M , изменяя уровень излучаемой оптической мощности с P'_0 при «0» до пикового значения P'_1 при «1». Модулирующий ток I_M накладывается на ток постоянного смещения I_δ , который определяет уровень остаточной мощности P'_0 . Ток I_δ поступает от источника регулируемого базового тока. Токи I_M и I_δ устанавливаются в соответствии с требованиями к параметрам оптического цифрового сигнала.

Для стабилизации отношений сигнал/шум (С/Ш) на входе решающего устройства регенератора в передатчике необходимо поддерживать постоянной разность пиковой и остаточной мощностей $P'_1 - P'_0$ и снижать фазовые флуктуации переднего фронта оптического импульса.

Постоянство разности $P'_1 - P'_0$ при изменении температуры и старении полупроводникового излучателя обеспечивается с помощью автоматической регулировки тока I_M . Фазовые флуктуации переднего фронта оптического импульса и уровень шумов излучателя зависят от соотношения тока I_δ и порогового тока I_t . При достижении порогового тока отношение С/Ш на приемной стороне уменьшается. При лазерном режиме генерации ($I_\delta > I_t$), помимо снижения шумов источника излучения, уменьшается время задержки включения излучателя. В связи с этим, как прави-

ло, I_δ в оптическом передатчике на полупроводниковом лазере выбирается близко к I_t , но не должен превышать его. Для стабилизации I_δ относительно I_t в схеме передатчика предусмотрена цепь стабилизации средней мощности излучения с помощью изменения величины I_δ .

Для устранения влияния низкочастотной составляющей энергетического спектра оптического сигнала, средней мощности P_{CP} и разности мощностей $P'_1 - P'_0$ в цепь обратной связи включают фильтр нижних частот. Принцип работы цепей стабилизации режима излучателя поясняет рис. 10.4. При повышении температуры ватт-амперная характеристика лазера смещается, и при отключенных цепях стабилизации разность $I_\delta - I_t$ увеличивается, разность $P'_1 - P'_0$ уменьшается.

После периода переходных процессов в цепях стабилизации устанавливаются новые значения тока $I_{\delta 2}$ и $I_{t 2}$ и восстанавливается прежнее значение разности $P'_1 - P'_0$ и P_{CP} . Для уменьшения температурной зависимости I_t в передатчике предназначена схема термокомпенсации. Тогда старение лазера контролируется по изменению тока I_δ , а информация об уровне тока смещения от каждого промежуточного регенератора по цепям контроля передается на конечные станции.

Передающие оптоэлектронные модули (ПОМ), применяемые в волоконно-оптических системах, предназначены для преобразования электрических сигналов в оптические. Последние должны быть введены в волокно с минимальными потерями. Производятся весьма разнообразные ПОМ, отличающиеся по конструкции, а также по типу источника излучения. Одни работают на телефонных скоростях с максимальным расстоянием до нескольких

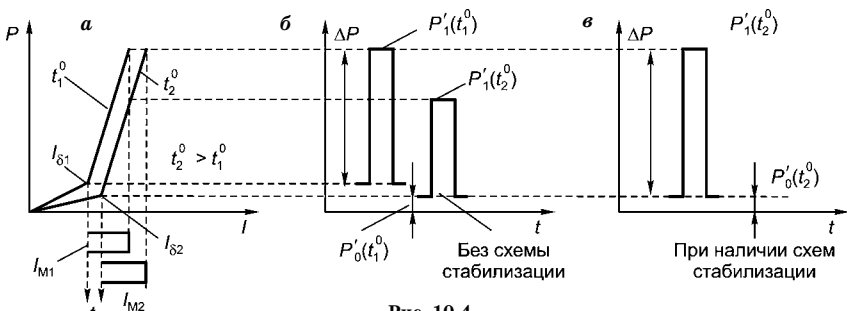


Рис. 10.4
К пояснению принципа работы цепей стабилизации:

a — ватт-амперные характеристики; *б* — иллюстрация нестабильной работы передатчика при отсутствии узла стабилизации средней мощности; *в* — иллюстрация стабильной работы передатчика за счет устройства стабилизации средней мощности.

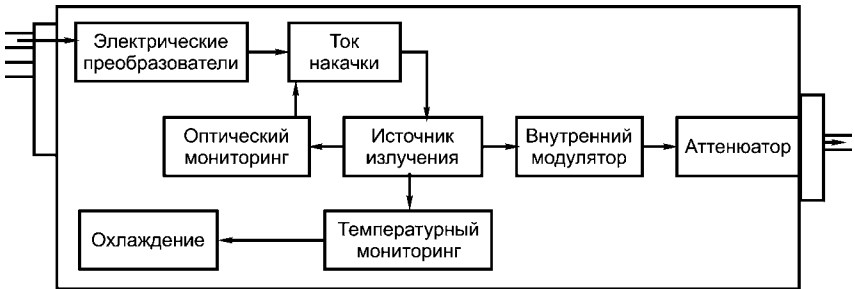


Рис. 10.5
Структурная схема оптоэлектронного модуля

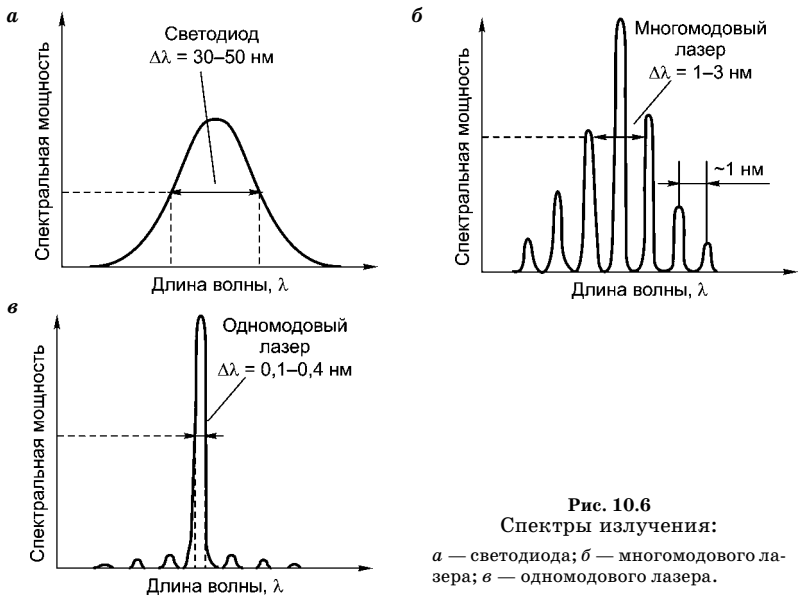


Рис. 10.6
Спектры излучения:

а — светодиода; *б* — многомодового лазера; *в* — одномодового лазера.

метров, другие передают сотни и даже тысячи мегабит в секунду на расстояние несколько десятков километров.

Один из вариантов ПОМ в виде структурной схемы представлен на рис. 10.5.

Главным элементом ПОМ является источник излучения. Применяемый в волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) источник излучения должен удовлетворять ряду требований. Излучение должно соответствовать по длине волны одному из окон прозрачности волокна (в традиционных оптических волокнах существуют минимальные потери света при распространении; обеспечива-

ются в трех окнах: 850, 1300, 1550 нм). Источник излучения должен выдерживать необходимую частоту модуляции для обеспечения передачи информации с требуемой скоростью, а температурные вариации не должны сказываться на его работе. Большая часть излучения должна попадать в волокно с минимальными потерями, т. е. источник излучения должен быть эффективным. Кроме того, мощность источника должна быть достаточно высокой, для того чтобы сигнал можно было передавать на большие расстояния, но не настолько высокой, чтобы излучение приводило к нелинейным эффектам или могло повредить волокно либо оптический приемник. Стоимость источника излучения должна быть относительно невысокой.

В настоящее время используются два основных типа источников излучения, удовлетворяющие перечисленным требованиям: светодиоды (LED) и полупроводниковые лазерные диоды (LD).

Светодиоды отличаются от лазерных диодов прежде всего большей шириной спектра излучения, как можно видеть на рис. 10.6. Оба типа устройств весьма компактны и хорошо сопрягаются со стандартными электронными цепями.

Для организации передачи оптических сигналов недостаточно только источника излучения. В любой конструкции ПОМ есть специальный держатель (housing), который позволяет закрепить и защитить составные элементы передатчика: источник излучения, узел электрического интерфейса и место сопряжения с волокном. Иногда требуются дополнительные внутренние элементы для оптимального подсоединения волокна. Необходимым элементом лазерных диодов являются цепь тока накачки и система контроля температуры. Для сложных лазерных систем добавляют выходной мониторинг оптического сигнала.

10.4. ПРИЕМНИКИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СВЯЗИ

10.4.1. ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Цифровые волоконно-оптические системы связи предназначены для передачи сигналов, несущих информацию от передающей информационной системы (ИС) к ИС приемника (абонента). И передающая информация ИС, и принимающая работают с цифровыми электрическими сигналами. В то же время передача информационных сигналов осуществляется оптическими импульсами, распространяющимися вдоль волоконно-оптической линии

связи. Последовательность электрических сигналов (сообщение), формируемое передающей ИС, преобразовывается оптическим передатчиком в последовательность оптических сигналов, входящих в оптическое волокно и распространяющихся в нем до приемной части. В приемной части ВОЛС оптические сигналы вновь преобразуются в электрические. Преобразование оптических сигналов в электрические происходит в приемниках оптического излучения.

Приемники оптического излучения (фотоприемники) в цифровых системах связи представляют собой сложные устройства, осуществляющие преобразование световых сигналов в электрические [42]. Сначала световое излучение преобразуется в электрический ток, усиливается, а затем восстанавливается переданное сообщение и формируется соответствующий ему электрический сигнал. Подавляющее большинство действующих оптических систем передачи информации используют двоичный (бинарный) код и простейшую амплитудную модуляцию с двумя амплитудами сигнала. Приемники оптического излучения для таких систем и будут рассмотрены ниже, тем более что структура их наиболее проста.

Цифровой фотоприемник (приемник цифровой волоконно-оптической системы связи с амплитудной модуляцией и прямым детектированием) конструктивно состоит из четырех блоков. В первом блоке происходит последовательное преобразование оптических сигналов в электрический ток (оптоэлектронное преобразование).

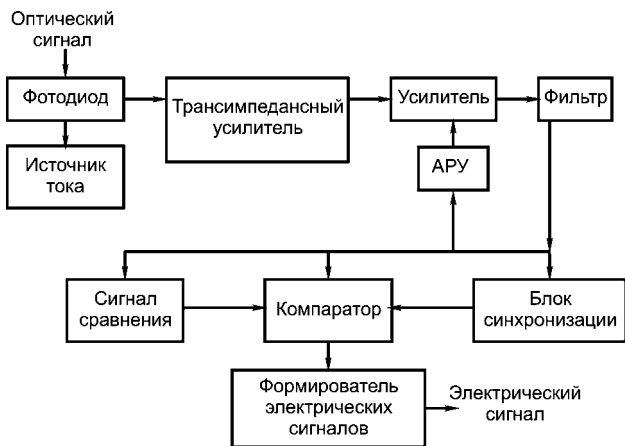


Рис. 10.7

Структурная схема цифрового фотоприемника

Во втором блоке осуществляется линейное усиление электрического тока; в третьем блоке восстанавливаются данные, а в четвертом — создается выходной электрический сигнал.

Структура цифрового фотоприемника представлена на рис. 10.7.

Преобразование модулированного светового излучения (светового сигнала) в модулированный электрический ток происходит в фотодиоде. Ток фотодиода усиливается малошумящим трансимпедансным усилителем. Выходящие из него электрические импульсы тока усиливаются линейным усилителем с автоматической регулировкой усиления, фильтруются и попадают в блок восстановления данных. В блоке восстановления данных усиленный электрический импульс разделяется на три части. Одна часть импульса используется для формирования частоты в блоке синхронизации, вторая часть применяется для формирования постоянного порогового тока, с которым сравниваются импульсы тока информационного сигнала. Третья часть импульса подается на схему сравнения, где сравнивается с пороговым значением тока для принятия решения о том, какой символ передан: «1» или «0». Сравнить значение импульса тока с пороговым значением тока необходимо в точно определенные моменты времени — в середине каждого тактового периода. Моменты, когда пороговый ток сравнивается с током фотодиода, задает генератор тактовой частоты. Для оптимальной работы фотоприемника среднее значение усиленного тока должно примерно совпадать с пороговым значением. Выполнение этого условия обеспечивает блок автоматической регулировки усиления. Схема усиления управляет работой формирователя электрических сигналов, который в зависимости от результатов сравнения создает электрический сигнал, соответствующий логической единице или логическому нулю.

Важнейшей рабочей характеристикой действующей системы передачи информации, определяющей качество связи, является коэффициент ошибок. Он равен отношению числа ошибочно интерпретированных символов к общему числу переданных символов. Причина возникновения ошибок — наличие шумов.

Действительно, в реальных системах связи значения фототока, соответствующие и «1», и «0», флуктуируют во времени из-за наличия шумов. Такие временные флуктуации тока могут привести к ошибочной интерпретации информационного символа.

Возникновение ошибок в двоичных цифровых системах связи с амплитудной модуляцией поясняет рис. 10.8.

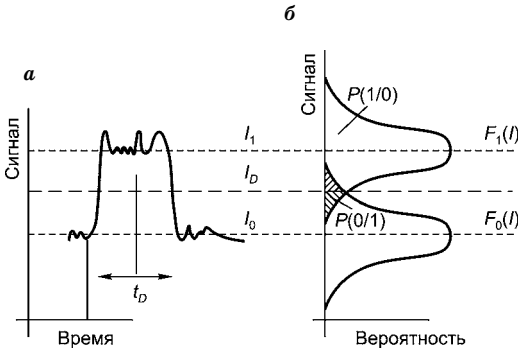


Рис. 10.8
Возникновение ошибок
в двоичных системах
связи:

a — электрический информационный сигнал с шумом на входе схемы сравнения; *б* — плотность распределения вероятностей измеренных значений тока сигнала для «1» и «0»; I_0 — уровень нуля; I_1 — уровень единицы; I_D — уровень сравнения; t_D — длительность такта; $P(1/0)$ — вероятность интерпретации «0» как «1»; $P(0/1)$ — вероятность интерпретации «1» как «0».

Из-за шумов измеренная величина тока отличается от точной величины. Разброс измеренных значений тока при передаче логических «1» и «0» описывается соответствующими функциями $F_1(I)$ и $F_0(I)$ распределения вероятностей. На рис. 10.8б представлены графики функций $F_1(I)$ и $F_0(I)$. Как видно, обе кривые пересекают прямую, соответствующую уровню напряжения сравнения I_D . Это означает, что существует некоторая, обычно весьма малая, но отличная от нуля вероятность интерпретации принятого сигнала. Вероятность ошибочной интерпретации «0» как «1» $P(1/0)$ определяется площадью под частью функции распределения $F_0(I)$, отсекаемой линией тока сравнения I_D .

Аналогично вероятность ошибочной интерпретации «1» как «0» $P(0/1)$ определяется площадью под частью функции распределения $F_1(I)$, отсекаемой линией тока сравнения I_D . При равной вероятности передачи «0» и «1» коэффициент ошибок определяется простым выражением

$$K_{\text{ош}} = \frac{1}{2} \left(P\left(\frac{1}{0}\right) + P\left(\frac{0}{1}\right) \right). \quad (10.2)$$

В предположении гауссовского распределения шума с нулевыми средними значениями интенсивности и со среднеквадратическими отклонениями σ_1 , σ_2 для «1» и «0» коэффициент ошибок определяется как

$$K_{\text{ош}}(Q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \int_Q^\infty dx = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right), \quad (10.3)$$

где Q — показатель качества принимаемого сигнала; $Q = (I_1 - I_2) / (\sigma_1 + \sigma_2)$.

Для нормальной работы цифровой системы связи необходимо, чтобы шум не превышал некоторого заданного значения. При

фиксированной скорости передачи информации и пренебрежении шумами самого светового сигнала шумы фотоприемника можно считать постоянными и не зависящими от мощности света. Очевидно, что в этом случае $K_{\text{ош}}$ уменьшается при увеличении амплитуды полезного сигнала и увеличивается при ее уменьшении. Минимальная средняя мощность оптического излучения, необходимая для передачи данных с заданным коэффициентом ошибок, есть *чувствительность оптического приемника*. В цифровых системах голосовой связи максимальный допустимый коэффициент ошибок обычно 10^{-9} . Чувствительность может выражаться в линейных единицах, производных от ватта (нановатты, микроватты), или в логарифмических — децибелах по отношению к милливатту (дБм).

Реальная чувствительность приемников зависит от многих факторов: нормированного коэффициента ошибок, формы импульса, скорости передачи информации, ширины полосы приемника и шумов оптического излучения. Поэтому в спецификациях чувствительность приемника задается только для определенного типа передатчика, формы двоичных сигналов и скорости их передачи.

С увеличением скорости передачи информации чувствительность ухудшается, т. е. возрастает в линейных единицах приблизительно пропорционально скорости, определяемой в битах в секунду [бит/с]. Чувствительность современных цифровых высокоскоростных приемников на основе $p-i-n$ -фотодиодов определяется тепловыми шумами трансимпедансного усилителя, как показано на рис. 10.9.

Чувствительность фотоприемника при отсутствии шумов называется квантовым пределом чувствительности и определяется квантовыми свойствами светового излучения.

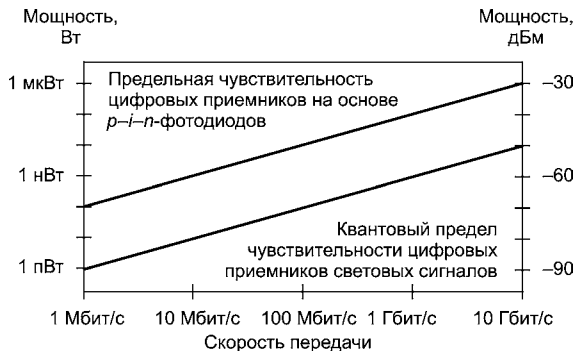


Рис. 10.9

Зависимость чувствительности типичного цифрового оптического приемника от скорости передачи информации и квантовый предел чувствительности оптических приемников

10.4.2. ПРИЕМНЫЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ МОДУЛИ

Приемные оптоэлектронные модули (ПРОМ) являются важными элементами волоконно-оптической системы. Их функция — преобразование принятого из волокна оптического сигнала в электрический. Последний обрабатывается затем электронными устройствами.

Основными функциональными элементами ПРОМ являются:

- фотоприемник, преобразующий полученный оптический сигнал в электрическую форму;
- каскад электрических усилителей, усиливающих сигнал и преобразующих его в форму, пригодную для обработки;
- демодулятор, воспроизводящий первоначальную форму сигнала.

На практике функциональные элементы разных ПРОМ могут отличаться. Например, детектор типа «лавинный фотодиод» обеспечивает внутреннее усиление, в результате чего собственные шумы электронного усилителя, к которому подключен ЛФД, становятся не столь заметными по сравнению с полезным сигналом. В некоторых ПРОМ отсутствует демодулятор или цепь принятия решения, поскольку электрический сигнал с выхода каскада усилителей приемлем для непосредственной обработки другими электронными устройствами. Иногда для более эффективной работы ПРОМ перед детектором устанавливается оптический усилитель.

На рис. 10.10 представлены функциональные элементы аналогового и цифрового ПРОМ. Аналоговые ПРОМ принимают аналоговый оптический сигнал и на выходе выдают аналоговый электрический сигнал. К аналоговым приемникам предъявляются следующие требования: высокая линейность преобразования и усиление сигнала при минимуме вносимых шумов — в противном случае возрастают искажения сигнала. На протяженных линиях с большим количеством приемопередающих узлов искажения и шумы накапливаются, что снижает эффективность аналоговых ретрансляционных линий связи.

При цифровой передаче не требуется очень точная ретрансляция форм импульсов. Цифровой приемник должен включать узел принятия решения или дискриминатор, имеющий установленные пороги на принятие сигналов «0» и «1» и распознающий, какой сигнал пришел, устраняющий шумы и восстанавливающий необходимую амплитуду сигнала. Правильное выделение нужного сигнала возможно при высоком уровне шумов.

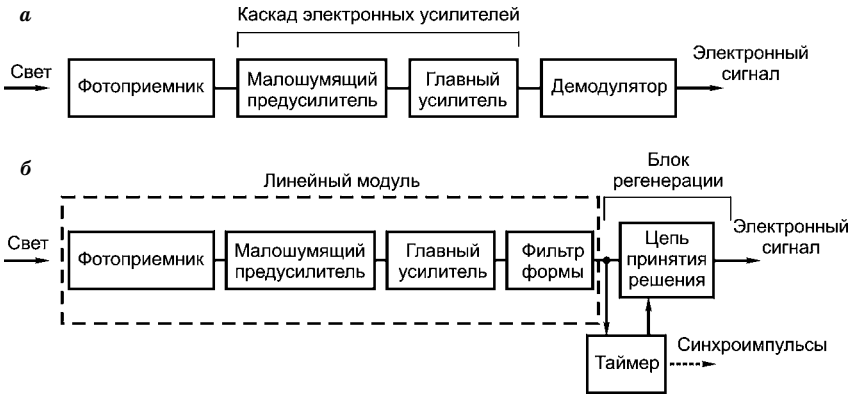


Рис. 10.10
 Функциональные элементы приемных оптоэлектронных модулей:

а — аналогового; б — цифрового.

Различают синхронный и асинхронный режимы приема-передачи цифрового сигнала. При синхронном режиме битовый поток между приемником и передатчиком непрерывный. При асинхронном режиме данные передаются в виде организованных битовых последовательностей — пакетов. В промежутках между пакетами линия молчит — сигнала нет. При синхронном режиме приема-передачи таймер приемника выделяет в приходящей битовой последовательности специальные сигналы — синхроимпульсы, на основании которых приемник регулярно настраивает или подстраивает свои часы. При асинхронном режиме приема-передачи у приемника есть собственный независимый таймер. Принимая начальные биты пакета (преамбулу), таймер настраивает узел принятия решения так, чтобы определение приходящего бита выполнялось на его середине. Электрический сигнал, который выдает узел принятия решения, идет на частоте таймера. Из-за погрешности таймеров по мере принятия следующих битов пакета момент определения каждого приходящего бита плавно смещается относительно середины бита. Для правильной идентификации всех битов пакета необходимо, чтобы смещение за время принятия пакета не превысило 0,5 бита. Это условие создает ограничение максимальной длины пакета. Чем меньше погрешность таймеров, тем большей длины пакет может быть передан.

Основным элементом ПРОМ является фотоприемник, изготавливаемый обычно из полупроводникового материала. Работа фотоприемника основана на явлении внутреннего фотоэффекта, при котором в результате поглощения фотонов с энергией, превышающей

энергию запрещенной зоны, происходит переход электронов из валентной зоны в зону проводимости (генерация электронно-дырочных пар). При наличии электрического потенциала с появлением электронно-дырочных пар от воздействия оптического сигнала появляется электрический ток, обусловленный движением электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне. Эффективная регистрация генерируемых в полупроводнике электронно-дырочных пар обеспечивается путем разделения носителей заряда. Для этого используется конструкция с $p-n$ -переходом, которая называется фотодиодом. Из фотоприемников, применяемых в ВОЛС, получили распространение $p-i-n$ -фотодиоды, лавинные фотодиоды, фототранзисторы.

10.5. ЦИФРОВЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

Развитие цифровой техники и преимущества, свойственные цифровой передаче информации (высокая помехозащищенность и нечувствительность к нелинейности тракта передачи), обусловили широкое применение цифровой связи для передачи всех видов сообщений. Цифровые сигналы передаются по кабельным, спутниковым, радиорелейным линиям. ВОСС в этом смысле не являются исключением. В обозримом будущем этот вид модуляции считается наиболее перспективным для световодных систем, так как выходная характеристика полупроводникового лазера — основного источника систем передачи — существенно нелинейна.

Основным методом преобразования аналогового сигнала электросвязи в цифровой является, как известно, импульсно-кодовая

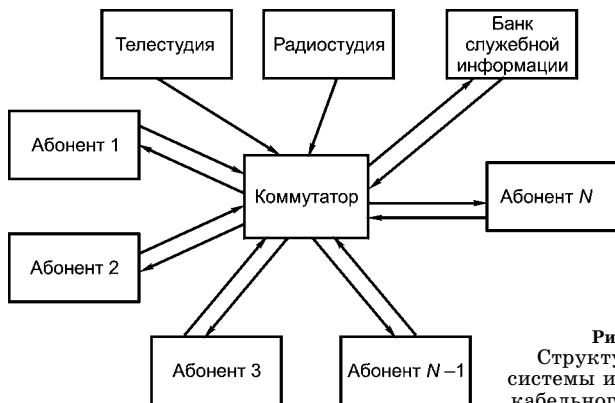


Рис. 10.11
Структурная схема
системы интерактивного
кабельного телевидения

модуляция (ИКМ). Типовая структурная схема системы интерактивного кабельного телевидения приведена на рис. 10.11.

ВОСС с ИКМ отличается от соответствующей кабельной системы главным образом линейным оборудованием и средой передачи сигналов. Поэтому, рассматривая работу цифровой ВОСС, прежде всего необходимо перечислить ее отличительные особенности: вход в линии передачи сигнала, оптические приемник и передатчик, особое построение линейного тракта. Следует также проследить влияние этой системы на проектирование сетей связи.

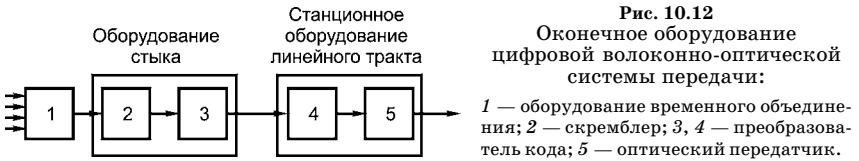
Выбор элементной базы и параметры линейного тракта ВОСС зависят от скорости передачи символов цифрового сигнала. МККТТ установил правила объединения цифровых сигналов и определил иерархию аппаратуры для временного объединения цифровых сигналов электросвязи. Сущность иерархии состоит в ступенчатом расположении указанной аппаратуры, при котором на каждой ступени объединяется определенное число цифровых сигналов, имеющих одинаковую скорость передачи символов, соответствующую предыдущей ступени, а скорость передачи символов образованного цифрового сигнала электросвязи предоставляет возможность для его объединения с другими сигналами электросвязи, передаваемыми с такой же скоростью.

Для европейских стран установлены следующие стандартные скорости передачи сигналов для различных ступеней иерархии (соответственно емкости телефонных каналов): первая ступень — 2,048 Мбит/с (120 телефонных каналов); вторая — 8,448 Мбит/с (120 телефонных каналов); третья — 34,368 Мбит/с (480 телефонных каналов); четвертая — 139,264 Мбит/с (1920 телефонных каналов). В соответствии с приведенными скоростями выделяют первичную, вторичную, третичную и четверичную группы цифровых каналов связи (соответственно названы системы ИКМ). Другие иерархические системы пока изучаются.

Сигналы первичной системы ИКМ можно передавать по волоконно-оптическому кабелю, но это экономически нецелесообразно, поэтому использование световодных систем ориентировано преимущественно на передачу вторичных, третичных и четверичных групп цифровых сигналов.

На основе рассмотренных иерархических систем ИКМ могут подразделяться на городские, зоновые и магистральные сети связи.

Цифровые сигналы во вторичной, третичной и четверичной системах получены объединением цифровых сигналов предыдущих иерархических систем. Аппаратура, в которой объединяются эти сигналы, называется оборудованием временного объединения



цифровых сигналов, его схема приведена на рис. 10.12. На выходе этой аппаратуры цифровой сигнал скремблируется скремблером 2, т. е. преобразуется структурно, без изменения скорости передачи символов, для приближения его свойств к свойствам случайного сигнала. Добиться устойчивой работы линии связи вне зависимости от статистических свойств источников информации невозможно.

После скремблера цифровой сигнал может подаваться на вход любой цифровой системы связи при помощи аппаратуры электрического стыка. Для каждой иерархической скорости МККТТ рекомендованы определенные коды стыка. Операцию преобразования бинарного кода, поступающего от оборудования временного объединения в код стыка, выполняет преобразователь кода 3. К оборудованию стыка также относится линия, соединяющая две части оборудования цифровой волоконно-оптической системы передачи; длина такой линии от нескольких метров до сотен метров. Код стыка может отличаться от кода, принятого в оптическом линейном тракте. Операцию преобразования кода стыка в код цифровой ВОСС выполняет преобразователь кода 4, на выходе которого получается цифровой электрический сигнал, модулирующий излучение оптического передатчика 5.

Модулированное оптическое излучение с помощью согласующего устройства вводится в ВОК. Кабели соединяются при помощи разъемных и неразъемных соединений, ширина полосы пропускания идеального световода, не имеющего неоднородностей, обратно пропорциональна его длине: $\Delta F_L = \Delta F/L$, где ΔF — полоса пропускания волокна, МГц·км; L — протяженность волокна, км. Такая полоса реализуется при отсутствии преобразования мод в волокне и определяется различием группового времени распространения мод, а также внутримодовой и материальной дисперсиями.

В оптический линейный тракт могут включаться оптические корректоры, которые способствуют выравниванию группового времени распространения мод в световоде. При использовании модовых смесителей (модовых скремблеров) ширина полосы пропускания оптического волокна будет определяться как

$$\Delta F'_L = \frac{\Delta F}{\sqrt{L}}. \quad (10.4)$$

В реальном световоде из-за взаимодействия направляемых мод на неоднородностях полюса пропускания пропорциональна $L^{-\delta}$ ($0,5 \leq \delta < 1$). При полном смещении мод $\delta \approx 0,5$, что соответствует случаю скремблирования.

Наряду с полезным эффектом расширения полосы частот ΔF_L , взаимодействие мод сопровождается увеличением затухания в световоде на величину $\delta_{\text{см}}L$, при этом чем больше относительное расширение полосы $\Delta F'_L / \Delta F_L$, тем больше дополнительное затухание. При установившемся распределении мод связь этих величин определяется равенством

$$\alpha_{\text{см}}L = k \left(\frac{\Delta F'_L}{\Delta F_L} \right), \quad (10.5)$$

где k — постоянная, которая не зависит от размеров волокна и показателя его преломления, а определяется профилем показателя преломления, затуханием и статистическим распределением функции связи мод вдоль волокна. Для волокна с параболическим профилем $k \approx 0,18$ дБ.

Затухание световода приводит к уменьшению интенсивности распространяющихся по нему оптических импульсов, а изменение ширины полосы пропускания — к уширению этих импульсов. Для восстановления формы, амплитуды и временных характеристик цифровой последовательности в ВОСС, так же как в цифровых системах с другой средой передачи, используется регенератор. Регенератор состоит из фотоприемника, устройства обработки сигнала, оптического передатчика и устройства контроля. Различают линейные регенераторы, устанавливаемые вдоль линейного тракта системы в необслуживаемых регенерационных пунктах (НРП), обслуживаемых пунктах с гарантированным электропитанием (ОРП) или на попутных АТС, и станционные регенераторы, устанавливаемые на оконечных станциях и входящие в состав приемной части станционного оборудования линейного тракта.

Расстояние между регенераторами зависит от общих потерь в оптическом тракте, оптической мощности, введенной в световод на передающей стороне, и минимальной требуемой мощности принимаемого оптического сигнала, которая определяется заданной величиной вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$, конструкцией фотоприемника, типом используемого фотодиода, длительностью и формой оптического импульса на выходе оптического передатчика, амплитудно-частотной характеристикой оптического тракта и фотоприемника и т. д.

В технической литературе принято пользоваться относительной мощностью (дБм): мощностью в децибелах относительно одного милливатта, определяемой как $P = 10 \lg P$.

Приблизненно требуемую мощность можно рассчитать также по формулам, дБм:

для $B < 50$ Мбит/с:

$$P_{p-i-n} = -55 + 11 \ln B; \quad (10.6)$$

$$P_{\text{ЛФД}} = -70 + 10 \ln B; \quad (10.7)$$

для $B \geq 50$ Мбит/с:

$$P_{p-i-n} = -53 + 10 \ln B; \quad (10.8)$$

$$P_{\text{ЛФД}} = -70 + 10 \ln B. \quad (10.9)$$

Расстояние между регенераторами зависит также от уширения оптических импульсов в световоде. При среднеквадратической ширине импульса больше половины интервала между импульсами T различить два соседних импульса практически невозможно.

Если ширина полосы световода такова, что уширение импульса меньше $0,25T$, то расстояние между оптическим передатчиком и регенератором определяется потерями в оптическом тракте. Если уширение импульса превышает $0,5T$, то длина кабеля должна быть уменьшена по сравнению с длиной, ограниченной потерями, чтобы уменьшить перекрытие импульсов до требуемого. Применительно к этим двум ситуациям рассматривают систему, ограниченную по потерям или полосе.

В регенераторе искаженный цифровой сигнал восстанавливается с заданной точностью по амплитуде, форме и временным характеристикам и с помощью согласующего устройства оптического передатчика вводится в ВОК. Сигнал проходит новый участок регенерации, восстанавливается в следующем регенераторе и т. д. Этот процесс продолжается до тех пор, пока оптический сигнал не достигнет фотоприемника станционного регенератора.

После восстановления в станционном регенераторе электрический цифровой сигнал в коде стыка преобразуется в цифровой сигнал преобразователем кода, аналогичным преобразователю кода A , а затем по соединительной линии достигает преобразователя кода оборудования стыка, на выходе которого получается сигнал в бинарном коде. После этого устройство, называемое дескремблером, выполняет с сигналом операцию, обратную скремблированию, и исходный цифровой сигнал поступает в оборудование временного разделения.

Отличительные особенности построения линейного тракта цифровой световодной системы передачи начинаются с выбора кода и преобразователя кода, осуществляющего преобразование кода стыка в выбранный код системы. Чтобы понять эти особенности, рассмотрим сначала, какие требования предъявляются к цифровому сигналу в связи с передачей его по ВОСС.

Требования к цифровому сигналу световодной системы передачи. В сетях связи для линейного тракта источником цифрового сигнала является стык. Среда передачи линейного тракта не должна влиять на ранее выработанные общие требования к оборудованию временного объединения цифровых сигналов и стыка. Не зависящие от среды передачи параметры цифрового сигнала на входе и выходе линейного тракта рекомендованы МККТТ.

Оптическое волокно как среда передачи сигнала, а также фотоэлектронные компоненты фотоприемника и оптического передатчика накладывают ограничения на свойства цифрового сигнала, поступающего в линейный тракт, поэтому между оборудованием стыка и линейным трактом ВОСС помещают преобразователь кода. Выбор кода световодной системы передачи чрезвычайно важен. Код в линии обеспечивает соответствие передаваемой двоичной информации цифровому сигналу, модулирующему оптический передатчик. При выборе кода следует учитывать несколько факторов.

Во-первых, нелинейность модуляционной характеристики и температурную зависимость излучаемой оптической мощности лазера, обуславливающие использование двухуровневых кодов.

Во-вторых, вид энергетического спектра — необходим минимум низкочастотных и высокочастотных компонент. Энергетический спектр состоит из двух частей: непрерывной и дискретной. Непрерывная часть зависит от информационного содержания сигнала и типа кода. Низкочастотную составляющую непрерывной части энергетического спектра следует подавлять. Это необходимо для того, чтобы цифровой сигнал не искажался в усилителе переменного тока фотоприемника. Без подавления для реализации оптимального приема перед решающим устройством регенератора необходимо устанавливать дополнительное устройство, восстанавливающее низкочастотную составляющую, что усложняет оборудование линейного тракта.

Подавлять низкочастотную составляющую необходимо еще и по другой причине. Оптическая мощность, излучаемая полупроводниковым лазером, зависит от окружающей температуры и может быть легко стабилизирована посредством отрицательной

обратной связи по среднему значению излучаемой мощности только в том случае, если отсутствует низкочастотная часть спектра, изменяющаяся во времени, иначе в цепь отрицательной обратной связи приходится вводить специальные устройства, компенсирующие эти изменения. Это также приводит к усложнению схемы оптического передатчика.

В-третьих, для выбора кода необходим анализ информации о тактовом синхросигнале в линейном сигнале. В приемнике эта информация используется для восстановления фазы и частоты хронизирующего колебания, необходимого для управления принятием решения в пороговом устройстве. Добиться синхронизации тем проще, чем больше переходов уровня в цифровом сигнале, т. е. переходов вида «10» или «01». С точки зрения восстановления тактовой частоты и простоты реализации схемы выделения хронизирующей информации лучше всего, если дискретная составляющая энергетического спектра цифрового сигнала находится на тактовой частоте.

В-четвертых, код не должен накладывать какие-либо ограничения на передаваемое сообщение и обеспечивать однозначную передачу любой последовательности двоичных сигналов.

В-пятых, код должен обеспечивать возможность обнаружения и исправления ошибок. Основной характеристикой качества связи является частотность появления ошибок, или коэффициент ошибок, определяемый отношением среднего количества неправильно принятых посылок к общему числу посылок.

Контроль качества связи по частотности появления ошибок необходимо производить, не прерывая работу линии. Это требование предполагает использование кода, обладающего избыточностью, — тогда достаточно фиксировать нарушение правила его формирования, чтобы контролировать качество связи.

Верно выбранный код гарантирует простоту реализации оптического передатчика, низкое потребление электроэнергии и низкую стоимость оборудования линейного тракта. Вид кода зачастую определяет сложность реализации кодера и декодера, оптического передатчика и фотоприемника, устройств обработки сигналов и контроля ошибок. Например, желательно, чтобы переходы уровней в цифровом сигнале следовали разреженно. Это позволяет снизить быстродействие элементов цифровых узлов аппаратуры и тем самым повысить устойчивость их работы. Особо следует подчеркнуть влияние кода на реализацию регенератора, устанавливаемого на НРП. Электропитание НРП обычно подводится по дополнительному проводу, либо применяется автономный источник. В свя-

зи с этим необходимо обеспечить минимальное потребление электроэнергии регенератором и устройством контроля НРТ.

Рассмотрим некоторые способы улучшения свойств цифрового бинарного сигнала.

Улучшение статистических свойств бинарного сигнала с помощью скремблирования. Двоичные данные поступают от разных источников сигнала: оборудования временного объединения цифровых сигналов, ИКМ кодеков при факсимильной, видеотелефонной или телевизионной передаче и т. д., поэтому их статистические характеристики различаются. Улучшить параметры бинарной импульсной последовательности позволяет представление двоичной информации с помощью бинарного кода, отражающего двоичные данные, поступающие от источника информации. Если такое отражение является непосредственным (без перекодирования), то бинарный код с учетом формы кодового импульса называют NRZ-L или RZ-L. Сокращения NRZ (non return to zero — невозвращение к нулю) и RZ (возвращение к нулю) описывают различные формы кодовой посылки, а символ L обозначает непосредственное кодирование информации, поступающей от источника. При NRZ длительность кодового импульса $\tau_{\text{И}}$ соответствует длительности такта T , при RZ $\tau_{\text{И}} < T$.

Если исходной импульсной последовательности требуется придать свойства случайного сигнала, независимо от статистических свойств двоичных данных источника сигнала применяется скремблирование. В этом случае перекодированный сигнал называется бинарным скремблированным сигналом. Для него характерна одинаковая вероятность появления единиц и нулей: вероятность появления группы из m одинаковых символов равна $(0,5)^m$, а автокорреляционная функция подобна скремблированию в ВОСС. Она позволяет улучшить выделение хронизирующих импульсов независимо от структуры передаваемого информационного сигнала и оптимизировать отношение сигнал/шум, уменьшить низкочастотную составляющую спектра, а при использовании формата RZ — защиту в некоторых пределах от дисперсионных искажений. В связи с этим скремблированный бинарный сигнал считается самым перспективным при скорости передачи более 140 Мбит/с. Он обуславливает наименее жесткие требования к элементной базе по сравнению с другими сигналами.

Основным элементом скремблера является n -каскадный регистр сдвига с обратными связями, обеспечивающими получение сигнала с периодом максимальной длины $2^n - 1$. Различают два вида систем «скремблер–дескремблер»: с самосинхронизацией

и с установкой. Когда используется самосинхронизирующаяся система, дескремблер на стороне приема не требует никакой информации, кроме переданного скремблированного цифрового сигнала, для того чтобы аннулировать воздействие скремблера на стороне приема. Самосинхронизирующаяся система «скремблер–дескремблер» применяется в основном, когда источник информации недоступен или нет путей передачи синхронизирующей информации на дескремблер.

На рис. 10.13 приведена структурная схема самосинхронизирующейся системы скремблирования. На стороне передачи двоичной информации сигнал α_k комбинируется по mod2 с сигналом r_k , полученным от n -каскадного сдвигового регистра. Функция обратной связи выбирается так, чтобы получить псевдослучайную последовательность максимальной длины $2^n - 1$, когда передаваемый сигнал равен нулю.

Процедура, обратная функции скремблирования самосинхронизирующейся системы, имеет место на стороне приема в дескремблере, который конструктивно идентичен скремблеру на стороне передачи. Сигнал на выходе системы «скремблер–дескремблер» соответствует входному сигналу на стороне передачи, если

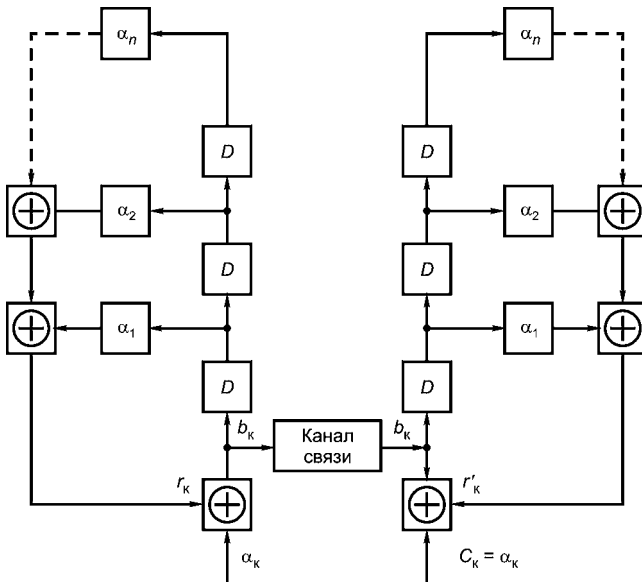


Рис. 10.13

Схема самосинхронизирующейся системы скремблирования:

$\alpha_1, \dots, \alpha_n$ — весовые коэффициенты; D — линия задержки.

не появляется сигнал ошибки, т. е. справедливы следующие соотношения:

$$b_k = a_k \oplus r_k, \quad c_k = b_k \oplus r'_k = a_k \oplus r_k \oplus r'_k = a_k,$$

при $r_k = r'_k = \alpha$, $b_{k-1} \oplus \alpha_2 b_{k-2} \oplus \dots \oplus \alpha_n b_{k-n}$,

где $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ равны 1 или 0 в зависимости от того, используется или не используется соответствующий выход n -каскадного регистра сдвига при формировании обратной связи.

Главный недостаток описанной системы скремблирования состоит в том, что входные сигналы α_k определенной периодичности могут привести к таким сигналам b_k на выходе, период которых значительно короче, чем $2^n - 1$.

Для устранения указанного недостатка в скремблер и дескремблер вводятся идентичные управляющие цепи, изменяющие выходной сигнал b_k при появлении запрещенной последовательности нулей и единиц. В случае появления запрещенной импульсной последовательности в цепь обратной связи вводится импульс, способный нарушить генерацию запрещенной импульсной последовательности.

Самосинхронизирующаяся система со скремблером называется скремблером с управлением выходным сигналом. Так как сигнал

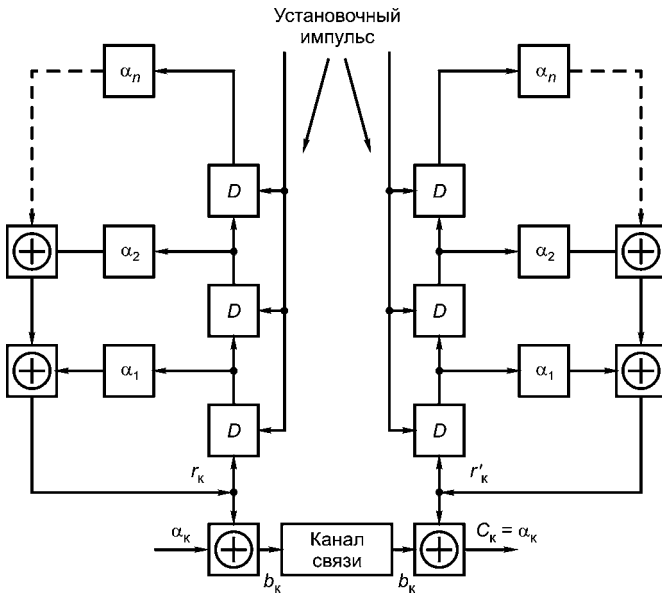


Рис. 10.14
Схема системы скремблирования с установкой

является общим для сторон передачи и приема, импульс, нарушающий генерирование запрещенной последовательности, вводится на приемном и передающем концах цепью управления скремблера и дескремблера.

Дискретная цифровая ошибка, появляющаяся в линии передачи, приводит к $m + 1$ ошибкам в скремблированном сигнале (m — число выходов регистра сдвига, используемого в обратной связи). Это является большим недостатком системы скремблирования с самосинхронизацией.

Если есть пути передачи специальной синхронизирующей информации на дескремблер, применяется система скремблирования с установкой. На рис. 10.14 представлена структурная схема системы скремблирования с установкой. Сигнал цикловой синхронизации, используемый для установки скремблера, не скремблируется на стороне передачи, а выделяется на стороне приема до дескремблера. Дескремблер будет находиться в синхронизме со скремблером столь долго, сколь долго будут в синхронизме приемник и передатчик. Скремблер с установкой не преумножает ошибки, и это его большое преимущество.

Введение избыточности в бинарный сигнал. Избыточность в бинарный сигнал вводится за счет дополнительных кодовых посылок и записывается кратко $mBnB$ — т. е. блок из m бинарных (B) посылок заменяется блоком из n бинарных посылок при $m < n$. Такие коды принято называть блочными. Из всех возможных кодов $mBnB$, испытанных на экспериментальных линиях, наиболее приспособленными с точки зрения перечисленных выше требований являются: 1B2B, 2B3B, 3B4B, 5B6B, 6B8B, 17B18B, 32B33B. Частота следования кодовых посылок в цифровом сигнале при $mBnB$ пропорциональна отношению m/n , поэтому коды 5B6B, 17B18B, 32B33B получили наибольшее распространение в первых экспериментальных разработках, когда ВОК изготавливался на основе ступенчатого оптического волокна, имеющего полосу пропускания 30...60 МГц·км.

Коды 2B3B, 3B4B, 5B6B имеют два алфавита — два соответствия между кодовыми словами mB и nB . Кодовые слова из n бинарных посылок имеют 2^n различных комбинаций импульсов, для передачи информации из них выбрано и объединено в два алфавита более чем 2^m кодовых слов. Выбор кодовых слов и их объединение проводятся в соответствии с требованием минимизации разницы между количеством нулей и единиц в линейном сигнале (минимизации текущего баланса). Выполнение этого требования обеспечивает подавление низкочастотной составляющей энергетическо-

го спектра сигнала. Кроме того, ограниченный текущий баланс позволяет осуществлять оперативный контроль ошибок в регенераторе без прерывания связи посредством проверки границ текущего разбаланса, без декодирования линейного сигнала. При коде 5В6В окончательное оборудование линейного тракта и устройство контроля ошибок имеют сложные схемы, и в настоящее время этот код не используется. Коды 2В3В и 3В4В не нашли широкого применения по этой же причине.

В кодах **17В18В** и **32В33В** кодовое слово состоит из 17 и 32 посылок скремблированного бинарного сигнала соответственно и одной добавочной посылки, позволяющей получить точное количество единиц в кодовом слове. Эти коды позволяют проводить оперативный контроль ошибок относительно простыми схемами, однако требуют установки схем стабилизации оптической мощности передатчика и схемы восстановления низкочастотной составляющей непрерывной части энергетического спектра перед решающим устройством регенератора. Коды 17В18В и 32В33В могут оказаться перспективными при реализации третичных и четверичных систем ВОСС.

Рассмотрим ряд широко применяемых кодов.

ВIF — это код, в котором кодовым посылкам исходного бинарного сигнала «0» и «1» ставятся в соответствие кодовые слова из двух посылок вида «01» и «10». Так как в каждом кодовом слове баланс нулей и единиц минимален (равен нулю), низкочастотная составляющая непрерывной части энергетического спектра сигнала подавлена, кроме того, для случайного бинарного сигнала, у которого соседние посылки независимы и вероятность появления символов равна 0,5, в энергетическом спектре отсутствуют дискретные составляющие. Таким образом, энергия сигнала содержится в непрерывной части энергетического спектра и используется для передачи информации. Поэтому применение рассматриваемого кода обеспечивает максимальную помехоустойчивость при реализации оптимального приема, что особенно важно при организации соединительных линий, когда длина участка регенерации ограничивается затуханием кабеля, а не дисперсией. Для кода ВIF используются простые схемы реализации окончательного оборудования линейного тракта, регенератора и устройства контроля ошибок. Таким образом, этот код является одним из основных для световодных систем передачи. Недостатком ВIF следует считать необходимость подключения, помимо цепи восстановления хронизирующего колебания по частоте, цепи восстановления фазы хронизирующего колебания по статистическим свойствам цифрового сигнала.

СМІ — это код, в котором кодовой посылке бинарного сигнала «0» ставится в соответствие кодовое слово 01, а «1» — попеременно кодовые слова 11 и 00. Чередование кодовых слов 11 и 00 и передача «0» кодовым словом 01 позволяют подавить низкочастотную составляющую непрерывной части энергетического спектра. Передача «0» кодовым словом 01 обеспечивает в энергетическом спектре наличие дискретной составляющей с тактовой частотой сигнала f_T . Это способствует устойчивой работе декодера на приемной стороне линейного тракта, поскольку информация о частоте и фазе хронизирующего колебания выделяется непосредственно из линейного сигнала. Кроме того, если код СМІ используется одновременно как код стыка и линии, то оконечное оборудование линейного тракта значительно упрощается, поскольку отпадает необходимость в преобразовании кода стыка в код линии и обратно.

В связи с указанными достоинствами код СМІ наиболее пригоден для соединительных линий городской сети связи при передаче цифровых сигналов вторичной и третичной систем. Помехоустойчивость регенератора примерно на 4 дБ ниже при коде СМІ, чем при коде ВІФ, но это несущественно для городской сети связи, поскольку она проектируется с учетом перспективы роста емкости соединительных линий на 15...20 лет. Поэтому при проектировании городских ВОСС делается запас по затуханию, позволяющий использовать системы следующих ступеней иерархии.

Код Миллера — это код, в котором кодовой посылке «0» бинарного сигнала ставится в соответствие кодовое слово 11 или 00, а кодовой посылке «1» — кодовое слово 01 или 10, причем последовательность нулей бинарного сигнала передается чередованием кодовых слов 11 или 00; при других комбинациях посылок бинарного сигнала первая кодовая посылка кодового слова должна быть такой же, как последняя посылка предыдущего кодового слова. Например, бинарная последовательность 01100 передается в линейном тракте последовательностью 1110011100.

В результате соседние переходы вида 10 или 01 в линейном сигнале будут находиться не ближе, чем на тактовый интервал T , и не дальше, чем на $2T$, вследствие чего основная часть энергетического спектра линейного сигнала сосредоточена в области ниже тактовой частоты f_T и низкочастотная составляющая энергетического спектра оказывается частично подавленной (составляет $1/3$ низкочастотной составляющей бинарного сигнала в формате NRZ). Контроль появления переходов с частотой выше $1/T$ позволяет весьма просто осуществлять оперативный контроль появления ошибок в регенераторе.

Приведенные описания наиболее распространенных кодов, а также анализ опыта проектирования отечественных и зарубежных систем позволяют заключить, что для вторичных систем ИКМ перспективны коды ВІФ и СМІ; для третичных и четверичных — коды СМІ и Миллера, скремблированный бинарный сигнал в формате NRZ, а для систем ИКМ более высоких ступеней иерархии — скремблированный бинарный сигнал в формате NRZ.

10.6. АНАЛОГОВЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

На рис. 10.15 представлена структурная схема аналоговой световодной системы передачи. Входной электрический сигнал $U_{вх}(t)$ поступает на модулятор, с помощью которого непрерывно изменяются во времени параметры выходного оптического сигнала излучателя. Фотоприемник преобразует свет в электрический сигнал, а демодулятор — в выходной электрический сигнал $U_{вых}(t)$.

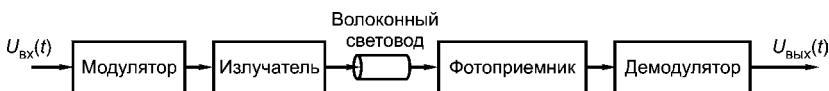


Рис. 10.15
Структурная схема аналоговой световодной системы передачи

Отличием аналоговой передачи от цифровой является необходимость обеспечения высокого отношения С/Ш на выходе фотоприемника и высокой линейности по всему тракту во избежание возможных взаимных помех от различных частотных составляющих аналогового сигнала.

Простейшим видом аналоговой модуляции является модуляция интенсивности, при которой выходная оптическая мощность излучателя возрастает или уменьшается относительно некоторого среднего значения, пропорционального величине передаваемого сигнала $U_{вх}(t)$. Основным источником излучения в такой системе является СИД, так как выходная характеристика лазера существенно нелинейна.

Использование в схемах передатчиков цепей электрической и оптической обратной связи способствует линейаризации модуляционной характеристики, а применение схем предварительной коррекции — уменьшению динамического диапазона входного сигнала. Эти методы позволяют удовлетворить требование высокой линейности передающего устройства с непосредственной модуляцией интенсивности. Для стабилизации режима передатчика,

использующего СИД, достаточно только цепи автоматической регулировки тока I_{δ} . Необходимость линеаризации отпадает, если использовать такие способы модуляции, при которых не требуется линейность системы. К ним относятся фазоимпульсная, широтно-импульсная, частотно-импульсная модуляция и метод ЧМ-поднесущей.

В зависимости от параметров сигнала $U_{\text{вх}}(t)$ и требований к системе передачи информации меняются схемные решения отдельных узлов фотоприемника. Например, в фотоприемнике может использоваться $p-i-n$ -фотодиод или ЛФД, применяться или не применяться система АРУ.

Аналоговая модуляция нашла широкое применение в волоконно-оптических системах распределения, также она используется на коротких участках волоконно-оптических систем передачи информации.

10.7. «УМНЫЕ» СОЕДИНИТЕЛИ НА ОСНОВЕ СМАРТЛИНКОВ

10.7.1. ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ СМАРТЛИНКОВ

Технология интеллектуальных многоканальных оптоволоконных соединений (ИМКС) рассматривается в работах [70, 88], эти материалы использованы при подготовке данного раздела.

Специалисты компании Intel считают, что ИМКС-технология позволит совершить очередную компьютерную революцию на пути к эре теравычислений. В начале XXI в. в электронике обострилась серьезная техническая проблема, получившая название «*тирания межсоединений*». Она актуальна и для разработчиков микросхем, и для создателей суперкомпьютеров. Все плоды миниатюризации стали «съедать» межсоединения.

Для разработчиков чипов «тирания межсоединений» заключается в том, что из последних становится все труднее и труднее выводить информацию. Так, вся монтажная поверхность кристалла любого современного процессора используется под контакты. Но для систем с сотнями миллионов транзисторов одной-двух тысяч выводов уже явно недостаточно. Фактически достигнут предел пропускной способности электрических средств ввода-вывода в микросхемах.

Аналогичная ситуация и у проектировщиков суперкомпьютеров. Количество установленных процессоров в суперкластерах достигает сотен тысяч штук. Это позволяет наращивать производи-

тельность машин, но порождает невообразимые сложности их архитектуры. Приходится соединять все больше и больше процессоров, что вызывает трудности. Развитие многопроцессорных суперкомпьютеров подошло к критическому пределу. В новейших разработках производительность пытаются повысить не столько за счет количества процессоров, сколько за счет роста их единичной мощности. В истории техники такое бывает.

Например, в середине прошлого века винтовая авиация подошла к технологическому барьеру, который не позволял достичь скорости самолетов, превышающей скорость звука. Как ни увеличивали мощность двигателей, как ни изменяли форму винта, скорость не росла. И лишь с появлением реактивного двигателя, использовавшего новый принцип создания тяги, удалось сразу достичь скорости звука, а затем и многократно ее превзойти.

Важнейшая технологическая проблема современной электроники заключается в поиске принципиально нового способа соединений, позволяющего легко выводить из микросхем десятки тысяч каналов и соединять в суперкомпьютерах миллионы процессоров. Ведущие производители фотоники уже подключились к этой гонке. Свой вклад вносит и Россия, которая запатентовала технологию ИМКС (патент Российской Федерации № 2270493), позволяющую совершить прорыв в области многоканальных оптических коммутаций.

Соединения, в которых реализуется технология ИМКС, называются «умными» соединениями, или смартлинками (от *англ.* smartlink). Создание нового способа соединения — довольно редкое явление в технике, а в фотонике особенно. Каждый новый вид соединений порождает большую группу новых устройств, использующих его. Технология ИМКС яркий тому пример. На базе «умных» соединений возможно создание электронной техники, обладающей регенеративностью и полиморфностью. С помощью смартлинков сложнейшие электронные устройства можно соединять произвольно, «как получится». Процессор, обслуживающий соединение, переключит все каналы «как надо».

Смартлинк состоит из передатчика оптошины и приемника, соединенных оптошиной, как показано на рис. 10.16, а схемы передающих соединений изображены на рис. 10.17. «Умом» смартлинка является процессор, управляющий соединением с помощью коммутатора. Основой передатчика служит VCSEL-матрица, т. е. матрица вертикально излучающих лазеров. В качестве оптошины используются оптоволоконные жгуты — обычно это тонкие трубки, в которых находятся десятки тысяч оптических волокон

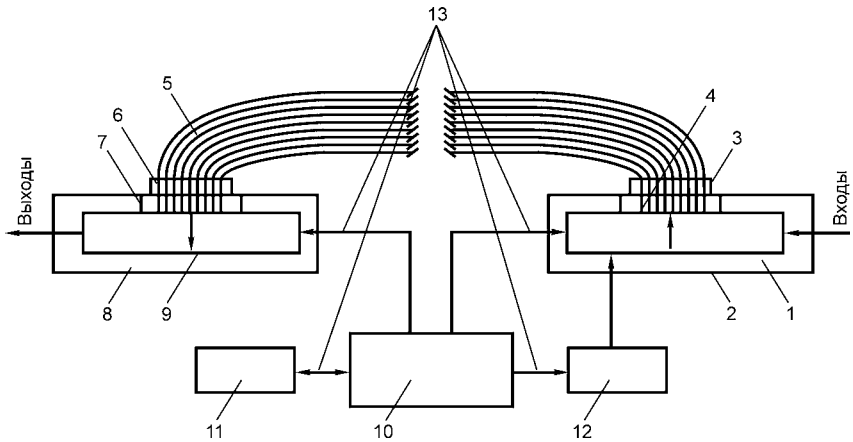


Рис. 10.16
Схема интеллектуальных
многоканальных соединителей:

1 — микросхема; 2 — источник сигналов; 3 — матрица передатчиков (светодиоды, VCSEL-лазеры); 4 — матрица входящих концов пучка проводников; 5 — пучок оптических волокон, проводников сигнала (оптошина); 6 — матрица выходящих концов пучка проводников; 7 — матрица приемников (фотодиоды); 8 — микросхема приемника сигналов; 9 — коммутатор каналов; 10 — процессор; 11 — блок памяти; 12 — система формирования тестовых сигналов каналов; 13 — шина связи.

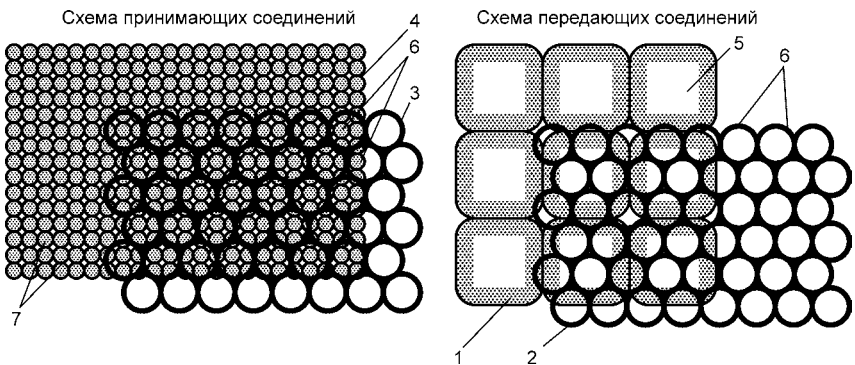


Рис. 10.17
Схемы передающих
и принимающих соединений:

1 — матрица передатчиков; 2 — матрица входящих концов пучка проводников; 3 — матрица выходящих концов пучка проводников; 4 — матрица приемников; 5 — передатчики; 6 — проводники сигнала; 7 — приемники.

диаметром от 10 до 50 мкм. На каждый канал связи может приходиться группа волокон (от 4 до 100). В одноволоконных системах огромное значение имеет числовая апертура, т. е. свойство волокна собирать лучи света. В волокне могут распространяться только те лучи, которые инжектируются в него под углами больше критического.

В пучке одномодовых волокон апертура не имеет особого значения. Вследствие избыточности свет передается по жгуту при любых смещениях, но должны совпадать рабочие области матриц и жгута. Это хорошо видно на рис. 10.18. Приемником информации в смартлинках является матрица фотодиодов с прямым доступом. Чтобы устройство работало, фотодиодов должно быть больше, чем лазеров в передающей матрице. Работает смартлинк следующим образом. На входы VCSEL-матрицы, расположенной в микросхеме — источнике информации, подают электрические импульсы, которые модулируют излучение лазеров. Это излучение по оптошине поступает к матрице фотодиодов, расположенной в приемнике информации, и преобразуется в поток электрических импульсов. Каждый фотодиод подключен к управляемому процессором коммутатору. При соединении оптошины к матрицам передатчика и приемника подключают «как получится», совмещая лишь оптические области матриц и оптошины. Поэтому на входы матрицы-приемника сигналы от лазеров поступают беспорядочно. Чтобы получить нужный порядок подключения шины, в начале работы устройства с матрицей передатчика соединяется процессор, который по особой процедуре распознает каналы. С помощью коммутатора распознанные каналы связи переподключаются на выход коммутатора в заданном порядке. Неработоспособные и дублирующие каналы отключаются. Важно, что процедура распознавания каналов и переподключения выполняется однократно

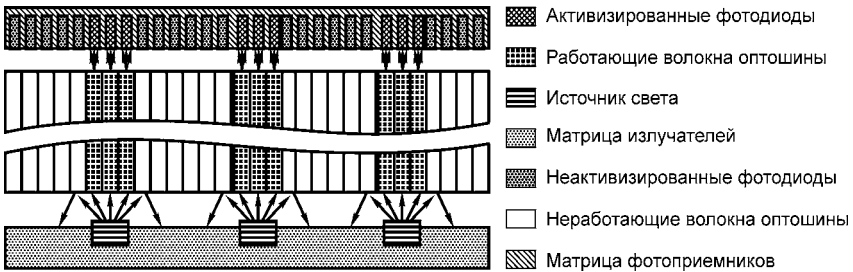


Рис. 10.18
Схема прохождения лучей света в ИМКС

и никак не влияет на скорость передачи информации в дальнейшем. Если работа смартлинки нарушается, он может повторно запустить распознавание каналов. Таким образом реализуется самовосстановление, или регенерация. Если в ходе работы потребуются изменить порядок подключения шины, процессор с помощью коммутатора может сделать это очень быстро. Так реализуется полиморфность.

Смартлинки решают проблему «тирании соединений» в микроэлектронике. Они позволяют выводить из кристаллов десятки тысяч высокоскоростных оптоволоконных линий связи. В силу компактности при большом числе каналов смартлинки будут лидерами по скорости передачи информации. Например, используя всего лишь 64-лазерную VCSEL-матрицу с частотой модуляции лазеров до 20 Гбит/с, можно получить смартлинк с оптошиной диаметром 1 мм, обладающий фантастической производительностью — 1,28 Тбит/с. Благодаря этим преимуществам технология ИМКС должна оказать большое влияние на развитие суперкомпьютеров и дать сильнейший импульс развитию биокибернетики.

Отечественные разработки систем с оптическими связями начаты в 1980-х гг. Активные исследования в этой области продолжаются и сейчас. Разрабатываются технологии оптических канальных волноводов на печатных платах и непосредственно на кремниевых пластинах. Но реальное применение в суперкомпьютерах нашли только многоканальные оптоволоконные кабели. Несмотря на попытки миниатюризации, разъемы таких кабелей по размерам и цене многократно уступают разъемам обычных электрических соединений. Разработка печатных плат с оптическими связями между микросхемами пока еще сопряжена с большими трудностями. Например, в печатных платах IBM используются многомодовые полимерные волноводы сечением 50×50 мкм с затуханием 0,05 дБ/см. При этом лучи света распространяются в плоскости платы, а приемники и передатчики расположены вне платы, но их приемные поверхности параллельны плоскости платы. Поэтому возникает необходимость поворота на 90° либо луча, либо передатчиков и фотодетекторов. При этом необходимость точной юстировки элементов ужесточает требования к технологическим допускам до невыполнимых. Проблемы можно решить с помощью новых способов монтажа, которые адаптивно компенсируют технологические допуски и температурные деформации. Компания IBM разрабатывает такие технологии.

Компания Intel планирует реализовать технологию кремниевой фотоники, разместив все необходимые элементы на одной

кремниевой пластине. При этом мегамикросхема будет содержать: лазерные матрицы, модуляторы потока фотонов, оптические волноводы, мультиплексоры для объединения или разделения световых сигналов, демодуляторы потоков фотонов, электронные схемы управления компонентами, корпуса с оптическими соединениями. В Photonics Technology Lab уже доказано, что все компоненты фотоники можно производить на базе имеющихся у корпорации кремниевых технологий. Созданы модуляторы и демодуляторы, работающие с рекордной скоростью 40 Гбит/с. Исследователи перешли от стадии научных и технологических разработок к этапу создания коммерческой продукции. Выдающиеся достижения Intel отмечены престижным изданием Nature. В 2007 г. корпорация была удостоена награды EE Times ACE Award за самую перспективную новую технологию в области соединителей.

В России аналогичные исследования ведутся в рамках ФЦП «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники на 2008–2015 гг.». В частности, с 2008 г. ведется научное исследование, «направленное на реализацию технических характеристик трехмерных оптикоэлектронных гибридных микросхем (3D ОЭ ГИМС)», в которых должно быть от двух до восьми монтируемых интегральных матриц и от 128 до 512 оптических каналов ввода-вывода информации.

Следует особо отметить, что в проектировании сложных многоядерных электронных приборов смартлинки представляются перспективной альтернативой печатным платам. Причем не только платам с оптическими связями, но и обычным многослойным печатным платам с электрической разводкой. Приемные и излучающие матрицы смартлинков либо встраивают в кристалл гибридными методами, либо формируют непосредственно на пластине, как это делает корпорация Intel. Для соединения отдельных блоков микросхем используют внешние смартлинки, которые могут располагаться «как угодно» вне кристалла. Такой тип монтажа обеспечивает очень высокую гибкость соединений и простоту их осуществления. Самое главное — не нужна точность и не требуется юстировка. Достаточно просто совместить матрицы с оптошинами, об остальном позаботится процессор. Автоматы, подобные сборочным машинам для комплектации печатных плат, быстро вставляют оптошины в оптические разъемы. Смартлинки могут применяться как для межкристалльных, так и для межплатных соединений.

Смартлинки похожи на одноволоконные оптические соединения в микросхемах, которые критикуют за низкую надежность

монтажа и невозможность производства групповыми методами, широко используемыми при выпуске полупроводниковых ИМС. Но, в отличие от этих соединений, смартлинки не требуют юстировки, способны к регенерации и обладают полиморфизмом. Более того, они создают не один, а сразу десятки и сотни оптоволоконных каналов связи, что при производительности 20...40 Гбайт на канал открывает перспективу получения соединений терабайтной производительности. А это качественно иной уровень соединений функциональных ядер многопроцессорных систем для суперкомпьютеров.

Смартлинки весьма эффективны для однонаправленных интерфейсов, перспективность которых подтверждается эволюцией. Как известно, все биологические вычислительные системы построены на однонаправленных интерфейсах. Например, все связи нейронов в мозге однонаправленные. Синапсы поставляют информацию в нейроны, а аксоны направляют импульсы в другие нейроструктуры. Все живые существа воспринимают информацию органами чувств, а передают ее другими органами, с помощью звуков или жестов. Ничего эффективнее природа не придумала. Поэтому и перспективные вычислительные системы, видимо, нужно создавать на однонаправленных интерфейсах.

Схемы ввода-вывода, которые можно использовать в микросхемах с использованием технологии ИМКС, представлены на рис. 10.19. Это параллельные, разветвляющиеся и сходящиеся, одно- и многоматричные комбинации, пригодные для построения древовидных, матричных, сетевых и иных по архитектуре соединений. Из них можно создавать параллельные и последовательные шины, нейронные сети и матрицы, а главное — необыкновенно гибкие и высокопроизводительные древовидные структуры ввода-вывода. Идеи создания subsystem на целых пластинах известны давно. Но они длительное время не реализовывались. Вначале была низка вероятность выхода годных. Затем развитию технологии препятствовала проблема межсоединений. Использование смартлинков позволяет достичь впечатляющих результатов в этой области. Например, на пластине диаметром 305 мм можно сформировать массив из десятков или даже сотен процессоров, связанных с матрицами смартлинков. Передающие матрицы в пластине можно сформировать непосредственно на материале самой пластины, используя современные технологии светоизлучающего кремния, а можно интегрировать отдельно изготовленные массивы с помощью гибридных технологий. В таком блоке процессоров все межпроцессорные связи осуществляются с помощью небольших

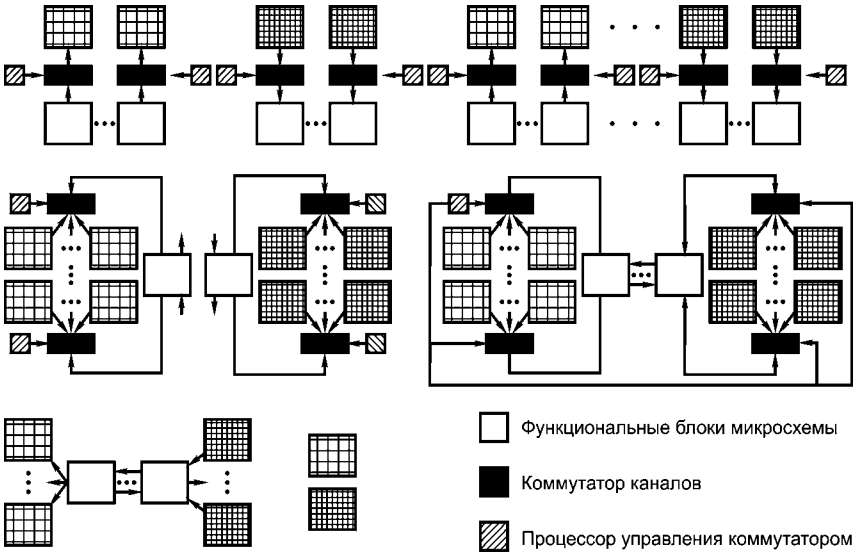


Рис. 10.19
 Примеры комбинации элементов смартлинков в микросхемах с оптическим вводом-выводом информации

внешних оптошин. При этом можно реализовать самые разнообразные архитектурные варианты построения вычислительных систем. Соединение процессоров оптошинами легко поддается автоматизации с помощью сборочных машин. При необходимости разработанное изделие можно залить полимерным фиксатором.

Если удастся создать термостойкие гибридные пластины, то их не придется скрайбировать и разделять на кристаллы, а можно будет целиком приклеивать по две к охлаждающим поверхностям несущих плат. Получатся двухсторонние многоядерные охлаждаемые платы. При производстве таких плат не потребуется корпусирование кристаллов, не нужны будут промежуточные печатные платы и пайки. Тем самым существенно удешевится производство суперкомпьютеров и значительно уменьшатся их размеры. Для охлаждения процессоров и матриц в платах можно будет использовать фреоновое холодильное оборудование, которое позволит в несколько раз повысить допустимую тепловую нагрузку на кристаллы. Матрицы смартлинков можно встраивать и в гигавентильные ПЛИСы, и в большие системы на кристалле. Тогда для их соединения тоже не потребуются сложные платы. Таким образом, смартлинки могут быть эффективнее двумерных печатных плат с оптическими связями.

10.7.2. САМОФОРМИРУЮЩИЕСЯ КОМПЬЮТЕРЫ

Смартлинки пригодны для автоматизированной сборки. Тем самым они открывают перспективное направление в создании самоформирующихся компьютеров (СФК). Компьютеры-роботы, оснащенные манипуляторами, могут строить себя сами. Человеческая рука не будет прикасаться к «железу».

При поломке компьютер сам найдет и заменит неисправную плату. В СФК манипуляторами управляет формирующий блок, как показано на рис. 10.20. Межстоечный манипулятор извлекает из библиотеки плату и, переместившись к нужной стойке, передает ее стоечному манипулятору. Аналогично передаются и оптические шины. Получив плату и набор шин, стоечный манипулятор устанавливает плату в стойку и соединяет ее с другими платами. При этом система охлаждения платы автоматически соединяется с системой охлаждения СФК. Соединение стоек между собой осуществляется межстоечным манипулятором с помощью других оптошин. Эти шины могут прокладываться по всему свободному объему СФК по принципу «как получится».

Так как этот процесс полностью автоматический, постоянный доступ операторов в межстоечное пространство не требуется. Таким образом, используя формирующий блок, управляющий мани-

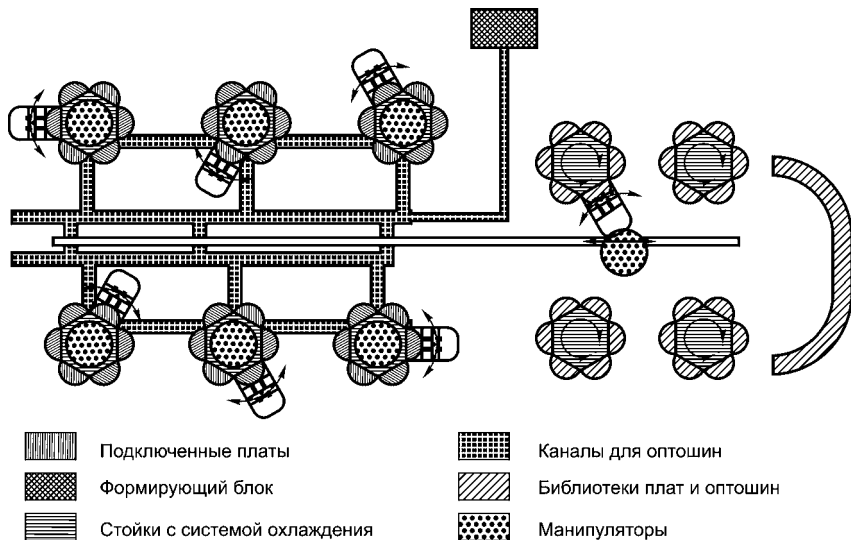


Рис. 10.20
Схема самоформирующегося компьютера

пуляторами, суперкомпьютер осуществляет самоформирование по заданной программе. Уникальная гибкость СФК обеспечивает идеологию соединений «любой с любым нужным». При этом могут реализовываться магистрали, шины, локальные и общие сети, массивы, расширяющиеся и сходящиеся древовидные структуры. Связи могут быть как постоянными, так и временными. Динамичная архитектура соединений СФК может подчиняться логике полиморфности, т. е. непрерывно изменяться в ходе работы, приспосабливаясь к решению конкретных задач. Включение манипуляторов и библиотек элементов в состав компьютеров придает им совершенно новые качества — делает их исключительно устойчивыми к внешним воздействиям, обеспечивает им возможность саморазвития, самосовершенствования и даже начальной эволюции, так что они начнут сами для себя разрабатывать новые микросхемы. Программа сможет влиять на архитектуру, а архитектура — на программу! Такая связь открывает колоссальные возможности для развития и самосовершенствования компьютерной техники.

10.7.3. ОПТОВОЛОКОННЫЕ НЕЙРОИНТЕРФЕЙСЫ

Смартлинки как нельзя лучше подходят для создания нейроэлектронных интерфейсов. Нервы высокоорганизованных живых существ состоят из множества передающих волокон. В берцовом нерве человека более 50 тысяч нервных волокон, а в спинном мозге (весьма условно) — до десяти миллионов! Смартлинки позволяют соединить десятки и сотни тысяч каналов одним разъемом, который может иметь сечения, совпадающие с сечением нервов. Нейроэлектронный оптоволоконный интерфейс для передачи информации в мозг (патент РФ № 2327202) представляет собой пучок оптических аксонов в единой оболочке. После вживления имплантата оптоаксоны распределяются в нейроструктуре. При соответствующей тренировке нейроны будут образовывать с оптоаксонами синаптические связи так же, как это происходит, когда люди получают новые навыки.

Схема устройства оптоаксона представлена на рис. 10.21. Основным элементом оптоаксона является световод диаметром 5...10 мкм. На его торце размещена наноструктура, содержащая миниатюрный фотоэлемент и разрядник, покрытые слоем резистивного вещества, а затем слоем диэлектрика толщиной 5...10 нм. Световой импульс от передающей матрицы смартлинки проходит через световод и, попадая на фотоактивное вещество (например, аморфный кремний), преобразуется в электрический импульс, заряжая

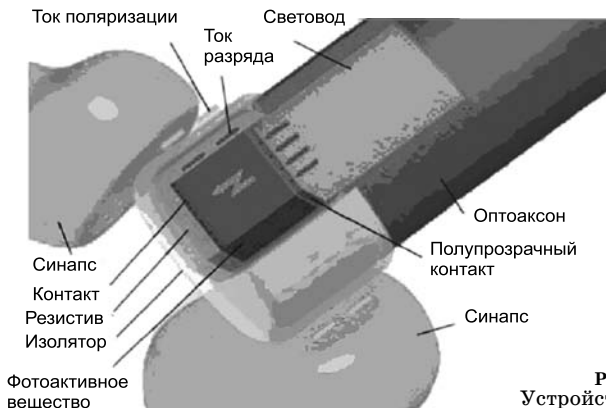


Рис. 10.21
Устройство оптоаксона

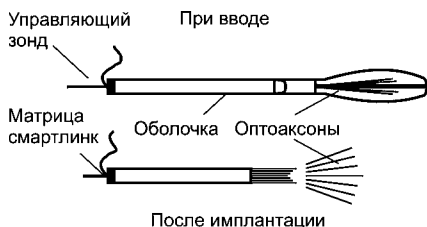


Рис. 10.22
Устройство нейроинтерфейса

наноструктуру до определенного потенциала. Возникший переносный внеклеточный потенциал через слой диэлектрика и межклеточную жидкость действует на мембраны синапсов нейронов, поляризуя их. Это заставляет открываться и закрываться ионные каналы, управляемые чувствительными к электрическому полю белками, — так реализуется принцип поляризационной связи. После окончания действия светового импульса наноструктура разряжается через область резистивного вещества. Оптоволоконные нейроинтерфейсы могут использоваться при протезировании органов зрения и слуха, реабилитации парализованных больных, лечении серьезных психических заболеваний.

Для передачи информации из мозга в электронные структуры разработаны принимающие нейроинтерфейсы (патент РФ № 2333526, <http://www.fips.ru/russite>). В них по оптоволоконным световодам свет передается к нейронной структуре, модулируется в зависимости от активности ближайшего нейрона и отражается обратно — в комбинированную матрицу, где преобразуется в электрическую форму, как можно видеть на рис. 10.22. Нейроинтерфейсы могут использоваться для управления протезами и технологическими средствами, транспортом и оружием. На их осно-

ве будут созданы удобные и невидимые технические средства связи и управления. С внедрением имплантируемой электроники качество жизни людей повысится более значительно, чем за счет телевидения и Интернета. Нейроинтерфейсы позволят сочетать уникальный феномен мышления людей с мощностью и скоростью электронных машин. Глобальные информационные сети постепенно превратятся в гигантские мыслящие биоэлектронные нейросети, обладающие таким мощным интеллектом, который сейчас трудно даже представить. Мировой рынок имплантируемой электроники только формируется. Но емкость его очень быстро достигнет миллиардов долларов.

Все преимущества смартлинков и технологии ИМКС базируются прежде всего на аппаратной избыточности, а это своего рода недостаток. Для реализации ИМКС необходимо избыточное количество оптических волокон, избыточное количество фотоприемников, нужны коммутаторы и процессоры. Все эти компоненты займут на кристалле место межсоединений. Тем не менее миниатюризация элементов микросхем, освоившая нанометровый диапазон, продолжается. Она быстро сведет аппаратную избыточность к минимуму, а преимущества умных соединений останутся! Чтобы научиться создавать нейроинтерфейсы, имплантируемую электронику и, в конечном итоге, киборги, нужно освоить надежные многоканальные соединения с десятками и сотнями тысяч связей. Первым шагом в решении этой проблемы стала разработка технологии ИМКС. Возможно, появятся другие технологии. А пока их нет, нужно разрабатывать то, что есть. Так что выбор невелик. Сама природа за миллиарды лет эволюции не придумала ничего лучше избыточности. Избыточность смартлинков — необходимая, но не очень высокая плата за надежность, полиморфность, регенеративность и, самое главное, высокую плотность оптических соединений, не достижимую никакими другими средствами.

10.8. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СЕТЕЙ ДОСТУПА

10.8.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Сеть доступа (последняя или первая миля) — это участок сети связи между точкой присутствия (POP), или узлом транспортной сети оператора, и абонентами. Термин «первая миля» соответствует первым стандартам. Он подчеркивает значимость оптических проводных сетей доступа.

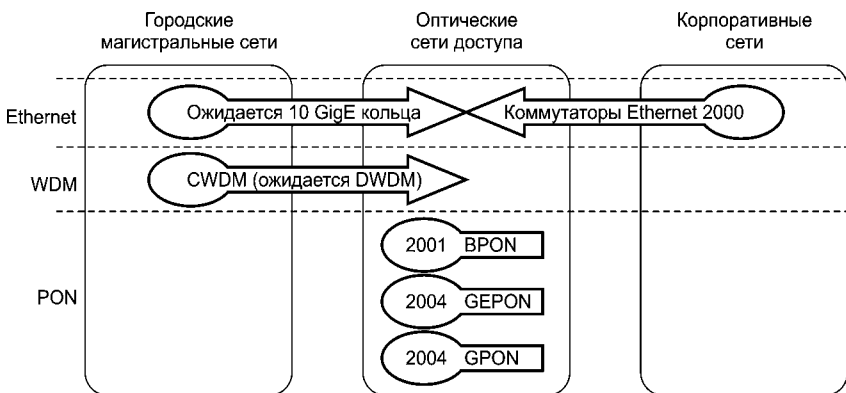


Рис. 10.23

Проникновение волоконно-оптических технологий в сети доступа

Оптические проводные сети доступа — наиболее затратное звено ВОСП, так как при их строительстве нужно создавать всю волоконно-оптическую инфраструктуру. Высокие начальные затраты были определенным препятствием в создании таких сетей в России. В результате рынок сетей доступа стал осваиваться только в начале третьего тысячелетия. Так, оптический Ethernet пришел на сети доступа после корпоративных и городских (CWDM) сетей как один из вариантов пассивных оптических сетей (PON), как показано на рис. 10.23. Что заставляет сегодня развиваться рынок оптических сетей доступа (ОСД) и как он развивается?

В разделе 10.8 использованы данные, опубликованные в литературе [69].

10.8.2. ТЕНДЕНЦИИ МИРОВОГО РАЗВИТИЯ СЕТЕЙ ДОСТУПА

В настоящее время отмечаются следующие тенденции развития сетей доступа:

- сокращение долгосрочных инвестиций в сети передачи широкополосного (ШП) цифрового трафика на основе витых пар и коаксиального кабеля. Стремление довести оптический кабель (ВОК) до абонентов;
- уменьшение доли беспроводного фиксированного ШП-доступа (10...100 Мбит/с).

Основанием для развития сетей ШП-доступа является необходимость:

- создания новой проводной среды передачи в распределительных сетях со сроком службы 25...30 лет;
- создания среды передачи более широкополосной, чем медная, для повышения качества и расширения спектра услуг;
- перехода на стандарты телевидения высокой четкости (HDTV) в телевещании;
- замены ТВ-приемников LCD и плазменными панелями, готовыми к приему HDTV;
- внедрения домашних медиацентров, совмещающих функции DVD, игровой приставки, музыкального центра и устройства для доступа в Интернет;
- поддержки интернет-видеотелефонии и формирование групп ее пользователей;
- поддержки интерактивных видеомостов — важного элемента сетей в сфере дистанционного образования, видеомедицины, дистанционного оказания услуг;
- реализации услуги «видео по требованию» (VoD).

Итак, стимулом развития ШП-сетей (> 10 Мбит/с на абонента) на основе ВОК является комплекс услуг triple-play на основе видео: видеотелефония, видеоданные/видеоинформация и видео по требованию.

По стоимости создания и обслуживания система ВОК становится сравнимой с системой на витых парах либо коаксиальном кабеле или даже обходится дешевле (например, ВОК на 8 волокон стоит менее 700 долл./км).

Контент с видеоносителя (DVD, VCD) по качеству значительно превосходит видеоконтент, принятый из эфира или обычной сети КТВ (раньше VHS-кассеты давали худшее качество, чем эфир и тем более КТВ). Качество цифрового контента зависит только от скорости передачи (DVD требует скорости 8...10 Мбит/с, HDTV — от 20 Мбит/с или 10 Мбит/с для MPEG-4) и стимулирует развитие ШП-сетей.

Рядовые пользователи требуют с каждым годом все большей полосы. Раньше ШП-сети строились главным образом для бизнесменов, сегодня — для рядового пользователя (бизнесмену нужны текст и графическая информация, рядовому пользователю — цифровые видеопотоки).

Проводные операторы, развивающие современные сети доступа, уже не стремятся стать поставщиками всего спектра услуг, а осуществляют лишь подключение с возможностью предоставления абонентам мультисервисного трафика от сервисных операторов.

10.8.3. ТЕХНОЛОГИИ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ДОСТУПА

Основными технологиями ОСД являются: Metro-Ethernet, EFM P2P, EFM P2MP (GEAPON), BPON, GPON и Metro CWDM. Характеристики некоторых из них представлены в табл. 10.1. Структуры основных технологий оптических сетей доступа приведены на рис. 10.24.

Metro-Ethernet. Коммутаторы Ethernet позволяют построить древовидную архитектуру с активными узлами — коммутаторами с иерархией по скорости от центрального узла к абонентам дали тест 1000/100 Мбит/с (1000Base-LX, 100Base-FX) и агрегировани-

Таблица 10.1

Сравнительный анализ трех технологий PON

Характеристики	APON/BPON	EPON (GEAPON)	GPON
Стандарт	ITU-T G.983.x (1998–2003)	IEEE 802.3ah (2004)	ITU-T G.984.x (2003–04)
Базовый протокол	ATM	Ethernet	GFP
Скорость передачи, прямой/обратный поток, Мбит/с	622/622; 622/155; 155/155	1000/1000	2488/1244; 2488/622; 1244/1244; 1244/622
Линейный код	NRZ	8B/10B	NRZ
Бюджет мощности на длине волны 1310 нм, дБ	5...20 (класс А); 10...25 (класс В); 15...30 (класс С)	5...19,5 (1000BASE-PX-10); 10...23,5 (1000BASE-PX-20)	5...20 (класс А); 10...25 (класс В); 15...30 (класс С)
Число абонентских узлов на волокно	До 32	До 32 (64)	До 32, 64 (128)
Типы приложений	Любые	IP, потоки данных	Любые
Коррекция ошибок типа FEC	Допускается	Есть	Есть
Длины волн прямого/обратного потоков, нм	1590/1310; 1490/1310	1490/1310	1490/1310
Динамическое рас- пределение полосы	Есть	На верхних уровнях	Есть
IP-фрагментация	Есть	Нет	Есть
Защита данных (шифрование)	(С открытыми ключами)	Есть	(С открытыми ключами)
Резервирование	Есть	Есть	Есть
Поддержка голосо- вых приложений и QoS	Высокая	Средняя	Высокая

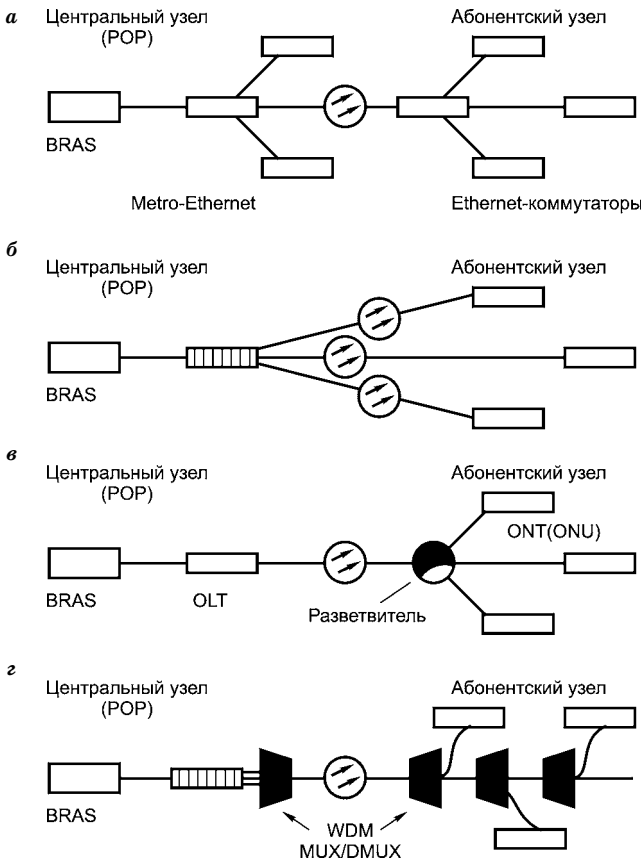


Рис. 10.24

Основные технологии в оптических сетях доступа:

а — Metro-Ethernet (дерево с активными узлами); *б* — EFMF P2P («точка–точка»); *в* — GEAPON/BPON/GPON («дерево с пассивным оптическим разветвлением»); *з* — Metro CWDM.

ем трафика (с возможным резервированием трафика, как показано на рис. 10.24а). В перспективе можно использовать стандарт 10Gigabit Ethernet (10GE), который сегодня вышел на уровень городских магистральных сетей. Такую архитектуру часто имеют ОСД типа «домовых» сетей, охватывающие до нескольких десятков домов.

EFMF P2P. Двухнаправленная (дуплексная) передача Ethernet по одному волокну P2P («точка–точка», представленная на рис. 10.24б), долгое время оставалась частным решением отдельных компаний,

поставляющих на рынок медиаконвертеры Ethernet. В 2004 г. она была окончательно оформлена как один из стандартов IEEE 802.3ah, а в 2005 г. включена в общий стандарт 802.3. Двухнаправленная передача по одному волокну осуществляется на разных длинах волн: 1490/1550 нм — в одном направлении и 1310 нм — в другом. При этом мультиплексоры WDM встроены в приемопередающие модули. Имеется два стандартных решения на скорости 100 и 1000 Мбит/с. Стандартизация ликвидировала монополию отдельных компаний и привела к значительному снижению стоимости оптических компонентов.

Дуплексная передача по одному волокну вдвое сокращает число волокон и позволяет построить более экономичную кабельную систему. Типовым здесь является решение, при котором в центральном узле устанавливается коммутатор с двумя uplink-портами GE и 24 оптическими портами FE для дуплексной передачи по одному волокну, а у абонента устанавливается медиаконвертер FE «оптика — витая пара».

EFM P2MP (GEPON). Другое стандартное решение в рамках IEEE 802.3ah — это Ethernet на PON первой мили (EFMP). При древовидной архитектуре PON центральное устройство по одному волокну взаимодействует со множеством абонентских устройств P2MP («точка-многоточка»), как показано на рис. 10.24в. Этот стандарт получил название GPON (гигабитный Ethernet PON, или EPON). Оптические интерфейсы для GPON аналогичны тем, что используются в оптических сетях. Как и в стандарте GE, линейная скорость в стандарте GPON составляет 1250 Мбит/с с учетом схемы кодирования 8B/10B. GPON определяется как одноволоконная сеть, использующая мультиплексирование WDM на длинах волн 1490 нм (прямой поток) и 1310 нм (обратный поток). Окно 1550 нм резервируется для добавления услуги аналогового телевидения. Физический уровень GPON PMD (Physical Medium Dependent) предусматривает два класса интерфейсов: класс 1 для расстояний до 10 км (коэффициент деления потока 1 : 16) и класс 2 — для расстояний до 20 км (коэффициент деления 1 : 16). Это позволяет строить сети PON оптимальной стоимости с широким выбором расстояний и коэффициентов деления.

BPON. В силу достоинств PON с середины 1990-х гг. стали разрабатываться стандарты, основанные на использовании этой технологии совместно с другими, в частности доминирующей в то время технологией ATM. (Этим занимается, например, группа FSAN — группа операторов сети доступа с полным набором услуг (1997).) Так появилась серия стандартов PON G.983.x. на основе

протокола ATM (1998). Сначала это APON (ATM PON) со скоростью 155 Мбит/с для прямого и обратного потоков, которая позже увеличивается до 622 Мбит/с. Затем появляется термин «широкополосный PON (BPON)», отражающий факт предоставления ШП-услуг, включая Ethernet, видеослужбы и др. BPON регламентирует введение дополнительных длин волн в рамках одного дерева PON, а также методы и топологии резервирования дерева PON для повышения надежности.

Использование протокола ATM в стандарте BPON гарантирует качество услуг связи QoS для абонентов, обеспечивая надежную передачу TDM-трафика, в частности каналов E1.

GPon. В 2001 г. группа FSAN инициировала стандартизацию новой архитектуры PON, работающей на скоростях, превышающих 1 Гбит/с. Стандарт BPON пересмотрен для оптимизации гигабитных скоростей и повышения эффективности поддержки мультисервисных приложений, системы управления и масштабируемости. Новый стандарт получил название «гигабитный PON (GPON)».

Metro CWDM. Решения на основе разреженных систем WDM (CWDM) позволяют внутри одноволоконного дерева организовать множество соединений «точка–точка». В центральном узле помещается мультиплексор, объединяющий все длины волн, а в промежуточных точках устанавливаются оптические мультиплексоры ввода-вывода (OADM) с малым числом длин волн (обычно с одной), как можно видеть на рис. 10.24г. Допускается кольцевая топология, обеспечивающая резервирование. В рамках CWDM можно использовать 18 длин волн (1270...1610 нм с шагом 20 нм, ITU-T G.694.2).

10.8.4. КАТЕГОРИИ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ДОСТУПА

Можно выделить четыре категории ОСД.

FTTBusiness — волокно к бизнес-абоненту. Это решение предназначено для подключения офисов, предприятий, банков, торговых и бизнес-центров. Поскольку бизнес-абоненты наиболее требовательны к качеству услуг, FTTBusiness должен отличаться высокой надежностью, функциональностью и гибкостью управления. Решение FTTBusiness включает два основных типа услуг — традиционные телефонные услуги (подключение УАТС абонента к ТфОП) и сеть IP (для организации виртуальных сетей, подключения к Интернету, IP-телефонии и т. п.). Тип подключения УАТС (число каналов E1 или число и полоса IP-каналов) выбирается в зависимости от требований абонентов и возможностей операторов.

FTTH/FTTP — волокно к дому, т. е. волокно, доходящее до отдельного дома, коттеджа или квартиры в многоквартирном доме.

FTTB — волокно к зданию или многоквартирному дому. В этом решении достигается компромисс между экономичностью и эффективностью, учитывая, что волокно до квартиры — дорогое решение. Возникает проблема точки терминирования ВОК. Если терминировать ВОК на большом удалении от дома, то где размещать активное устройство для подключения абонентов или узел MDU (узел, обслуживающий квартал жилых домов)? Нужно учитывать, что сам узел требует подводки питания, а от него до квартир нужно развести витые пары. Кроме того, MDU сопрягает оптические и электрические интерфейсы. В узле можно использовать устройство PON-MDU или коммутатор Ethernet с оптическими uplink-интерфейсами. Аппаратура узла помещается в бронированную вандалозащищенную будку.

Волокно к сельскому району — категория сетей доступа, которую необходимо включить в рассмотрение при обустройстве сети в России, учитывая протяженность территории и низкую плотность сельского населения. В табл. 10.2 приведены данные о применимости тех или иных услуг и технологий для трех категорий ОСД.

Таблица 10.2

Охват сетями доступа услуг и технологий

	FTTH	FTTB _{Business}	FTTB
У с л у г и			
Телефония, E1	—	+	—
Телефония, VoIP, FXS	+	+	+
Интернет	+	+	+
Аналоговое видео	+	—	+
Видео поверх IP, VoIP	+	—	+
«Видео по требованию», VoD	+	—	+
Видеонаблюдение	+	—	+
Видеоконференцсвязь	+	+	—
Т е х н о л о г и и			
Metro-Ethernet	—	+	+
EFM P2P	+	+	+
EFM P2MP (GEPON)	+	—	+
BPON	—	+	+
GPON	+	+	+
Metro CWDM/DWDM	—	—	+

10.8.5. ВОЛОКНО ДО БИЗНЕСА — FTTBUSINESS

Строительство таких сетей началось с середины 1990-х гг. В основном по оптике подключался малый и средний бизнес. Главное требование к этим сетям — наличие каналов E1 для организации телефонии и передачи данных в канале с гарантированной полосой пропускания. Трафик в канале симметричный и сбалансированный.

Кроме гарантии полосы пропускания, требуется надежность, конфиденциальность связи и обеспечение ряда индивидуальных услуг, например организация выделенных каналов между офисами компании, каналов, использующих интерфейсы/протоколы V.35, X.21, Frame Relay — для подключения к банковским службам и т. п. Технологии доступа — SDH, PDH, Ethernet по оптике, PON (BPON, GPON). Что касается EPON, то для FTTBusiness рекомендуется тщательно выбирать производителей оборудования, способных обеспечить высокую доступность, необходимое качество каналов и гарантированную полосу под трафик данных. Тенденция в решениях FTTBusiness — универсализация трафика: необходим качественный, гарантированный IP-трафик.

10.8.6. ВОЛОКНО ДО ДОМА — FTTH

Решения FTTH на основе технологии PON иллюстрируют рис. 10.25–10.26. В первом случае показана разводка от центрального узла до абонентских узлов, во втором — разводка по коттеджу или квартире. Расстояние от узла доступа до абонента составляет

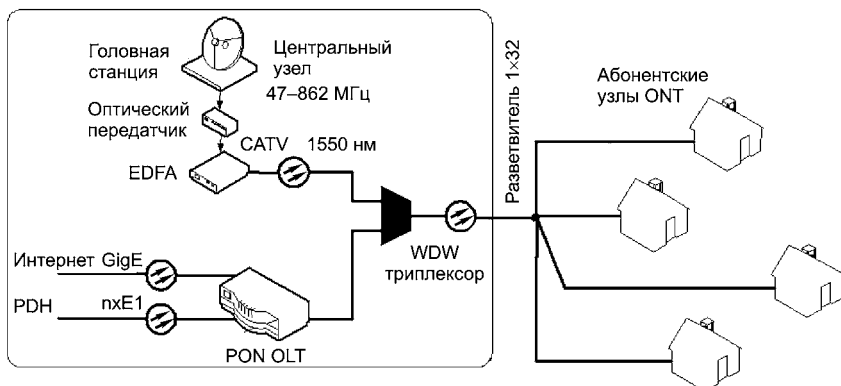


Рис. 10.25
Решение FTTH на основе технологии PON. Центральный узел

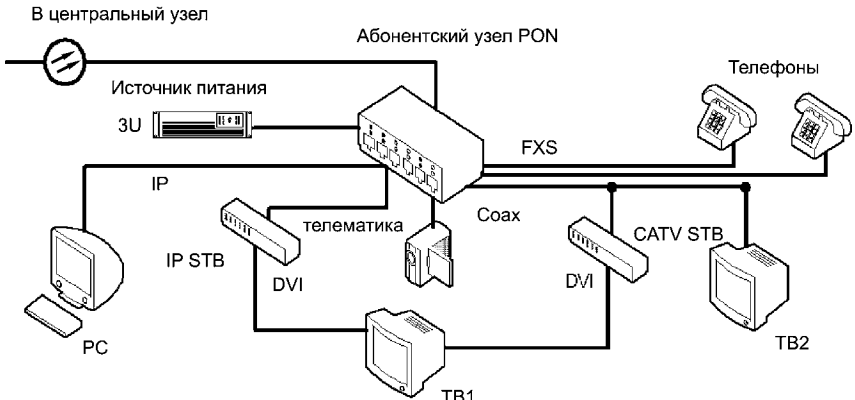


Рис. 10.26

Решение FTTH на основе технологии PON. Разводка по коттеджу или квартире

Таблица 10.3

Условия работы и потребности в услугах СД

Параметры/особенности	Городской микрорайон	Коттеджный поселок
Наличие кабельной инфраструктуры	Коаксиальный кабель (КТВ), телефонная витая пара	Кабельные коммуникации могут отсутствовать
Диаметр сети, км	2...5	До 1
Платежеспособность абонента	Низкая	Средняя/высокая
Потребность в базовых сетевых услугах (CATV, Интернет, телефония)	Низкая/средняя/высокая	Высокая
Потребность в системах видеонаблюдения и пожарно-охранной сигнализации	Низкая/средняя	Высокая
Число абонентов	1000...2000 квартир, 50...100 многоквартирных домов	50...200 коттеджей

от нескольких сотен метров (в коттеджной застройке) до ста метров (в многоэтажных домах). Это означает, что решаются проблемы не последней мили, а проблемы последней сотни метров.

Условия работы и потребности в услугах СД городского микрорайона и коттеджного поселка приведены в табл. 10.3. Эти данные рекомендуется использовать при выборе сетевого решения. Перспективы широкого применения сетей FTTH обусловлены их достоинствами.

Преимущества сетей FTTH:

- **Высокая полоса пропускания.** Это основное преимущество FTTH. Современные требования к полосе пропускания: в нисходящем (к абонентам) потоке 20...50 Мбит/с, в восходящем — более 10 Мбит/с. Следует отметить, что полоса 50 Мбит/с соответствует двум потокам HDTV. При широком распространении HDTV-вещания в будущем следует рассчитывать, что каждая семья будет потреблять одновременно до двух потоков видео.
- **Конфиденциальность.** Поставить «жучок» на оптоволокно практически невозможно. А если еще учесть, что оптический сигнал предварительно скремблируется таким, например, протоколом, как GPON, то возможность прослушивания практически исключается.
- **Повышенная надежность.** ВОК, в отличие от медных кабелей, не подвержен коррозии в местах сварки, а кроссовые порты не окисляются, не реагируют на влажность (как в уличных кроссах для медных кабелей) и характеризуются абсолютным отсутствием перекрестных помех (cross-talk).
- **Небольшое число активных элементов.** В технологии GPON, например, одно центральное устройство PON OLT может обслужить до 1...2 тыс. абонентов в радиусе 20 км. Одна стойка может вместить до четырех OLT. Таким образом, узел доступа, состоящий из двух стоек, может обслужить до 16 тыс. абонентов в этом радиусе, скажем, район Подмосковья, в котором 50...100 коттеджных поселков. Все остальные узлы ветвления исключительно пассивные и могут выглядеть как необслуживаемые уличные кроссовые шкафы или муфты.
- **Клиентское оборудование.** Оператор может иметь точку демаркации своей зоны ответственности в виде порта на оптической панели в доме абонента. Обслуживание абонентского оборудования может осуществляться сервисными центрами, как для ADSL и кабельных модемов. Такие топология и организация сети доступа существенно уменьшают затраты на ее обслуживание.

Возможности сетей FTTH для реализации систем пожарно-охранной сигнализации. Системы пожарно-охранной сигнализации (ПОС), как правило, сертифицированы для подключения по меди. На рынке в настоящее время трудно найти сертифицированные пожарно-охранные комплексы с иным основным подключением к узлу охраны. Это требует разводки медных витых пар по коттеджам или квартирам. А если уже есть медь, то зачем нужна

оптика? Почему бы не организовывать ШП-доступ по стандарту VDSL2 (до 70 Мбит/с в нисходящем канале)? Ответ прост: при использовании VDSL2 значительно увеличивается число обслуживаемых узлов оператора, поскольку радиус действия модемов ограничен 1,5 км. В каждом коттеджном поселке или доме оператору нужно иметь узел доступа. Кроме того, прокладкой только витой пары не обойтись. По витым парам нельзя передавать ВЧ-сигнал аналогового телевидения — необходимо параллельно прокладывать коаксиальный кабель или оптику. Сегодня на рынке появляются интеллектуальные системы ПОС — составляющие «умного» дома. Такие системы способны передавать не только информацию о срабатывании тех или иных реле и датчиков, но и видеокартину помещений, где сработали датчики (и даже передать видеоблоки о 15-минутной предыстории). Оборудование обеспечивает конфиденциальность личной жизни жильцов коттеджа или квартиры.

Надежность таких систем не ниже, чем общепринятых. Они снабжены алгоритмом самотестирования и источником бесперебойного питания (ИБП). Системы требуют передачи потока к охранному комплексу со скоростью 1...2 Мбит/с. Они более удобны для работы с оптикой, чем с медью, и не допускают установку устройств, симулирующих отсутствие взлома. Использование таких систем позволяет исключить медные компоненты из кабельной системы доступа и, следовательно, сократить затраты на прокладку кабелей.

Возможности сетей FTTH для организации телефонии. Стандарты ВРОН и GРОН имеют гарантированную полосу пропускания для TDM-трафика телефонии. При этом OLT может играть роль выноса с подключением к АТС по каналам E1 с протоколом V5.2. Для других технологий подключения коттеджей по оптике для телефонии используется протокол VoIP. Это не сказывается на качестве и надежности телефонных линий, но требует тщательного подбора и настройки оборудования, чтобы исключить влияние других типов трафика. Подключение каналов VoIP к телефонной сети осуществляется или через шлюз, преобразующий VoIP в E1, или через программный коммутатор.

Для требуемой по стандарту надежности телефонной линии необходимо для оборудования, установленного в коттедже, иметь ИБП с 8-часовым ресурсом работы. Установка в России сложного оборудования в доме (а не в шкафу у дома, как, например, в США) приводит к трудностям его обслуживания оператором.

Организация ответвлений в сетях FTTH. Фактически требуется установка отдельного колодца на один-два дома для отвода

волокон от внутрипоселковой оптической магистрали. Это увеличивает стоимость кабельной канализации. При отводах в колодцы необходимо укладывать большие петли запаса кабеля, так как оптическую муфту можно обслуживать только вне колодца. Как вариант можно сооружать около коттеджей небольшие отводные колодцы, а разветвления кабелей осуществлять в колодцах или уличных шкафах, обслуживающих 6...12 коттеджей. Но в этом случае кабельная канализация должна быть рассчитана на укладку нескольких (7...19) кабелей.

Эта проблема решается устройством микроканализации с последующей пневмопрокладкой оптических микромодулей. Так, например, при использовании кабелей с 24 микроканалами и отводе четырех кабелей от уличного кроссового шкафа можно подключить до 96 коттеджей на один кросс (уличный шкаф или колодец).

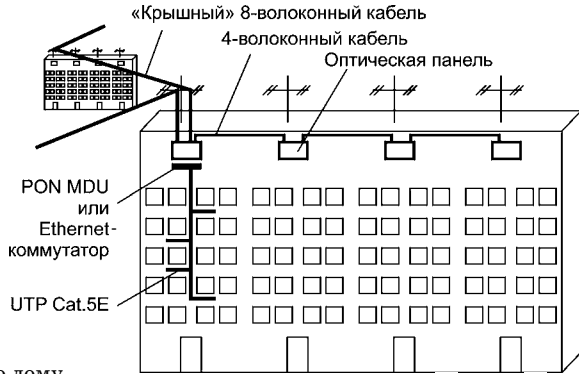


Рис. 10.27
Разводка кабеля по дому

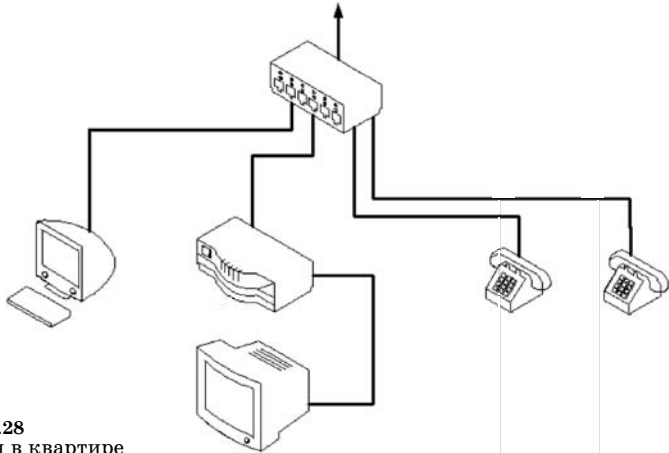


Рис. 10.28
Разводка кабеля в квартире

В коттедже от кабеля от ответвляются не волокна, а микроканалы. Можно обойтись и без колодца, укладывая короб ответвления непосредственно в грунт.

Кабельная микроканализация — набор полых трубок (до 24 штук) диаметром 5 мм, уложенных в кабель диаметром до 45 мм. Кабель может быть уложен непосредственно в грунт, в кабельную канализацию или подвешен на столбах с прикреплением к несущему тросу. Оптические модули диаметром 1,5 мм могут содержать до 12 волокон. Отводной кабель диаметром 10 мм (с одной трубкой) укладывается в грунт на территории участка и через отверстия в стене заводится в дом. Разводку кабеля по дому иллюстрирует рис. 10.27, а по квартире — рис. 10.28.

10.8.7.

ВОЛОКНО ДО МНОГОКВАРТИРНОГО ДОМА — FTTB

Сегодня большинство альтернативных операторов, не располагая медными проводными линиями связи, используют концепцию «волокно к многоквартирному дому» для развития сети, благодаря резкому падению цен как на оборудование, так и на ВОК. Для ОСД к многоквартирным домам, схема которой представлена на рис. 10.26, чаще всего используют ВОК воздушной прокладки. Опорами при этом служат столбы освещения и троллейбусной контактной сети, а также стойки, установленные на крышах домов, и стены зданий. Фактически начался бум ВОСП, подобный массовому созданию коаксиальных сетей КТВ в середине — конце 1990-х гг. Чаще всего применяется техника прокладки «крышных» кабелей, так как при охвате жилого квартала по крышам расстояния получаются в 1,5...2 раза короче, чем при использовании кабельной канализации. Большинство альтернативных операторов устанавливают оборудование на верхнем техническом этаже, в лифтовом помещении, на лестничной клетке последнего этажа. Такому решению способствует появление экономичных «крышных» кабелей отечественного производства. Эти кабели имеют выносной несущий трос и один оптический модуль. Трос выполняет роль силового элемента для ограничения деформаций модуля. Конструкция ВОК отличается простотой, малым весом и экономичностью. Например, одномодульный кабель с выносным несущим тросом (сечение типа «8») и сечением 4×8 мм весит около 55 кг/км и позволяет организовывать пролеты до 200...250 м. Его стоимость около 20 000 руб./км, и подвеска такого кабеля обходится дешевле, чем подвеска коаксиального. Для типичного микрорайона Москвы или другого крупного города России расстояние между центрами до-

мов примерно 250...500 м, а квартир в доме около 200. Стоимость ВОК в расчете на квартиру — 25...50 руб., что даже меньше удельной стоимости разводки по зданию. «Крышный» кабель такой конструкции практически не портит внешний вид пространства между зданиями. Он смотрится как провод радиотрансляционной сети. (Для сравнения стоит вспомнить толстые пучки коаксиальных кабелей, опутывающих кварталы городов.)

Наиболее перспективные технологии доступа с экономным расходом волокон — Metro-Ethernet и однонаправленные сети HFC. Коммутаторы Ethernet второго уровня с гигабитными оптическими uplink-портами существенно подешевели за последние годы, а их возможности позволяют доставлять населению ШП-каналы, обеспечивающие услуги IPTV. Например, кольцевой защищенный шлейф из 10 коммутаторов, имеющий два гигабитных подключения к серверу удаленного доступа (BRAS), может обеспечить IP-сервисом 250...500 семей. Стоимость коммутатора, соответствующего всем требованиям безопасности сети с протоколами группового вещания, необходимыми для потокового IPTV, колеблется от 14 000 до 28 000 руб., или 600...1200 руб. за порт. При охвате микрорайонов можно ограничиться 8...16-волоконными кабелями внутри кварталов и 16...32-волоконными кабелями для создания внутрирайонной магистрали.

Что касается сетей КТВ (HFC), то до последнего времени активно строились двунаправленные сети HFC и применялся протокол DOCSIS для организации доступа в Интернет через кабельные модемы. Один оптический узел мог обслуживать несколько десятков домов. Однако при установке оптического узла в каждом доме организация обратного канала по оптике требует множества подключений типа «точка-точка» по выделенным волокнам от оптических узлов до головной станции. Уже сейчас более эффективным и экономичным является решение, использующее однонаправленную сеть HFC вместе с сетью.

Сеть HFC может обеспечить наиболее востребованный тип видеослужбы — передачу социального пакета аналоговых ТВ-каналов и платного пакета цифровых каналов. Для приема цифровых каналов у абонента необходимо установить абонентский DVB-C-декодер (DVB-C STB), который немного дешевле, чем IPTV STB. Для сервиса VoD DVB-C требует такого обратного канала, для которого лучше использовать ШП-подключение по IP через сеть Metro-Ethernet, хотя более эффективно обеспечение VoD через сеть Metro-Ethernet по протоколам IPTV. Вместо Metro-Ethernet можно применить технологии PON — BPON, GPON, GPON, из которых

наиболее прогрессивна технология GPON, обеспечивающая, как и Metro-Ethernet, полосу более 2 Гбит/с на группу домов (2,5 Гбит/с в нисходящем и 1,2 Гбит/с в восходящем потоках). Сети PON совпадают по топологии с однонаправленными сетями HFC, для этих сетей могут использоваться одни и те же волокна и система оптических разветвителей.

В настоящее время решение на основе технологий GPON и GEPON обходится дороже решения на основе Metro-Ethernet. Однако ввиду бурного развития сетей PON для FTTH в США и Юго-Восточной Азии ожидается резкое снижение цен на компоненты оборудования GPON и GEPON.

Подключение домового терминального узла PON (или ONU типа MDU) можно зарезервировать, подсоединив его к двум деревьям PON — основному и резервному. Эти сети масштабируются уменьшением числа ONU в деревьях PON (например, 2,5 Гбит/с — 32 узла переходит в 2,5 Гбит/с — 16 узлов) или числа абонентов в расчете на один ONU. В результате развития сети типа «волокно к многоквартирному дому» может быть преобразована в сеть «волокно к подъезду». При этом не требуется прокладка новых кабелей между домами или увеличение числа используемых волокон в существующих кабелях, так как вместо домового ONU можно поставить оптический разветвитель, «размножив» тем самым волокна для подъездных ONU. Это делает сеть PON более привлекательной.

В случае Metro-Ethernet потребуется или увеличение числа волокон, или создание дополнительного каскада коммутаторов, или переход на 10GE.

Компании, предоставляющие КТВ-сервис, видимо, будут предлагать DVD-С для потокового видео и подключения к Интернету по каналам 256 Кбит/с 1 Мбит/с с контролем QoS. А операторы подключения Интернета скорее всего будут предоставлять ШП-доступ (от 10 Мбит/с) без аналогового КТВ, но с потоковым IP-видео.

Альтернативные телефонные операторы все чаще используют на последней миле IP-телефонию. ШП-подключение абонентов гарантирует приемлемое качество и надежность IP-трафика. Операторы традиционной телефонии распределяют каналы E1 с помощью VPON и GPON. Использование систем PDH/SDH для распределения по ВОК каналов E1 сохранилось, так как транспорт E1 через сети Ethernet по протоколу PWE-3, несмотря на его перспективность, пока не удовлетворяет в полной мере требованиям стандартов на передачу E1.

10.8.8. ВОЛОКНО ДО СЕЛЬСКОГО РАЙОНА

Проблемы сельской связи в России остаются. Они объясняются малой плотностью и низкой платежеспособностью населения, большими расстояниями и неразрешимы без господдержки. Наиболее перспективна на селе беспроводная связь. Уже сейчас в зоне действия базовых станций GSM-операторов много сел обеспечены телефонией и низкоскоростными каналами Интернета. На большей части территории России доступно спутниковое телевидение. Однако требуется создание радиорелейной или кабельной системы, формирующей ШП-каналы, которые могут обеспечить видеоконференцсвязь для организации дистанционного обучения и просмотра видеомедицины. Так поступают в тех штатах США, где низкая плотность населения. В крупных селах выгоднее иметь учителей и врачей широкого профиля и обустраивать школы и медицинские пункты видеомостомами со специалистами городского и районного масштаба, чем содержать штат специализированных врачей и учителей.

Если ТВ-каналы в селах не могут приниматься через спутник, то нужно прокладывать ВОК. Уже сейчас это можно делать в регионах России с развитым сельским хозяйством (на Кубани, в Ставрополье, Ростовской области). Оптика оказывается дешевле других проводных технологий и радиорелейной связи. При этом для прокладки ВОК можно использовать сети ЛЭП, охватывающие все сельские населенные пункты, и столбы телеграфной связи. Наиболее эффективно использование маловолоконных экономичных кабелей, таких как «крышная восьмерка», либо навивной технологии укладки тонкого (4 мм) кабеля на фазные провода для ЛЭП 6/10/35 кВ и телеграфных воздушных линий. При таком подходе и массовом строительстве кабельных систем в сельской местности можно достичь их себестоимости менее 55 000 руб./км.

Распределительную сеть в селе разумнее всего строить на основе беспроводных технологий — DECT, Wi-Fi, WiMAX и дециметровых ТВ-микротрансляторах. Так, при расстоянии между селами на 1000 домов 15...20 км можно обеспечить (при использовании ЛЭП) себестоимость оптической линии около 1 млн руб. в расчете на село. Стоимость базовой станции Wi-Fi (WiMAX) с учетом дециметрового телевидения — 300 тыс. руб. Тогда (в пересчете на дом) себестоимость радиолинии в расчете на одного абонента составит менее 2500 руб., включая абонентский комплект: Интернет и аналоговое телевидение.

Тестовые вопросы к главе 10
«ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ»

- 10.1. Какова протяженность магистральной ВОСС:
а) 1 км;
б) 10 км и более;
в) 100 км и более;
г) 1000 км и более?
- 10.2. Какова протяженность зонавых ВОСС:
а) 1 км;
б) 10 км и более;
в) 100 км и более;
г) 1000 км и более?
- 10.3. Какова протяженность городских ВОСС:
а) 1 км;
б) 10 км и более;
в) 100 км и более;
г) 1000 км и более?
- 10.4. Какие цифры соответствуют четвертой ступени иерархии цифровой ВОСС:
а) 139,262 Мбит/с;
б) 34,268 Мбит/с;
в) 8,448 Мбит/с;
г) 2,048 Мбит/с?
- 10.5. Какая модуляция обычно используется в магистральных ВОСС:
а) амплитудная;
б) частотная;
в) широтно-импульсная;
г) импульсно-кодовая?
- 10.6. Какие факторы учитываются при определении реальной чувствительности приемника цифровой ВОСС:
а) скорость передачи информации;
б) шумы оптического излучения;
в) вид модуляции;
г) диапазон рабочих частот?
- 10.7. Какая система связи перспективна для внедрения в сельских районах:
а) с прокладкой кабеля в грунте;
б) радиорелейная;
в) волоконно-оптическая с использованием ЛЭП;
г) спутниковая?
- 10.8. Для чего в ЦОСС используют системы скремблирования:
а) для повышения помехоустойчивости;
б) для повышения быстродействия;
в) для улучшения статических свойств сигналов;
г) для снижения потребления мощности?
- 10.9. В каких случаях целесообразно использовать аналоговые ВОСС:
а) на участках большой протяженности;
б) на участках малой протяженности;
в) для оптических систем распределения;
г) для зонавых систем?
- 10.10. Какие требования предъявляются к цифровым сигналам ВОСС:
а) обеспечивать малые нелинейные искажения;
б) обеспечивать низкое потребление электроэнергии;
в) обеспечивать оптимальное кодирование информации;
г) обеспечивать экономичность энергетического спектра?

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОФОТОНИКИ

11.1. ВВЕДЕНИЕ В НАНОФОТОНИКУ

В настоящее время во многих областях науки и техники, связанных с инфокоммуникационными технологиями, нанофотоника рассматривается как альтернатива современной электронике. Физические основы нанофотоники изложены во многих научных и учебных публикациях [44, 66, 69 и др.]. Использование фотонов вместо электронов при передаче и обработке информации позволяет добиться существенных преимуществ благодаря высокому быстродействию и помехоустойчивости фотонных каналов связи.

К нанофотонным относят устройства, использующие структуры размером около 100 нм и меньше. Также устройства решают проблемы миниатюризации многих оптических систем, содержащих волноводы, резонаторы, интерферометры и др.

Нанофотонные вычислительные устройства не только значительно превосходят электронные аналоги по быстродействию, но и позволяют успешно решать проблемы, связанные с тепловыделением и электропитанием.

С другой стороны, слабым местом и источником постоянного беспокойства при использовании любых приборов и устройств на основе фотоники было и остается обеспечение надежности электрооптических переключателей, позволяющих преобразовывать электрические сигналы в оптические и обратно. Решение проблемы быстрого и надежного преобразования таких сигналов имело бы огромное значение для коммерческого приложения и информационных технологий в целом. Кроме того, оно представляет особый интерес для военной сферы, где фотоника открывает большие перспективы в развитии средств связи, датчиков, радаров и других систем, в которых требуется быстрая и надежная обработка больших массивов оптической и иной информации.

Для внедрения последних достижений в области кремниевой оптоэлектроники необходимо разработать достаточно дешевые и надежные источники света многочастотного типа. Речь идет не только о принципиальной возможности повышения эффективности, а о чисто технических задачах создания новых и недорогих материалов и устройств. Уже сейчас применение кремниевых КМОП-структур в аппаратуре ограничивается возможностями уплотнения, регулирования и обработки большого числа параллельных потоков оптической информации. Дальнейшее развитие этой области настоятельно требует создания следующего поколения микропроцессоров, снабженных оптоэлектронными переключателями. Некоторого снижения стоимости аппаратуры можно ожидать от внедрения оптических волноводов из материалов типа SOI (silicon on insulator — кремний на изоляторе), способных заменить полупроводниковые материалы типа GaAs, InP и ниобата лития LiNbO_3 , используемые сейчас в телекоммуникационных и информационных устройствах.

Главными недостатками существующей кремниевой оптоэлектроники остаются низкие коэффициент усиления сигнала и эффективность светового излучения отдельными чипами. Исследователи потратили много времени и средств, пытаясь создать эффективные лазеры на кремниевых кристаллах, однако, к сожалению, им пока не удалось добиться серьезного успеха, хотя разработки в наиболее перспективных направлениях (усиление в пористом кремнии, создание волноводов из легированного эрбием кремния) продолжают.

Изделия кремниевой нанопотоники исключительно малы, поэтому многие из них (например, спектральные мультиплексоры) легко вводятся в обычные электронные чипы без изменения плотности монтажа. В настоящее время многие оптические наноразмерные устройства можно изготавливать на основе стандартных и дешевых материалов полупроводниковой техники (таких как кремний на изоляторе, арсенид галлия, фосфид индия), так что нанопотоника развивается главным образом за счет сочетания фотонных и электронных компонентов, позволяющего наиболее эффективно использовать преимущества тех и других. Размеры многих оптических устройств могут быть значительно уменьшены за счет замены традиционных материалов (стекла, ниобата лития) кремнием, арсенидом галлия, фосфидом индия. Такие сверхмалые оптические устройства могут быть в дальнейшем объединены в систему, что, возможно, позволит воплотить в жизнь мечту специалистов по информационным технологиям о создании эффективного и мно-

го функционального оптического устройства переработки информации, размещающегося на отдельном чипе. Более того, поскольку такие устройства, как упоминалось, создаются на основе обычных полупроводниковых материалов, разработчики вполне могут вводить их в уже существующие приборы, создавая гибридные электронно-фотонные системы очень сложной структуры.

Возможность использования в нанопотонике кристаллических пластин из кремния на изоляторе имеет огромное значение, если вспомнить о весьма развитой технологии кремниевой электроники. Созданные на основе таких материалов новые оптические нанорезонаторы (резонаторы, фильтры, волноводы, модуляторы, детекторы и т. п.) могут быть легко интегрированы в существующие системы на чипах, не говоря уже об их легком и быстром внедрении в производство. Кроме того, новые устройства обещают значительно расширить функциональные возможности существующих схем с КМОП-структурами, особенно при создании высокоэффективных транзисторов.

Очень важной технической проблемой является разработка генераторов с синхронизированными модами, позволяющими одновременно подавать выходные сигналы на разных частотах с высокой надежностью. В оптических чипах с пассивной фильтрацией и обработкой информации входной сигнал обычно сильно искажается из-за разнообразных потерь (так называемых вносимых потерь, потерь в волноводах, резонаторах и т. д.), вследствие чего необходима также разработка для таких устройств методов усиления входного сигнала перед обработкой. Надежная и качественная синхронизация мод требует использования в схемах резонаторов с высокой добротностью и высококачественных оптических модуляторов, и эти устройства уже сейчас могут быть созданы в чипах из кремния на изоляторе. В сущности, сегодня разработано все необходимое для создания кремниевых устройств, включающих внутренний генератор света с синхронизацией мод, и главной нерешенной проблемой остается усиление сигналов в оптическом диапазоне. Конечной целью разработок в этом направлении остается создание многочастотного источника оптического излучения, интегрированного с системой обработки информации в рамках оптоэлектронного чипа.

В последнее время внимание исследователей привлекают разнообразные фильтры, изготавливаемые на основе оптической связи дисковых и кольцевых резонаторов. Новые методы оказались эффективными для стеклянных световодов разных видов, включая монолитные и составные (оптические волокна с наполнителем

в виде микросфер). Группа, возглавляемая Литтлом, недавно разработала устройство в виде сложной решетки (8×8) планарной геометрии, в которой над световодами размещены диски из стекла с очень высоким показателем преломления. Такая конструкция позволяет обеспечить высокие значения коэффициента Q (добротности), т. е. создать оптические фильтры с высоким спектральным разрешением.

Устройства, обеспечивающие связь между дисками резонаторов и волноводами, очень малы (150...500 нм), так что уже сейчас могут изготавливаться на основе наиболее развитых литографических технологий (например, с использованием ультрафиолетового излучения, электронных пучков и т. п.). Дальнейший прогресс в области практического применения таких устройств зависит от того, удастся ли использовать для их производства более распространенные, дешевые и простые литографические методики, обеспечивающие достаточное разрешение.

Перспективным направлением миниатюризации фотонных устройств и их интеграции в сложные системы является использование так называемых фотонных кристаллов. Они представляют собой искусственные периодические наноструктуры, сформированные таким образом, что электромагнитные волны некоторых частот (или даже диапазонов частот) в них не могут распространяться ни в каком направлении. Например, на основе планарных фотонных кристаллов можно создать миниатюрный и очень эффективный нанорезонатор, позволяющий локализовать мощные электромагнитные поля в очень малых объемах в течение длительного времени. Более того, возможны резонаторы, позволяющие «концентрировать» свет в воздухе; такие устройства — весьма перспективный инструмент изучения процессов взаимодействия света и вещества в нанометровом масштабе. Изготовление и исследование свойств наноразмерных оптических резонаторов сейчас является одним из самых интересных направлений развития фотоники, представляющим большую практическую и научную ценность.

Например, весьма перспективно использование фотонных устройств для создания биодатчиков новых типов. Метод основан на том, что, подвергая органические вещества в микродозах очень мощному электрическому и оптическому воздействию в описанных выше резонаторах, можно получить для них так называемые оптические сигнатуры (зависимости параметров выходного сигнала от длины резонатора). Вследствие малых размеров резонаторов такой подход теоретически позволяет создать принципиально новые интегральные спектроскопические системы (например, объ-

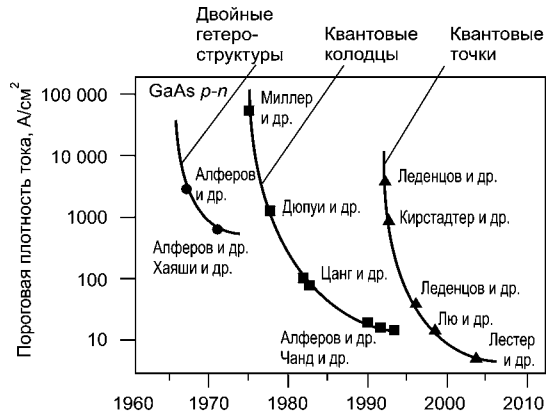


Рис. 11.1
Эволюция полупроводниковых лазеров от арсенид-галлиевых на *p-n*-переходах до наноразмерных на квантовых точках

единить на одном чипе все возможности рамановской спектроскопии). Кроме того, следует отметить, что высокая добротность на-норезонаторов в фотонных кристаллах (в них часто $Q > 10^5$) в сочетании с их исключительно малыми размерами (около 5 мкм) делают такие кристаллы самым перспективным материалом для создания разнообразных мультиплексных устройств в системах уплотнения и переработки оптических сигналов.

Технология молекулярно-лучевой эпитаксии позволяет изготавливать структуры со слоями нанометровой толщины. Также слои необходимы для производства нанофотоприемников и лазеров.

Важнейшим параметром лазера является пороговая плотность тока, соответствующая началу лазерной генерации. Как видно на рис. 11.1, за пять десятилетий развития лазерной техники удалось снизить пороговую плотность полупроводниковых лазеров с 10^5 до 10 А/см².

В последние годы опубликовано много работ, посвященных нанозлектронным лазерам [65, 77]. Особое внимание в них уделяется нанозлектронным лазерам с вертикальными резонаторами. Именно этим лазерам принадлежит много мировых рекордов в области лазерной техники. К числу этих рекордов относится минимальный пороговый ток лазерной генерации, составляющий единицы микроампер. Лазеры с вертикальными резонаторами — самые миниатюрные. К мировым достижениям относится и рекордно высокая частота токовой модуляции лазерного излучения — десятки гигагерц. Лазеры с вертикальными резонаторами перспективны для создания односторонних излучателей, которые могут использоваться для квантовых вычислений и в квантовой криптографии.

11.2. КЛАССИФИКАЦИЯ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ

В течение последних десятилетий основное направление исследований в физике твердого тела смещалось от объемных кристаллов в сторону структур, размеры которых (хотя бы в одном из трех измерений) очень малы.

Спектральные характеристики различных физических объектов представлены на рис. 11.2.

Вначале внимание исследователей привлекали в силу относительной простоты изготовления очень тонкие твердотельные пленки, толщина которых сопоставима с длиной волны де Бройля λ_B для электронов в твердых телах. Работы позволили обнаружить целый ряд новых явлений, среди которых квантовый эффект Холла (КЭХ), открытый в 1980 г. фон Клитцингом, удостоенным за это в 1985 г. Нобелевской премии.

Твердые тела (обычно полупроводниковые материалы) называются низкоразмерными в тех случаях, когда один из их геометрических параметров имеет порядок длины волны де Бройля λ_B , хотя в некоторых случаях удобнее пользоваться другими характеристическими длинами. В большинстве используемых полупроводников λ_B находится в диапазоне от 10 до 100 нм, т. е. ученые

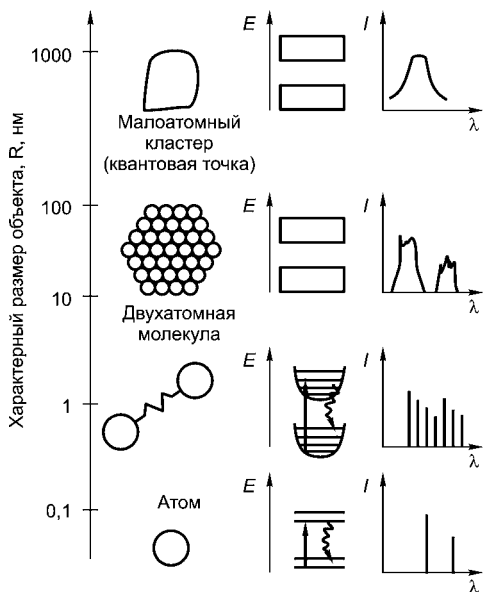


Рис. 11.2
Спектральные
характеристики
различных объектов

могут наблюдать в них интересующие их квантовые эффекты (квантовый эффект Холла, кулоновскую блокаду, квантовую проводимость и т. п.) в нанометровом диапазоне. Низкоразмерные объекты проще всего классифицировать соответственно числу нанометровых пространственных измерений. Например, структуру с одним нанометровым измерением, считают двумерной (2D) и называют квантовой ямой. Одномерными (1D) являются квантовые проволоки — у них два нанометровых геометрических измерения, а нульмерными (0D) — объекты, все три измерения которых имеют порядок λ_B .

В современной оптоэлектронике широко применяются структуры с очень тонкими нанометровыми слоями полупроводников (например, слоистая структура из тонкой пластины GaAs, обложенной с двух сторон слоями полупроводника AlGaAs, обладающего более широкой запрещенной зоной). Другие очень интересные структуры могут быть получены образованием переходов (или, более строго, гетеропереходов) между двумя полупроводниками с различными запрещенными зонами. В обоих случаях на границе раздела возникают потенциальные ямы для электронов, похожие на те, что образуются в МДП-структурах. Если ширина таких ям сопоставима с λ_B , то энергетические уровни электронов в ямах начинают квантоваться. Такие гетеропереходы уже стали основой для изготовления нанофотонных приборов и транзисторов на квантовых точках типа MODFET (модулированно-легированные полевые транзисторы), характеризующихся очень высоким быстродействием.

11.3. КВАНТОВЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

В начале 1970-х гг. в физике полупроводников появилось новое направление — изучение гетероструктур, образованных различными по составу и свойствам полупроводниками. Особенно интересными оказались наногетероструктуры. В них используются тонкие пленки нанометровой толщины, такой же толщины тонкие нити и нанометровые ансамбли атомов. Поскольку при нанометровых размерах проявляются квантовые эффекты, эти системы были названы квантовыми ямами, квантовыми нитями и квантовыми точками. Они принципиально отличаются от макроскопических тел плотностью электронных состояний, так как в наноразмерных полупроводниковых структурах ограничено движение электронов.

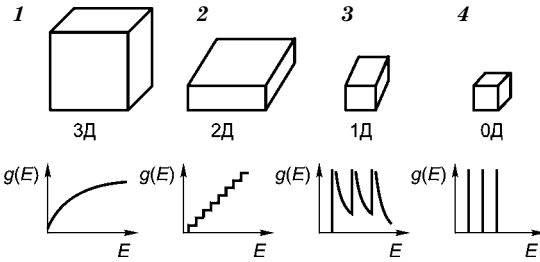


Рис. 11.3
Плотность энергетических состояний:

1 — трехмерного твердого тела; 2 — квантовой ямы; 3 — нити; 4 — точки.

Как видно на рис. 11.3, квантовые эффекты проявляются начиная с квантовых ям, т. е. когда движение электронов ограничено нанометровыми размерами хотя бы в одном измерении.

Не останавливаясь на интереснейших свойствах и применении квантовых ям и квантовых нитей, обратимся к квантовым точкам, которые рассматриваются сегодня как одна из альтернатив молекулярной элементной базы вычислительных устройств.

Квантовые точки называют иногда (чаще — в популярных изданиях) искусственными атомами. Но квантовая точка — это совокупность атомов, наноразмерная по всем трем пространственным измерениям. Движение электронов в такой системе может быть аппроксимировано простейшей квантово-механической моделью, известной под названием «частица в прямоугольном потенциальном поле». Эта модель описывается уравнением Шредингера

$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{2m} \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] - U(x, y, z) \right\} \psi = E\psi, \quad (11.1)$$

где $U(x, y, z)$ — потенциальная энергия ящика со сторонами a, b, c ;

$$U(x, y, z) = U(x) + U(y) + U(z). \quad (11.2)$$

При этом $U(x) = U(y) = U(z) = U_0$ при всех других значениях x, y, z .

$$E_{n_1, n_2, n_3} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m} \left(\frac{n_1^2}{a^2} + \frac{n_2^2}{b^2} + \frac{n_3^2}{c^2} \right), \quad (11.3)$$

где $n_1, n_2, n_3 = 1, 2, 3, \dots$

Таким образом, квантовой точке отвечает дискретный спектр, сходный по общему виду со спектром атомной системы.

В квантовой точке может находиться от одного электрона до большого количества электронов, распределение которых определяется принципом Паули.

Квантовые точки создаются методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Для этого на хорошо подготовленную поверхность на-

пыляется вещество со структурой, близкой к структуре подложки. Напыление должно происходить в высоком вакууме, чтобы избежать включения в формируемый объект посторонних примесей. Скорость напыления строго регулируется, для того чтобы исключить образование дефектов структуры. Спонтанное формирование квантовых точек в так называемом режиме Странского–Крастанова хорошо изучено на примере системы InAs/GaAs. При росте первого мономолекулярного слоя InAs на поверхности GaAs из-за различия постоянных кристаллических решеток возникают упругие напряжения.

Если напыление продолжается, различия увеличиваются и на поверхности первого слоя (его называют «смачивающим» слоем) становится выгодным не равномерное распределение вещества, а образование отдельных «капель». Таким образом возникают пирамидки со свойствами квантовых точек, одна из которых представлена на рис. 11.4.

Качественно эти пирамидки можно рассматривать как дефекты на поверхности основного полупроводника, из-за которых в зонной структуре появляются примесные уровни — выше валентной зоны (дырки) и ниже зоны проводимости (электроны), как показано на рис. 11.5. Уровни, отвечающие примесному уровню зоны проводимости, характеризуются дискретным спектром, т. е. они отвечают квантовой точке.

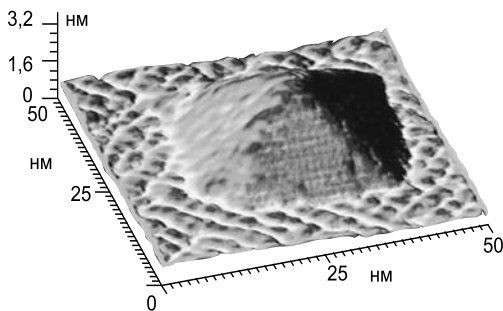


Рис. 11.4
Экспериментальная полупроводниковая реализация квантовой точки

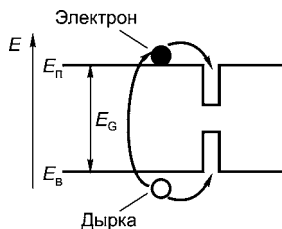


Рис. 11.5
Зонная структура полупроводника, содержащего квантовую точку

11.4. ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОМАТЕРИАЛОВ

11.4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Оптические свойства наноматериалов рассмотрены в ряде работ [64–67], материалы которых использованы в этом разделе.

Нанокластеры и наноматериалы, организованные на их основе, обладают рядом особенностей, обуславливающих их уникальные оптические и электропроводящие свойства. Нанометровый размер, переход от массивного твердого тела с зонной структурой к отдельным электронным уровням и ограничение длины свободного пробега носителей за счет влияния поверхности кластера изменяют правила отбора мод и вызывают появление новых оптических переходов, изменение энергии переходов, изменение времени флуоресценции и люминесценции, увеличение силы осцилляторов. Другой важный фактор, определяющий свойства наноматериалов, — это матрица и среда, в которой находятся кластеры. На основе наноматериалов возможно получение светоперестраиваемых диодов и лазеров с изменением длины волны, а также ряда нелинейных оптических наносистем для оптических преобразователей. Упорядочение нанокластеров в матрице обуславливает возможность создания фотонных кристаллов, имеющих постоянную решетки, сравнимую с длиной волны видимого света.

Оптические свойства металлов и полупроводников существенно различаются, что выражается в различном расположении зоны проводимости, валентной зоны и уровня Ферми. В связи с этим различаются размерные эффекты в нанокластерах металлов и полупроводников.

Наночастицы веществ, являющихся в обычных условиях полупроводниками, изучались особенно интенсивно. Множество исследований касается электронных свойств таких частиц, что объясняется использованием в качестве квантовых точек. Наночастицы германия или кремния сами по себе не являются полупроводниками. Наночастица Si_n может образовываться при лазерном испарении кремниевой подложки в потоке гелия. При фотолизе пучка нейтральных кластеров ультрафиолетовым лазером кластеры ионизируются, и отношение их массы к заряду может быть измерено при помощи масс-спектрометра. Оптические свойства наночастиц полупроводящих материалов и объемного материала резко различаются. Оптические спектры поглощения существенно сдвигаются в

голубую сторону (в сторону уменьшения длины волны) при уменьшении размеров частиц.

Фотоны с энергией, равной или превышающей ширину запрещенной зоны полупроводника, могут создавать электронно-дырочные пары. Электрон и дырка двигаются независимо друг от друга. В некоторых случаях благодаря кулоновскому взаимодействию электрон и дырка могут оставаться «вместе», формируя новую электрически нейтральную квазичастицу — *экситон*. Экситоны не влияют на электропроводность вещества, поскольку не обладают электрическим зарядом. Возникновение экситонов существенно облегчается в квантовых ямах, так как локализация в органической области усиливает эффекты перекрытия волновых функций электронов и дырок.

Простейшая модель описывает экситон как электрон и дырку, которые вращаются внутри решетки относительно общего центра массы под воздействием кулоновского притяжения.

Существуют два основных типа экситонов:

1. Экситоны с незначительным перекрытием волновых функций электронов и дырок. Размер таких экситонов составляет несколько параметров решетки. Если экситоны являются слабосвязанными электронно-дырочными парами, то они называются экситонами Ванье–Мотта. Системы экситонов Ванье–Мотта характерны для многих полупроводников.

2. Экситоны, характерные для изоляторов и имеющие размер, близкий к постоянной решетки, так называемые экситоны Френкеля. Они сильно или тесно связаны электронно-дырочными парами.

Энергия связанных состояний экситонов равна [67]

$$E_n = \frac{\mu R_H}{m_0 \epsilon^2 \epsilon_r^2} \frac{1}{n^2} = \frac{\mu}{m_0 \epsilon_r} \frac{13,6eV}{n^2} = \frac{R_{ex}}{n^2}, \tag{11.4}$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$; R_H — постоянная Ридберга для атома водорода; R_{ex} — постоянная Ридберга для экситона.

На рис. 11.6 показаны схематично связанные состояния экситона и энергия ионизации экситона E_1 .

Энергия фотона, необходимая для создания экситона, меньше энергии, необходимой

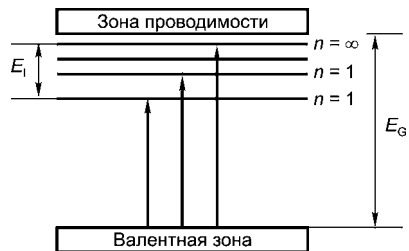


Рис. 11.6
Связанные состояния экситона

просто для создания независимой электронно-дырочной пары в полупроводнике, поэтому полный процесс можно описать как создание экситона с его дальнейшим разделением на электрон и дырку. При этом процесс разделения требует энергии, равной энергии связи экситона.

Энергии, соответствующие связанным состояниям экситона, расположены в запрещенной зоне полупроводника, чуть ниже границы зоны проводимости.

Спектр поглощения экситонов имеет пики, предсказываемые уравнением (11.4). Экситоны более стабильны при низких температурах и не распадаются под воздействием фононов.

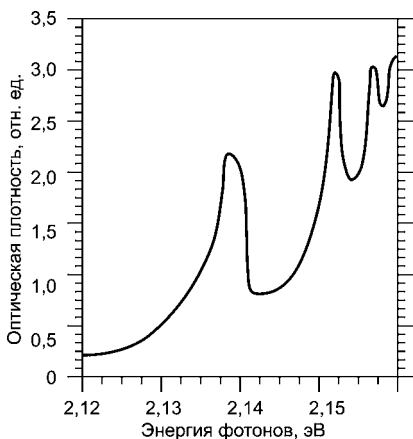


Рис. 11.7
Спектр оптического поглощения водородоподобных переходов экситона в Cu_2O

Оптический спектр поглощения оксида меди Cu_2O показан на рис. 11.7. На нем виден спектр поглощения экситонов.

Особенно интересно то, что происходит при уменьшении наночастиц до размеров, сравнимых с радиусом электрон-дырочной пары или меньших. Возможны две ситуации, называемые режимами слабой и сильной локализации. В режиме слабой локализации радиус частицы больше радиуса экситона, но область перемещения экситона ограничена, что приводит к смещению спектра поглощения в голубую сторону.

Когда радиус частицы меньше радиуса орбиты электрон-дырочной пары, движения электрона и дырки становятся независимыми и экситон перестает существовать. Электрон и дырка имеют собственные наборы энергетических уровней. Это также приводит к голубому смещению и появлению нового набора линий поглощения.

Наночастицы по сравнению с макроскопическим твердым телом имеют ряд особенностей рассеяния и поглощения света. Эти особенности наиболее отчетливо проявляются в экспериментах с большим количеством частиц. Так, коллоидные растворы и гранулированные пленки могут быть интенсивно окрашены вследствие специфических оптических свойств наночастиц. Классическим объектом изучения оптических свойств дисперсных сред яв-

ляется раствор, содержащий золото. Еще Фарадей обратил внимание на сходство цвета коллоидного раствора золота и пленки золота и высказал предположение о дисперсном строении последней.

При поглощении света тонкозернистыми пленками металлов в видимой части их спектра появляются пики поглощения, отсутствующие у массивных металлов (в металлах оптическое поглощение электронами проводимости происходит в широком диапазоне длин волн). Например, гранулированные пленки из частиц Au диаметром 4 нм имеют явный максимум поглощения в интервале от 560 до 600 нм. Спектры поглощения наночастиц Ag, Cu, Mg, In, Li, Na, K также имеют максимумы в оптическом диапазоне.

Еще одной особенностью гранулированных пленок является уменьшение поглощения света при переходе из видимой области спектра в инфракрасную (поглощение излучения сплошными металлическими пленками растет с увеличением длины волны).

Размерные эффекты оптических свойств существенны для наночастиц, размер которых заметно меньше длины волны и не превышает 10...15 нм.

Различия спектров поглощения наночастиц и массивных металлов обусловлены различием их диэлектрической проницаемости $\varepsilon = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2$. Диэлектрическая проницаемость наночастиц с дискретным энергетическим спектром зависит как от размера частиц, так и от частоты излучения. Более того, диэлектрическая проницаемость зависит от частоты не монотонно, она осциллирует вследствие переходов между электронными состояниями.

Минимальное число частиц, необходимое для экспериментального исследования оптических свойств, составляет не менее 10^{10} . Получить $10^{10} \dots 10^{13}$ частиц одного размера и формы невозможно, поэтому при экспериментах для создания ансамбля частиц эти осцилляции сглаживаются. Тем не менее даже среднее по ансамблю значение отличается от диэлектрической проницаемости массивного вещества. Мнимая часть диэлектрической проницаемости обратно пропорциональна радиусу r частицы:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty,2} + \frac{A(\omega)}{r}, \quad (11.5)$$

где $\varepsilon_{\infty,2}(\omega)$ — мнимая часть диэлектрической проницаемости макроскопического кристалла; $A(\omega)$ — некоторая функция частоты.

Экспериментальные результаты, полученные для частиц золота с $r = 0,9 \dots 3,0$ нм при постоянной длине волны $\lambda = 510$ нм, подтверждают зависимость $\varepsilon_2 \approx 1/r$. От размера частиц зависят также ширина полосы поглощения и форма ее низкочастотного края.

Уширение полосы поглощения света наночастицами Au и Ag при уменьшении их размера наблюдали многие исследователи.

Другим размерным эффектом является смещение резонансного пика поглощения света. Длина свободного пробега электрона в металлических частицах, диаметр которых меньше длины свободного пробега электронов λ_{∞} в массивном металле, равна радиусу частицы r . В этом случае при поглощении света эффективное время релаксации τ_{ef} можно определить как

$$\tau_{ef}^{-1} = \tau^{-1} + \frac{V_F}{r},$$

где $\tau = \lambda_{\infty}/V_F$ — время релаксации в массивном металле; V_F — скорость электрона на уровне Ферми. При пренебрежении межзонными переходами и учете движения только свободных электронов

$$\varepsilon_1 = 1 - \left[\frac{\omega_p^2}{\omega_1^2} - \frac{1}{\tau_{ef}} \right],$$

где ω_p — частота плазмонов,

$$\omega_p = \frac{4\pi N e^2}{m^*},$$

где N , e , m^* — концентрация, заряд и эффективная масса свободных электронов соответственно. Максимум поглощения света достигается при $\varepsilon_m = -\varepsilon_1(\omega_1)$; с учетом этого для очень малых частиц $\tau_{ef}^{-1} \approx V_F/r$. Выражение для резонансной частоты имеет вид

$$\omega_1 = \left[\frac{\omega_p^2}{1 + 2\varepsilon_m} - \frac{V_F^2}{r^2} \right]^{1/2}.$$

Резонансная частота уменьшается при уменьшении размера частицы, т. е. полоса поглощения должна смещаться в низкочастотную область. Красное смещение резонансного пика поглощения света при уменьшении размера частиц предсказывает теория. С другой стороны, квантово-механические расчеты предсказывают повышение частоты резонансного пика, т. е. голубое (синее) смещение полосы поглощения при уменьшении размера наночастиц.

Экспериментальные данные о смещении частоты резонансного поглощения в зависимости от размера наночастиц также противоречивы. Исследователи наблюдали голубое (синее) смещение пика поглощения наночастиц Ag при уменьшении их размера до 1...2 нм. В зависимости от степени размытия электронного обла-

ка по поверхности частицы наблюдалось как голубое (синее), так и красное смещение. Для перехода от одного эффекта к другому достаточно незначительного изменения размера области диффузного размытия электронов. Ширина полосы поглощения света является сложной функцией размера частиц и достигает максимума вблизи $D \approx 1,1$ нм.

11.4.2. ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОКЛАСТЕРОВ

Спектры поглощения металлических нанокластеров характеризуются интенсивной широкой полосой, которая отсутствует в спектрах поглощения массивных материалов [64]. Появление этой полосы связано с коллективным возбуждением электронов проводимости (поверхностными плазмонами) и приводит к замечательной цветовой гамме — от красного цвета до синего — для разбавленных коллоидов благородных, щелочных и редкоземельных металлов. Плазмонный эффект состоит в резонансном поглощении нанокластером падающего электромагнитного излучения. Под действием электромагнитного поля электроны проводимости в кластере смещаются относительно положительно заряженного остова. В результате смещения возникает возвращающая сила, пропорциональная величине смещения, подобно тому как это происходит в гармоническом осцилляторе. При совпадении собственной частоты колебаний электронов и частоты внешнего поля должен наблюдаться резонансный эффект, связанный с возбуждением собственных колебаний электронов. Объяснение коллективного движения электронов на языке квантовой механики приводит к понятию элементарных возбуждений — плазмонов, обладающих энергией $\hbar\omega_0$ (здесь ω_0 — собственная частота плазмонов).

Оптические свойства нанокластеров, хотя и определяются квантовыми эффектами, тем не менее могут быть описаны в рамках классической теории, разработанной Ми.

Свойства нанокластеров и матрицы в наносистеме характеризуются комплексной диэлектрической проницаемостью, которая обеспечивается как следствие поглощения электромагнитного излучения с энергией E и частотой ω в соответствии с выражением $E = E_0 \exp(i\omega t)$. Поглощение для N нанокластеров на единицу объема можно записать стандартным выражением $A = LCN/2,3$, где C и L — сечение поглощения и длина оптического поглощения соответственно. В приближении, когда размер кластера намного меньше длины волны, сечение поглощения определяется как

$$C = \frac{18\pi V \varepsilon_2(\omega) \varepsilon_m^{3/2}}{\lambda [(\varepsilon_1(\omega) + 2\varepsilon_m)^2 + \varepsilon_2(\omega)^2]}, \quad (11.6)$$

где V и λ — объем сферического кластера и длина волны падающего излучения с частотой ω соответственно.

Комплексная диэлектрическая проницаемость нанокластера

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_1(\omega) + i\varepsilon_2(\omega).$$

При малых $\varepsilon_2(\omega)$ резонанс и положение максимума поглощения определяются как $\varepsilon_1(\omega) = -2\varepsilon_m$, где ε_m — диэлектрическая постоянная среды (матрицы). Ширина и высота линии поглощения определяются $\varepsilon_2(\omega)$. Кроме того, ширина резонанса определяется ε_m .

Профиль линии поглощения в области резонанса имеет лоренцеву форму и характеризуется энергией положения резонансного пика $\hbar\omega_0$ и его шириной. Для нанокластеров размером намного меньше длины волны резонансная частота и положение линии определяются как

$$\omega_0 = \left(\frac{ne^2}{\varepsilon_0 m_e} \right)^{1/2} (2\varepsilon_m + 1 + \chi)^{-1/2}, \quad (11.7)$$

где n — плотность электронов; ε_0 — диэлектрическая постоянная вакуума; m_e — эффективная масса электронов проводимости; ε_m — действительная часть диэлектрической проницаемости среды (матрицы); χ — компонента ε_m , связанная с межзонными переходами в нанокластере. Ширина резонанса определяется как

$$\Gamma = \Gamma_0 + \frac{2\omega_0^2}{\omega^3 V_F} \left[\left(\frac{\partial \varepsilon_1}{\partial \omega} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon_2}{\partial \omega} \right)^2 \right]^{-1/2} \frac{a}{r}, \quad (11.8)$$

где V_F — фермиевская скорость электронов; a — постоянная; r — радиус нанокластера.

Анализ формул (11.6)–(11.8) не выявляет прямую зависимость положения или сдвига линии плазмонного поглощения от размера нанокластера, но свидетельствует об уширении линии поглощения с уменьшением размера кластера, т. е. о зависимости $\Gamma \sim a/r$. Эксперименты подтверждают уширение линии для малых нанокластеров, но предоставляют противоречивые данные о влиянии размерного эффекта на изменение частоты плазмонного резонанса. По расчетам и экспериментальным данным, сдвиг частоты резонанса для нанокластеров металла в матрице в основном определяется диэлектрической проницаемостью окружения (матрицы).

11.4.3. ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОКЛАСТЕРОВ

В полупроводниковых нанокластерах (вплоть до нескольких атомов в кластере), как и для массивных материалов, существует энергетическая щель между валентной зоной и зоной проводимости, которая обуславливает поглощение и испускание света. В полупроводниках возбуждение светом кристалла или кластера принято рассматривать в рамках возбуждения экситона, который представляет собой слабо связанную пару «электрон–дырка», при этом электрон появляется в зоне проводимости, а дырка — в валентной зоне. Область делокализации экситона может значительно превосходить период кристаллической решетки массивного тела. В случае нанокластера размер экситона сравним с размером кластера или превосходит его, что на языке длины волны носителей (электрона или дырки) означает квантовое ограничение. Для макроскопического кристалла боровский радиус экситона равен $r_{ex} \sim n^2 \hbar^2 \epsilon_m / (\mu e^2)$, где μ — приведенная масса экситона, $\mu = m_\Delta m_D / (m_\Delta + m_D)$; m_Δ , m_D — эффективные массы электрона и дырки соответственно; $n = 1, 2, 3, \dots$. По оценкам, r_{ex} изменяется от 0,7 нм для массивного CuCl до 10 нм для GaAs, что обуславливает квантовые ограничения для кластеров меньше 10 нм. Энергетическую зависимость щели между валентной зоной и зоной проводимости от размера кластера с учетом квантового ограничения можно оценить из соотношения неопределенности импульса электрона (или дырки) и его координаты $\Delta p \Delta x \geq \hbar$. Тогда, принимая размер кластера $d = \Delta x$, а энергию электрона $E = \Delta p^2 / 2\mu$, получаем оценку $E \geq \hbar^2 / (2\mu r^2)$. Таким образом, ширина запрещенной зоны должна возрастать с уменьшением размера нанокластера как $E_g^{(1)} \sim 1/r^2$. Так как энергия перехода возрастает, то в оптических спектрах поглощения и люминесценции нанокластеров наблюдается голубой сдвиг, который отличает эти спектры от спектров массивных тел.

Размер кластера влияет не только на энергию перехода через запрещенную зону, но и на кулоновское взаимодействие между электроном и дыркой: $E_g^{(2)} \sim 1,78e^2 / (\epsilon_m r)$.

Общее выражение для энергии экситонного возбуждения состоит из четырех членов: $E = E_g + E_g^{(1)} - E_g^{(2)} - E_{Ry}$, где E_g — ширина запрещенной зоны массивного кристалла полупроводника; $E_g^{(1)} = \hbar^2 n / (2\mu r^2)$ (n — целые числа); $E_{Ry} = 0,248 / \mu e^4 / (2n^2 / \hbar^2)$ — энергия связи электрона и дырки (эффективная энергия Ридберга). Таким образом, от размера кластера зависят второй и третий члены, кроме того, кулоновское взаимодействие может заметно

сказываться на оптических характеристиках, когда на основе нанокластеров формируется наноматериал, свойства которого зависят от диэлектрической проницаемости среды.

Аналогичный сдвиг в сторону больших энергий с уменьшением размера кластера должен наблюдаться и в спектрах люминесценции, возникающих после рекомбинации генерируемых излучением электрона и дырки. Эта энергия зависит от кулоновского взаимодействия электрона и дырки:

$$E = E_{\min} - (D_{\text{д}} - D_{\text{э}}) + \frac{e^2}{\epsilon_m r_{\text{дэ}}}, \quad (11.9)$$

где $E = 2\pi\hbar c/\lambda$, здесь λ — длина волны излучения люминесценции, E_{\min} — минимальная энергия, необходимая для возбуждения нанокластера; $D_{\text{д}}$, $D_{\text{э}}$ — глубина ловушек дырки и электрона соответственно; $r_{\text{дэ}}$ — расстояние между электроном и дыркой. Выражение (11.9) тоже свидетельствует о зависимости длины волны излучения от диэлектрической постоянной среды, т. е. от матрицы и компоновки наноматериала.

Ширина линии поглощения и люминесценции также зависит от размера кластера, причем при уменьшении размера кластера время релаксации электронного возбуждения возрастает в связи с ослаблением электрон-фононного взаимодействия (из-за убывания числа фононов в кластере). При этом можно предсказать убыстрение электронной релаксации благодаря рассеянию электрона на поверхности кластера, причем доля этого рассеяния должна возрастать пропорционально отношению площади поверхности кластера к его объему, т. е. как $1/r$. Время релаксации τ можно определить из приближенной формулы

$$\frac{1}{\tau} = \frac{ar}{\tau_{\text{ММ}}} + \frac{bV}{r}, \quad (11.10)$$

где a, b — константы; $\tau_{\text{ММ}}$ — время релаксации массивного материала; V_F — скорость электрона на поверхности Ферми; a — целое число.

Согласно формуле (11.10) уменьшение размера кластера сначала приводит к увеличению времени релаксации, поскольку первое слагаемое, учитывающее электрон-фононное взаимодействие, доминирует, дальнейшее уменьшение размера кластера уже сопровождается уменьшением времени релаксации (преобладает влияние, учитываемое вторым слагаемым).

Энергетические сдвиги в область больших энергий либо уширение линий поглощения или люминесценции с уменьшением разме-

Рис. 11.8
Спектры поглощения
нанокластеров CdSe 2,1...4 нм
2,1...4 нм при $T = 10$ К

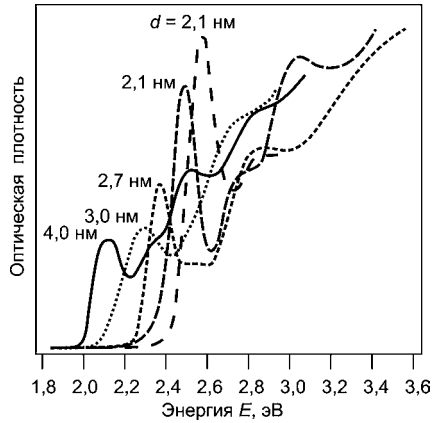
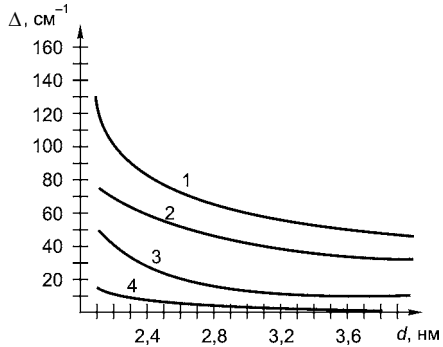


Рис. 11.9
Зависимость суммарной ширины
линии поглощения Δ и вкладов
в нее от различных процессов для
нанокластеров CdSe при 15 К [67]:

1 — суммарная экспериментальная ширина линии; 2 — вклад, обусловленный упругим рассеянием электронов на дефектах кристаллической решетки, например поверхности; 3 — вклад электрон-фононного рассеяния; 4 — вклад, обусловленный изменением времени жизни экситона.



ров нанокластеров характерны для многих полупроводников, например для халькогенидов металлов, галогенидов металлов и т. д.

В качестве примера приведем результаты исследования поглощения и люминесценции наноматериалов на основе полимерных пленок, включающих нанокластеры CdSe размером 2,1...4 нм.

На рис. 11.8 представлены спектры поглощения нанокластеров GdSe различных размеров при $T = 15$ К. Приведенные зависимости свидетельствуют о том, что с уменьшением размера кластера полоса поглощения сдвигается в область больших энергий (наблюдается голубой сдвиг). Этот сдвиг может быть приближенно описан зависимостью $1/r^2$, т. е. он малочувствителен к влиянию матрицы. Гораздо более чувствительна к влиянию материала зависимость ширины линии поглощения от размеров кластера при низких температурах, что иллюстрирует рис. 11.9. В общей ширине линии поглощения три вклада. Наиболее существенный вклад в ширину линии обусловлен упругим рассеянием излучения на

примесях и дефектах решетки (см. рис. 11.9, кривая 2). Этот вклад зависит от размера наночастицы (точнее, от эффективной площади поверхности рассеяния, пропорциональной отношению S/V , где S — площадь поверхности, V — объем наночастицы) и не зависит от температуры. Второй вклад (см. рис. 11.9, кривая 3) обусловлен связыванием низкочастотных колебательных мод нанокристалла. Этот вклад сильно зависит от температуры и вызывает уширение линии, которое линейно растет с увеличением температуры. Фонное уширение, обусловленное связыванием низкочастотных колебаний, дает значительный (до 20...35%) вклад в «гомогенную» ширину не только при высоких, но и при низких температурах. Третий вклад в ширину линии (см. рис. 11.9, кривая 4) наименьший. Этот вклад обусловлен изменением времени жизни экситона. Изменение состояния экситона заметно зависит от размера наночастицы вследствие захвата экситона локализованными поверхностными состояниями. Скорость захвата пропорциональна отношению площади поверхности частицы к ее объему, т. е. S/V .

11.4.4. ФОТОННЫЕ НАНОКРИСТАЛЛЫ

Наноматериалы приобретают новые свойства, связанные как с квантовым ограничением длины пробега носителей, так и с организацией нанокластеров в нанокристаллы. Пористый кремний — пример появления у наноматериалов новых оптических свойств, связанных с квантовым ограничением. Он представляет собой материал, состоящий из изогнутых кремниевых нитей нанометрового диаметра. Для кристаллического кремния радиационные переходы между валентной зоной и зоной проводимости формально запрещены по условиям симметрии. Переходы, однако, имеют место, но только с участием фононов, поэтому скорость этих радиационных переходов мала. По этой причине кремний не используется для генерации оптических сигналов.

В пористом кремнии наблюдается интенсивная фотолюминесценция, которую вначале связывали с возможным нарушением правила отбора в наносистеме, не удовлетворяющей трансляционной симметрии. Квантовые ограничения действительно являются основной причиной фотолюминесценции за счет изменения соотношения интенсивностей радиационных и нерадиационных переходов. Интенсивность радиационных переходов несколько возрастает, но интенсивность нерадиационных переходов уменьшается значительно, в частности в пористом кремнии по сравнению с кристаллическим кремнием резко убывает вероятность трехчастич-

ных оже-процессов, связанных с испусканием электронов после поглощения светового излучения.

Фотонные кристаллы образуются из нанокластеров, размеры которых сравнимы с длиной волны фотонов, например для видимого диапазона спектра это сотни нанометров. Вследствие этого в таких наноструктурах наблюдаются дифракционные процессы и выполняются условия Брэгга, подобно рассеянию рентгеновских лучей на атомной кристаллической решетке, что, в свою очередь, приводит к когерентным эффектам при рассеянии и поглощении света, причем весьма чувствительным к энергии фотонов и направлению их распространения.

Так, коэффициент отражения фотонных кристаллов периодически варьирует, что позволяет изменять оптические свойства материалов. Одномерные наноструктуры используются как интерференционные фильтры, однако большой интерес представляют трехмерные нанокристаллы. В этих наносистемах были обнаружены щели фотонных состояний в энергетических и дисперсионных спектрах, подобные запрещенным зонам в энергетических и дисперсионных спектрах электронов в атомных кристаллах. Это предсказывает существование фотонной щели с частотами, при которых фотон не может проникать внутрь кристалла и упруго отражается от нанокристаллического слоя. Перечисленные свойства фотонных кристаллов позволяют создавать наноматериалы с изменяющимися оптическими свойствами.

Для синтеза фотонных кристаллов с фотонной щелью применяются разнообразные приемы. Один из таких приемов состоит в использовании свойства сфер субмикронного (несколько сотен нанометров) размера произвольно организовываться в гранецентрированную решетку.

В результате получается синтетический опал — наноматериал, включающий монодисперсные сферы окиси кремния. Однако такой нанокристалл имеет неустойчивую фотонную щель, которая из-за его несовершенства, различного рода дефектов легко разрушается. Синтетический опал далее используется в качестве матрицы для получения полупроводникового материала, внедренного

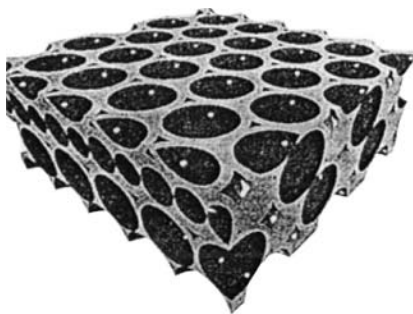


Рис. 11.10
Сечение нанокристалла, образованного после фильтрации кремния (серое поле) в структуру опала [64]

в поры нанокристаллического опала, как показано на рис. 11.10. Удаление матрицы опала позволяет получить нанокристаллический обращенный опал, в котором кремний содержит упорядоченную структуру пустот.

Согласно расчетам полупроводник, характеризующийся достаточно высоким коэффициентом отражения, будет иметь фотонную щель в структуре, что экспериментально подтверждено для фотонного кристалла из кремния.

Большой интерес вызывает создание фотонных кристаллов, которые способны к интенсивному испусканию света (например, кристаллы на основе GaS, InS, GaP) или созданию упорядоченных полостей на основе алмазной структуры, которая по расчетам может иметь большую фотонную щель и мало зависеть от дефектов и разупорядоченности полупроводниковых материалов.

11.4.5. ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КВАНТОВЫХ ЯМ

Оптические свойства наноматериалов рассматриваются в ряде работ [65...67]. Оптические свойства, связанные с межзонами переходами в квантовых ямах, отличаются от соответствующих характеристик объемных материалов, что объясняется особенностями двумерной оптической плотности и сильным электронным поглощением в двумерных системах [67].

На рис. 11.11 представлена квантовая яма (как в реальном пространстве, так и в пространстве волновых векторов), в которой осуществляются межзонавые переходы из начального состояния в валентной зоне в конечное, расположенное в зоне проводимости. Поглощение проявляется при более высоких энергиях, чем в трех-

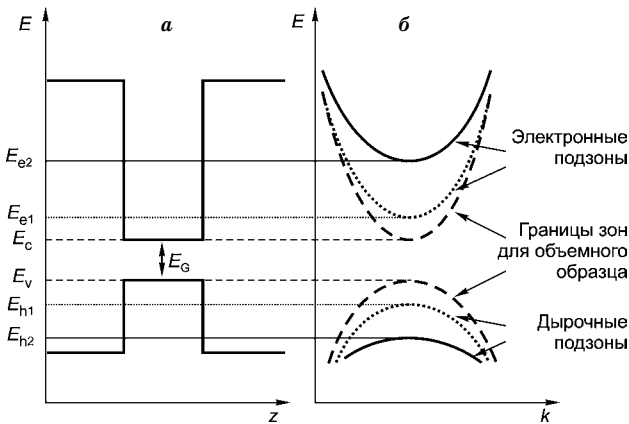


Рис. 11.11
Энергетическая диаграмма квантовой ямы:
 a — в реальном пространстве; b — в пространстве волновых векторов k .

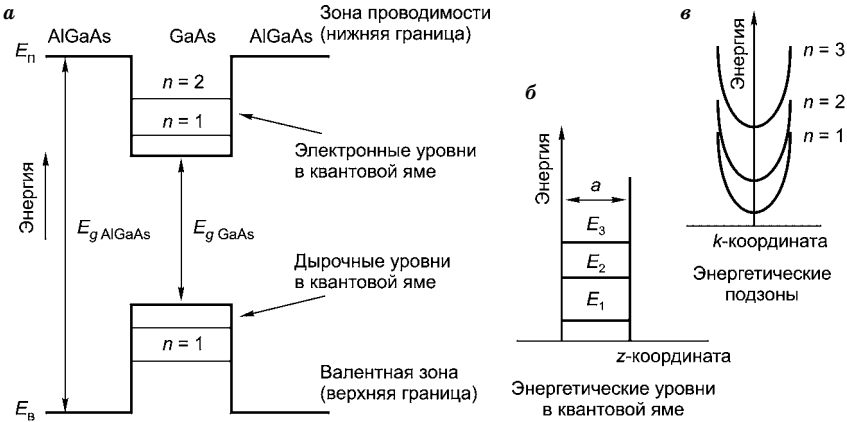


Рис. 11.12
Квантовая яма в системе AlGaAs–GaAs–AlGaAs [67]:

a — потенциальная яма; *б* — энергетические уровни; *в* — энергетические подзоны.

мерных системах, поскольку разность энергий между состояниями больше ширины запрещенной зоны полупроводника.

Широко используется двумерная полупроводниковая структура, в которой посередине располагается пленка арсенида галлия GaAs нанометровой толщины. С двух сторон от GaAs-пленки располагаются слои полупроводника, например алюмината арсенида галлия $Al_xGa_{1-x}As$, с более широкой запрещенной зоной. Так, при $x = 0,3$ запрещенная зона $Al_xGa_{1-x}As$ близка к 2 эВ, в то время как в GaAs она равна 1,4 эВ. В результате профиль потенциальной энергии близок по форме к прямоугольному с высотой барьера 0,4 эВ для электронов и 0,2 эВ для дырок.

Из-за стенок ямы движение наносителей вдоль оси Z , перпендикулярной яме, невозможно, однако в двух остальных направлениях — по осям X и Y , параллельным плоскости границы раздела, электроны остаются свободными и их движение ничем не ограничено, как показано на рис. 11.12*а*. Из квантовой механики известно, что волновые функции и энергетические уровни связанных электронных состояний в такой ситуации определяются формулами

$$\psi(z) = \left(\frac{2}{a}\right)^{1/2} \sin\left(\frac{\pi n Z}{a}\right); \tag{11.11}$$

$$E = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_b^* a^2} n^2, \tag{11.12}$$

где $n = 1, 2, \dots$; m_b^* — эффективная масса электрона при движении электрона вдоль оси Z ; a — ширина потенциальной ямы.

Из уравнения (11.12) можно найти несколько важных характеристик поведения системы. Очевидно, что квантовые эффекты должны сильно проявляться в структурах с малой шириной потенциальной ямы, причем в материалах, где эффективная масса электрона очень мала. В наноструктуре GaAs $m_e^* = 0,067m_0$ (m_0 — масса свободного электрона).

Другими словами, квантовые эффекты гораздо легче наблюдать в системах, отличающихся высокой подвижностью электронов или большой длиной их свободного пробега. Размерные квантовые эффекты гораздо проще наблюдать при низких температурах, поскольку средняя тепловая энергия носителей заряда имеет порядок КТ.

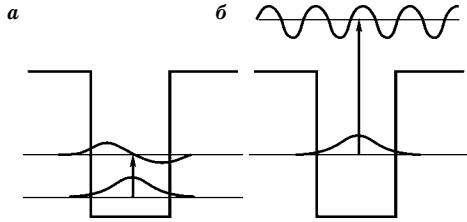
На рис. 11.12б схематически показаны дискретные значения E_n для движения электронов вдоль направления Z , а на рис. 11.12в представлены зависимости $E(p)$ для значений \vec{p} в плоскостях P_x , P_y . При этом $p = \hbar k$.

Для каждого фиксированного значения E_n значение E определяют так называемые энергетические подзоны, представленные на рис. 11.12в. Интересно, что минимальная энергия электронов E_1 отлична от нуля. Это противоречит принципам классической механики, но согласуется с законами квантовой механики. Для описываемых систем значение E , равное E_1 , называют нулевой энергией.

Из курса физики твердого тела известно, что многие физические характеристики материалов (такие как оптическое поглощение, перенос зарядов и т. п.) зависят одновременно от энергетического спектра и от вида функции плотности состояний, определяющей концентрацию электронов для каждого конкретного значения энергии. Для трехмерной электронной системы эта функция параболического вида. В двумерных системах ситуация кардинально меняется, разрешенные значения k_x , k_y имеют периодичность $2\pi/L$ (L — размер образца).

Существенные различия между трех- и двумерными системами наблюдаются в случае внутризонных переходов. Излучение или поглощение фотонов для внутризонных переходов схематически показано на рис. 11.13а. «Свободные» носители в зоне проводимости (или в валентной зоне) занимают подзоны, соответствующие уровням каждого электрона (или дырки), расположенного в данной яме. Межподзонные переходы возможны только между квантовыми состояниями внутри одной ямы. А межзонные переходы возможны между состояниями в квантовых ямах и протяженными электронными состояниями, как показано на рис. 11.13б. Такие переходы в двумерных системах могут происходить и без участия фотонов, за счет электронов (или дырок) в локализованных состояниях ям,

Рис. 11.13
 Внутризонные оптические переходы в квантовой яме:
a — внутризонные переходы; *б* — переходы между связанными состояниями в яме и протяженными состояниями.



а также между локализованными состояниями и непрерывным спектром. Более того, в двумерных системах такие переходы специально создаются для излучения света (квантовые каскадные лазеры) или его регистрации (инфракрасные фотодетекторы).

Поглощение проявляется при более высоких энергиях, чем те, что свойственны трехмерным системам, поскольку разность энергий между состояниями больше ширины запрещенной зоны полупроводника.

11.4.6. ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

Квантовые точки представляют собой нанокристаллы, обладающие всеми тремя пространственными размерами нанометрового массива.

В квантовых точках потенциалы ограничивают движение электронов по всем трем пространственным направлениям. Энергетический спектр квантовых точек содержит ряд дискретных уровней, несколько напоминающих электронные уровни изолированного атома. При этом пространственная локализация волновых функций электронов оказывает весьма существенное влияние на оптические свойства вещества.

Общими оптическими особенностями нульмерных ограниченных систем являются:

- уширение запрещенной зоны;
- повышение силы осцилляторов;
- особенности поглощения падающего света;
- уширение спектров.

Уширение запрещенной зоны — одна из важнейших особенностей оптических свойств квантовых точек. Уширение можно видеть на рис. 11.11а. В зависимости от размера *r* квантовой точки (для простоты предполагается, что она сферической формы) возможны несколько случаев. Чтобы описать их, сравним радиус квантовой точки *r* с размерами экситонов, определяемыми соответствующим боровским радиусом $r_B = \hbar/4\pi\epsilon_0\epsilon^*1/\mu e^2$ (μ — приведенная масса

экситона). В режиме так называемой «сильной локализации» ($r < r_B$) энергия квантовой локализации превышает энергию кулоновского взаимодействия, вследствие чего можно пренебречь экситонными эффектами, связанными с взаимодействием электронов и дырок. При таком подходе можно рассматривать электроны и дырки, расположенные рядом в одних и тех же квантовых точках. Известно, что кулоновское взаимодействие обратно пропорционально r , в то время как ограничивающий потенциал (т. е. энергия) обратно пропорционален r^2 . Например, боровский радиус экситона в CdS составляет 29 ангстрем (\AA), вследствие чего все нанокристаллы размером меньше 50\AA ведут себя как квантовые точки. Однако при $r \ll r_B$ квантовая точка должна рассматриваться как просто большая молекула, которую следует описывать соответствующими молекулярными орбиталями.

В режиме так называемой «слабой локализации» ($r < 4r_B$) огибающие функции практически не изменяются, хотя кинетическая энергия экситонов (связанная с движением центра масс) возрастает, вследствие чего должна уменьшаться энергия связи. Это наблюдается, например, в CdSe при размерах квантовых точек $r > 100 \text{\AA}$. В кристаллах галидов меди (CuCl, CuBr) размер экситонов r_B настолько мал ($\sim 1 \text{ нм}$), что квантовые точки практически всегда существуют в режиме «слабого ограничения».

Наиболее трудными для теоретического описания являются, естественно, системы со средней или промежуточной степенью локализации, для которых нельзя использовать предложенные выше упрощенные модели.

Повышение силы осцилляторов. Из приведенных выше данных можно вывести общую закономерность, а именно по мере уменьшения размерности системы ($3D > 2D > 1D > 0D$) электронные состояния становятся все более «концентрированными» по энергии, что и отражают соответствующие функции плотности состояний. В предельном случае (при размерности $0D$) квантовые точки ведут себя подобно атомам, обладающим хорошо выраженными энергетическими уровнями, в результате чего возрастает сила осцилляторов, соответствующих оптическим переходам. Эта особенность чрезвычайно важна для создания новых оптоэлектрических устройств. Концентрация энергетических состояний может быть использована для повышения коэффициентов усиления лазерных устройств. По мере уменьшения размерности систем в них все сильнее проявляются электрооптические эффекты, используемые для создания, например, оптоэлектронных модуляторов на квантовых ямах.

Особенности поглощения падающего света. Межподзонные оптические переходы в двумерных системах разрешены лишь тогда, когда свет распространяется в плоскости квантовой ямы, т. е. когда электрическое поле фотона перпендикулярно поверхностям раздела. Напротив, квантовые точки способны поглощать падающий свет любого направления, так как локализация по трем оптическим осям означает, что волновые функции электронов тоже квантуются по трем пространственным направлениям.

Уширение спектров. Еще одной важной особенностью оптических характеристик квантовых точек является отсутствие температурной зависимости для ширины спектральных линий, что объясняется просто тем, что в них нет непрерывных областей электронных состояний. Напротив, в одномерных и двумерных системах существуют одно и два направления для непрерывных состояний соответственно. Разумеется, говоря о дискретности спектров квантовых точек, не следует считать, что они представляют собой совершенно правильные, теоретические δ -функции, так как некий реальный разброс (~ 10 мэВ) по ширине линий всегда существует из-за неоднородного распределения размеров квантовых точек. При очень высокой однородности размеров квантовых точек ширина линий может быть снижена и до значений меньше 10 мэВ, однако, с другой стороны, при большом разбросе значений ширина линий может возрасти до 0,1 эВ. Небольшие изменения состава также являются одной из причин уширения запрещенной зоны в системах квантовых точек. Другие причины связаны с наличием примесей и с поверхностными или межфазными состояниями и т. п. Изучением собственных характеристик квантовых точек и уменьшением описанных эффектов уширения спектральных линий занимается новый раздел спектроскопии — спектроскопия изолированных квантовых точек.

Некоторые системы квантовых точек обладают другими интересными особенностями. Так, возможна самоорганизация квантовых точек. Обнаружена возможность образования трехмерных островковых структур при выращивании сверхрешеток InAs/GaAs. Процесс создания квантовых точек на основе систем типа InGaAs/GaAs изучается с целью разработок лазеров.

Смесь GdS с другими соединениями того же класса, например GaSe ($E_G = 1,75$ эВ), позволяет получать излучение практически во всем видимом диапазоне. Обнаружены нанокристаллы полупроводников, для которых характерны не прямые оптические переходы и сильная люминесценция. Из физики полупроводников известно, что эффективность излучения света объемными полупроводниками, имеющими запрещенную зону с непрямыми оптическими

переходами, незначительна. Но в нанокристаллических образцах все иначе. Например, оказалось, что излучение нанокристаллов кремния лежит не в инфракрасном диапазоне ($E_G = 1,12$ эВ), а в видимой области ($E_G \approx 2$ эВ), что объясняется уширением запрещенной зоны из-за квантовых эффектов. Эффект голубого сдвига линий связан с уменьшением размера кристаллов. Эффект повышенной люминесценции объясняется релаксацией запора сохранения волнового вектора \bar{k} (сохранения момента $\vec{p} = \hbar\bar{k}$) в условиях низкоразмерной локализации. Сильная ионизация в видимом диапазоне отмечается в пористом кремнии. Пористый кремний формируется из нульмерных и одномерных кристаллов. Очень широкий спектр эмиссии объясняется квазигауссовским распределением нанокристаллов по размерам.

11.5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ ДЛЯ РАЗРАБОТОК ЛАЗЕРОВ

Под квантово-размерными эффектами здесь понимаются специфические особенности движения носителей в ультрамалых объемах. В них размеры отдельных областей сопоставимы с длиной волны электрона или дырки. В то же время эти объемы должны позволять использовать элементы зонной теории (ширину запрещенной зоны, эффективную массу).

Слой узкозонного полупроводника, заключенный между более широкозонными полупроводниками, представляет собой потенциальную яму для носителей хотя бы одного знака. Если между полупроводниками образуется так называемый гетеропереход 1-го типа, то потенциальные ямы формируются для носителей обоих знаков (в гетеропереходах 2-го типа происходит разделение носителей по разные стороны гетероперехода). При локализации носителей в квантовой яме появляются дискретные разрешенные энергетические уровни и нижнее (основное) состояние характеризуется кинетической энергией локализации (или просто энергией локализации), отделяющей соответствующий основной уровень от дна потенциальной ямы. Кроме того, в квантовых ямах правила отбора при излучательных переходах также видоизменяются, поэтому могут получить преимущества определенные поляризации излучения и несколько измениться направленность излучения.

Таким образом, энергия перехода между основными состояниями в квантовой яме оказывается больше энергии межзонного перехода в том же материале. Это дает дополнительную возмож-

ность изменения длины волны лазерного излучения за счет изменения размеров квантовой ямы, поскольку энергия локализации в прямоугольной яме с бесконечными барьерами $E_0 = \pi^2 \hbar^2 / (md^2)$, где m — эффективная масса носителя. Эта формула дает хорошее приближение для довольно глубоких потенциальных ям. Поправка на «небесконечную» глубину становится существенной для уровней, расположенных вблизи края барьера.

Минимальную толщину ямы d_{\min} , при которой уже не обеспечивается локализация носителей, можно оценить с помощью неравенства $E_0 \gg \Delta E$, где ΔE — глубина ямы. В GaAs и близких к нему материалах d_{\min} составляет примерно 4...5 нм, а в GaN — около 2 нм. В ямах с меньшей толщиной нижний уровень «выталкивается» из ямы в сторону уровней континуума. Строго говоря, в квантовой яме всегда есть связанное состояние, но практическое значение могут иметь лишь достаточно глубокие состояния, а не те, которые легко термоионизируются.

Дискретизация спектра сводится к модификации распределения плотности состояний по энергии. Возможность управлять плотностью состояний обеспечивает существенный ресурс для улучшения лазерных характеристик. Дело сводится к следующему. Очевидно, что для работы лазера вполне достаточно, чтобы были инвертированы рабочие уровни, т. е. те уровни в зонах, которые фактически обеспечивают пороговое усиление и необходимую скорость вынужденных переходов при сверхпороговой накачке. В полупроводниках приходится также заполнять несколько уровней в зонах, которые непосредственно не участвуют в лазерном механизме. Обычная (невынужденная) рекомбинация с их участием учитывается в выражении для расчета пороговых потерь. Эти уровни по энергии расположены ниже либо выше рабочих уровней. Более низкие уровни приходится заполнять, поскольку сами они не обеспечивают достаточного усиления и для его увеличения требуется более мощная накачка. В объемном полупроводнике плотность состояний растет пропорционально квадратному корню из кинетической энергии, поэтому в нем с длинноволновой стороны от пика лазерного излучения всегда есть «неработающие» уровни. В квантовой яме плотность состояний растет скачком, и если она достаточна для получения нужного усиления, то «неработающих» уровней фактически нет.

Что касается уровней, находящихся по энергии выше рабочих, то их населенность связана с температурной размытостью квазиравновесной функции заполнения. Число носителей на этих уровнях соответствует интегралу произведения плотности состояний и функции заполнения указанного интервала энергии. Функция

заполнения определяется положением квазиуровня Ферми и температурой. Плотность состояний квантовых нитей и точек убывает с энергией, превышающей квантовый уровень, поэтому надлежащая оптимизация энергетического спектра в принципе позволяет уменьшить вклад нерабочих состояний, лежащих выше рабочего уровня. Если вышестоящий (следующий) квантовый уровень находится далеко по энергии (много больше KT) от основного уровня, то при повышении температуры хвост функции заполнения расширяется в область низкой, а в идеале нулевой плотности состояний. Отсюда следует, что в таких лазерных средах можно существенно ослаблять температурную зависимость усиления и порога генерации.

Использование квантовых эффектов в наноструктурах для снижения порога полупроводникового лазера заключается в основном в оптимизации профиля плотности состояний. Иногда ее называют «зонной инженерией». Заметим, что зонная инженерия развивалась одновременно с технологией напряженных гетероструктур. Влияние профиля плотности состояний на пороговый ток и его температурную зависимость рассматривалось еще в 1960-е гг. Фактически ослабление температурной зависимости усиления происходит в ситуации, которую можно назвать сильным вырождением. В объемном полупроводнике критерий сильного вырождения сводится к неравенству $F - E_c \gg KT$, где F — квазиуровень Ферми для электронов (для дырок соотношение аналогичное). Обобщенный критерий сильного вырождения для разных (плавных) профилей плотности состояний $p(E)$ в окрестностях квазиуровня Ферми имеет вид

$$\frac{d \ln p}{dE} \ll \frac{1}{KT}. \quad (11.13)$$

На соотношении (11.13) основан анализ порогового тока в квантово-размерных структурах. Очевидно, что в наноструктурах с пониженной размерностью это условие выполняется сравнительно легко: например, в квантовой яме плотность состояний, лежащих выше основного, вообще постоянна в некотором интервале энергий (между основным и первым возбужденным состояниями). Значит, в этом интервале энергий левая часть неравенства (11.13) зануляется. Неравенство (11.13) тем более выполняется, если его левая часть отрицательна. Вклад в температурную зависимость, однако, обусловлен наличием участка спектра плотности состояний, на котором неравенство (11.13) не выполняется.

На основании вышесказанного можно заключить, что самые экономичные лазеры создаются на основе структур с квантовыми точками.

Тестовые вопросы к главе 11
«ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОФОТОНИКИ»

- 11.1. Какие устройства относятся к нанофотонным:
- а) использующие оптоэлектронные приборы с размером областей более 10^{-6} ;
 - б) использующие оптоэлектронные приборы с размером областей менее 10^{-6} ;
 - в) использующие оптоэлектронные приборы с размером областей более 10^{-7} ;
 - г) использующие оптоэлектронные приборы с размером областей менее 10^{-7} ?
- 11.2. Какого типа лазеры обладают минимальными пороговыми токами:
- а) на основе моноперехода;
 - б) на основе одиночной гетероструктуры;
 - в) на основе квантовых ям;
 - г) на основе квантовых точек?
- 11.3. Какие наноструктуры называются квантовыми ямами:
- а) 3D;
 - б) 2D;
 - в) 1D;
 - г) 0D?
- 11.4. Какие наноструктуры называются квантовыми точками:
- а) 3D;
 - б) 2D;
 - в) 1D;
 - г) 0D?
- 11.5. Какой спектр характерен для квантовой точки:
- а) аналогичный спектру малоатомного кластера;
 - б) аналогичный спектру малоатомной молекулы;
 - в) аналогичный спектру квантовой ямы;
 - г) аналогичный спектру одиночного атома?
- 11.6. Зависят ли свойства полупроводниковых наночастиц от их размера:
- а) не зависят;
 - б) с уменьшением размеров спектр поглощения не меняется;
 - в) с уменьшением размеров спектр поглощения сдвигается в красную сторону;
 - г) с уменьшением размеров спектр поглощения смещается в голубую сторону?
- 11.7. Что называется энергетической целью:
- а) интервал энергий между верхним заполненным энергетическим уровнем валентной зоны и уровнем Ферми;
 - б) интервал энергий между верхним заполненным уровнем валентной зоны и ближайшим к нему незаполненным уровнем зоны проводимости;
 - в) интервал энергий между толчком зоны проводимости и уровнем Ферми;
 - г) интервал энергии между двумя примесными уровнями в запрещенной зоне?
- 11.8. Какими оптическими свойствами обладают металлические нанокластеры:
- а) более широкой полосой спектра поглощения, чем массивные материалы;
 - б) более узкой полосой спектра поглощения, чем массивные материалы;
 - в) постоянной диэлектрической проницаемостью;
 - г) комплексной диэлектрической проницаемостью?
- 11.9. Каких размеров может быть экситон полупроводникового нанокластера?
- а) гораздо меньше кластера;
 - б) сравнимым с кластером;
 - в) больше кластера;
 - г) гораздо больше кластера?
- 11.10. Какие фотонные кристаллы способны к интенсивному испусканию света:
- а) GaAs;
 - б) GaAlAs;
 - в) GaS;
 - г) InS?

НАНОФОТОННЫЕ ПРИБОРЫ, УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ

12.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Непрерывное решение номенклатуры и функций телекоммуникационных и информационных систем (ТК и ИС) требует адекватного развития элементной базы, основу которой составляют изделия наноэлектроники. Состояние и перспективы развития разработок наноэлектронных изделий рассматриваются в научных монографиях [65, 67, 77 и др.], учебных пособиях и учебниках [42, 76, 78, 83 и др.].

В этой главе обобщены материалы отечественных и зарубежных авторов, посвященные использованию наноэлектронных изделий в оптоэлектронике. Перспективной областью применения наноизделий является создание оптоэлектронных устройств и систем.

Для оптоэлектронных систем разработаны рассматриваемые в этой книге лазеры, источники излучения и отображения информации. Наноэлектронные лазеры на основе гетероструктур отличаются замечательной совокупностью технико-экономических показателей (минимально возможные пороговые токи, минимальные масса и габариты). С использованием нанотехнологий создаются высокоэффективные источники света и дисплеи. Этому способствует применение углеродных нанотрубок и эффекта автоэлектронной эмиссии. Широко внедряются устройства и системы отображения информации на основе органических полимеров.

Большие достижения отмечаются в области создания наноэлектронных фотоприемников, характеризующихся минимальными размерами и максимальной широкополосностью. Совместное использование наноэлектронных излучателей и фотоприемников представляет большой интерес для разработчиков волстронов, смартлинков и систем волоконно-оптической связи.

12.2. НАНОЭЛЕКТРОННЫЕ ЛАЗЕРЫ

12.2.1. НАНОЭЛЕКТРОННЫЕ ЛАЗЕРЫ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ

Как хорошо известно, для работы любого лазера необходимо обеспечить выполнение двух основных условий. Во-первых, нужно создать **инверсию заселенности** энергетических уровней, т. е. сделать так, чтобы на высоком уровне электронов было больше, чем на низком. При тепловом равновесии распределение электронов по уровням обратное. Во-вторых, каждому лазеру необходим оптический резонатор или система зеркал, которая запирает электромагнитное излучение в рабочем объеме и обеспечивает механизм вынужденной рекомбинации электронов, которые переходят из зоны проводимости в валентную зону. При вынужденной рекомбинации генерируются фотоны, имеющие ту же частоту, направление распространения и фазу, что и фотоны, индуцирующие рекомбинацию. При спонтанной рекомбинации, наоборот, генерируются фотоны произвольного направления движения и фазы.

В настоящее время самым распространенным типом полупроводникового лазера является лазер на квантовой яме в виде двойной гетероструктуры, для которой активная область представляет собой тонкий слой узкозонного полупроводника, «зажатого» между двумя широкозонными, как показано на рис. 12.1.

При достаточно малой толщине активной области последняя ведет себя как квантовая яма, и квантование энергетического спектра в ней существенно меняет свойства лазеров. К широкозонным областям присоединяются металлические контакты, через которые электроны могут непрерывно поступать в рабочую область.

Лазер работает следующим образом. Из одного контакта (широкозонного полупроводника) электроны поступают в рабочую зону, создавая в ней инверсную заселенность. Далее, переходя из

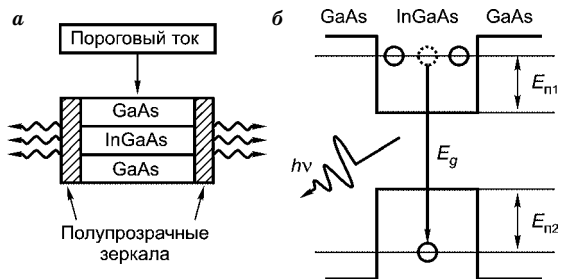


Рис. 12.1
Лазер

на квантовой яме:

а — двойная гетероструктура; б — энергетическая диаграмма.

зоны проводимости в валентную зону, они излучают кванты электромагнитного излучения, частота которого определяется условием

$$\hbar\omega = E_g + E_{\Pi 1} + E_{\Pi 2}. \quad (12.1)$$

Для того чтобы сконцентрировать генерируемое излучение в активной центральной области прибора, для внутреннего слоя подбирают показатель преломления больше, чем для внешнего. Такое соотношение можно получить, например, в системе материалов GaAs/InGaAs. В этом случае внутренняя область становится подобной волоконно-оптическому волноводу, на границах которого нанесены зеркала, формирующие резонатор.

Лазеры на квантовых ямах обладают рядом преимуществ перед обычными полупроводниковыми лазерами. Прежде всего, эти приборы можно перестраивать, управляя параметрами энергетического спектра за счет изменения толщины рабочей области. Так, при уменьшении размеров ямы минимальные энергии электронов $E_{\Pi 1}$ и $E_{\Pi 2}$ увеличиваются и тогда согласно формуле (12.1) увеличивается и частота излучения, генерируемого лазерами. Подбирая ширину квантовой ямы, можно добиться минимального затухания волны в оптической линии связи.

Другое преимущество заключается в том, что в двумерном электронном газе квантовой ямы легче создать инверсию заселенности. Это связано с иным распределением плотности состояний у краев зон. Если в массивном полупроводнике в непосредственной близости от края зоны плотность состояния мала, то в квантово-размерной системе она не убывает вблизи края, оставаясь постоянной. Поэтому лазеры на квантовых ямах очень экономны, они питаются меньшим током и дают больше света на единицу потребляемой мощности. До 60% электрической мощности преобразуется ими в свет.

В квантовых точках энергетический спектр меняется более радикально, чем в квантовых ямах. Плотность состояний может описываться δ -функцией. Таким образом, в квантовых точках отсутствуют состояния, которые не принимают участия в усилении оптического излучения, но содержат электроны. Это уменьшает потери энергии и, как следствие, уменьшает **пороговый ток** — важнейший параметр инжекционных лазеров, который равен минимальному току, пропускаемому через прибор, необходимый для лазерной генерации. В любых системах лазеров желательно обеспечивать минимально возможный пороговый ток. Предельный пороговый ток при комнатной температуре может быть снижен до 15 А/см^2 , в то время как в лазерах на квантовых ямах он составляет около 30 А/см^2 .

12.2.2. НАНОЭЛЕКТРОННЫЕ ЛАЗЕРЫ С ВЕРТИКАЛЬНЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ

Перспективы развития лазерной техники связаны с разработкой миниатюрных лазеров с малым пороговым током лазерной генерации и высокой частотой токовой модуляции излучения (десятки гигагерц). Совокупностью указанных свойств обладают нанoeлектронные лазеры, в частности полупроводниковые лазеры с вертикальными резонаторами (ЛВР) [76].

Лазеры такого типа получили название VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser) или VCL (Vertical-Cavity Laser).

Полупроводниковые ЛВР работают по тому же принципу, что и обычные полосковые полупроводниковые лазеры: в обоих типах лазеров используется резонатор Фабри–Перо и квантовое усиление в активной области достигается за счет инжекции и рекомбинации электронов и дырок. Принципиальное отличие ЛВР от полосковых полупроводниковых лазеров состоит в способе формирования лазерного резонатора. Полосковый полупроводниковый лазер содержит резонатор Фабри–Перо, образованный двумя зеркалами, получаемыми путем скола полупроводниковой пластины вдоль кристаллографических направлений. Таким образом, ось резонатора лежит в плоскости полупроводниковой пластины, и излучение лазера также параллельно плоскости исходной пластины. В полупроводниковом ЛВР резонатор Фабри–Перо образован двумя брэгговскими зеркалами, которые формируются в едином технологическом процессе роста лазерной структуры или при постростовых технологических процессах. Слои брэгговских зеркал расположены параллельно исходной подложке, а ось резонатора и направление излучения таких лазеров перпендикулярны плоскости полупроводниковой пластины, т. е. вертикальны, чем и объясняется название «лазеры с вертикальным резонатором». В англоязычной литературе наиболее распространены два варианта названия лазеров этого типа: vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) и vertical-cavity laser (VCL).

Структура лазера с вертикальным резонатором представлена на рис. 12.2.

Два брэгговских зеркала образуют резонатор лазера. Эти зеркала образованы полупроводниковыми четвертьволновыми слоями с чередующимися показателями преломления (например, $\lambda/4$ -слоями GaAs и $\lambda/4$ -слоями AlGaAs).

Между брэгговскими зеркалами лазера расположены полупроводниковые слои, содержащие активную область лазера.

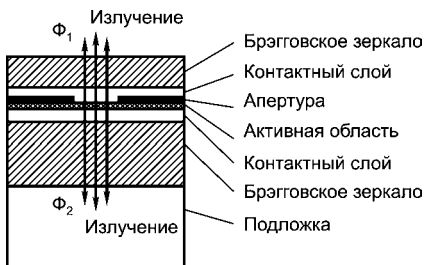


Рис. 12.2

Структура нанозлектронного лазера с вертикальным резонатором

Активная область ЛВР содержит одну или несколько полупроводниковых квантовых ям или квантовых точек.

В целях достижения высокой внутренней квантовой эффективности активная область не легируется. При использовании полупроводниковых брэгговских зеркал инжекция носителей заряда в активную область может осуществляться непо-

средственно через зеркала, для чего в одном из них (как правило, верхнем) используется p -тип легирования, а в другом (нижнем) — n -тип легирования. Лазер представляет собой $p-i-n$ -структуру.

Если в лазере используются диэлектрические брэгговские зеркала, то инжекция носителей заряда осуществляется с использованием дополнительных контактных слоев. Такой вариант инжекции называется внутррезонаторной инжекцией.

В лазерах с внутррезонаторной инжекцией расстояние между зеркалами составляет 2λ , 3λ , ..., с тем чтобы добиться приемлемого омического сопротивления контактных слоев.

У большинства лазеров длина волны резонатора определяется как расстояние между зеркалами. В ЛВР расстояние между зеркалами, как правило, меньше толщины брэгговских зеркал, образующих резонатор. Для таких ЛВР используют понятие эффективной длины резонатора. Эффективная длина резонатора определяется как некоторый участок резонатора, в котором локализована большая часть энергии моды.

Типичная апертура ЛВР составляет примерно 10 мкм, что определяет заметно меньшую расходимость лазерного излучения (единицы градусов) в них по сравнению с полосковыми лазерами, у которых расходимость излучения составляет десятки градусов в плоскости, перпендикулярной $p-n$ -переходу. Обычно апертура ЛВР имеет форму круга или квадрата, что определяет симметричную диаграмму направленности лазерного излучения.

Излучение ЛВР может выводиться как через верхнее зеркало, так и через оба зеркала. Направление для вывода излучения определяется соотношением коэффициентов отражения нижнего и верхнего зеркал.

К брэгговским зеркалам ЛВР предъявляются очень высокие требования. За счет того, что длина активной усиливающей об-

ласти ЛВР очень мала (как толщина нескольких квантовых ям — несколько десятков нанометров), усиление за один обход резонатора составляет всего лишь около 1%. Для достижения генерации в резонаторе лазера необходимы высокоэффективные зеркала с коэффициентами отражения R не ниже 0,99.

Обычно коэффициент отражения выходных зеркал ЛВР составляет 0,99...0,995, коэффициент отражения плотных зеркал ЛВР стремятся приблизить к 0,999. При использовании чередующихся четвертьволновых слоев GaAs и AlAs для достижения коэффициента отражения 0,999 их требуется 20 пар.

В коммерческих ЛВР в силу ряда технологических требований используют не бинарные соединения GaAs и AlAs, а твердые растворы, например $Al_{0,15}Ga_{0,85}As$ и $Al_{0,92}Ga_{0,08}As$, что снижает контраст показателей преломления и заметно уменьшает коэффициент отражения зеркал. Кроме того, в лазерных структурах для снижения оптического сопротивления применяют градиентные слои твердых растворов на границах слоев, что также снижает коэффициент отражения брэгговского зеркала.

Легирование полупроводниковых брэгговских зеркал тоже приводит к заметному снижению их коэффициента отражения за счет поглощения света на свободных носителях заряда. В итоге для достижения требуемого коэффициента отражения брэгговских зеркал в ЛВР приходится использовать большее число пар слоев с чередующимися показателями преломления.

В коммерческих ЛВР в выходном зеркале обычно 25 пар слоев, а в плотном зеркале — 35 пар.

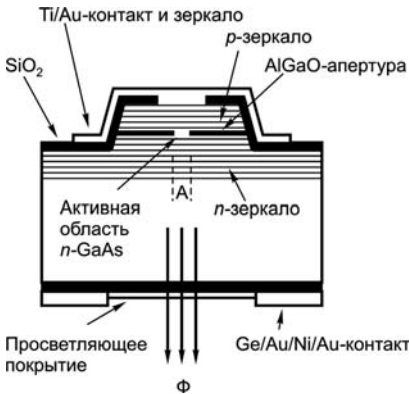


Рис. 12.3

Конструкции нанoeлектронного лазера [76]

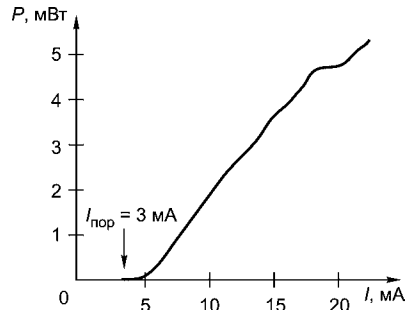


Рис. 12.4

Ватт-амперная зависимость для ЛРВ на основе квантовых ям GaAs с оксидной апертурой AlGaO 16 мкм. Непрерывная накачка, $T = 300$ К

Конструкция лазера на основе квантовых ям [76] приведена на рис. 12.3, а его ватт-амперная характеристика представлена на рис. 12.4.

Коэффициент отражения выходного зеркала этого лазера, содержащего 25 слоев, превышает уровень 0,99 на рабочей длине волны лазера 0,85 мкм. Активная область лазера содержит три квантовые ямы GaAs шириной 8 нм. Для достижения максимального коэффициента оптического ограничения квантовые ямы располагают вблизи максимума амплитуды стоячей волны.

За счет проникновения световой волны в зеркала эффективная длина резонатора $L_{\text{эфф}}$ ЛВР обычно в несколько раз превышает расстояние между брэгговскими зеркалами. Однако и с учетом этого обстоятельства из всех лазеров ЛВР отличаются наименьшей длиной резонатора. Характерная эффективная длина резонатора ЛВР составляет примерно 1 мкм. Соответственно ЛВР характеризуются наибольшим межмодовым расстоянием, существенно превосходящим ширину полосы усиления активной области лазера, что предопределяет одномодовый режим генерации лазера.

В ИФП СО РАН (г. Новосибирск) разработаны и исследованы ЛВР, содержащие одну или три квантовые ямы InGaAs в активной области и имеющие резонатор, образованный полупроводниковыми брэгговскими GaAs/AlGaAs-брэгготражателями, а также слоем Ti/Au.

Конфигурация зонных диаграмм для ЛВР с одной квантовой ямой InGaAs приведена на рис. 12.5.

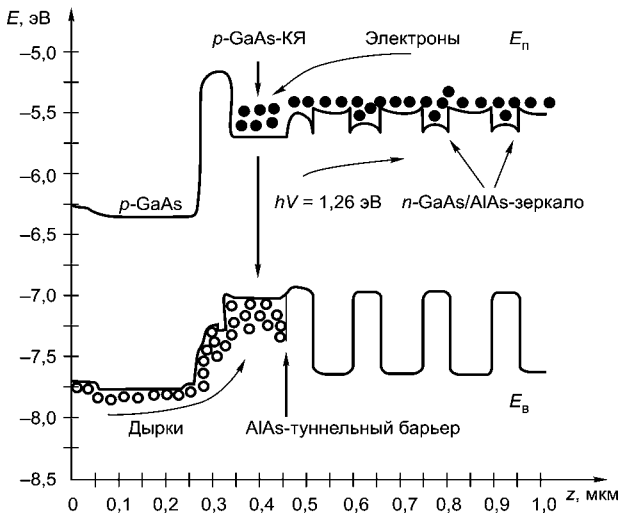


Рис. 12.5
Конфигурации
зонных диа-
грамм для ЛВР-2
при подаче на
структуру
положительного
смещения

Параметр апертуры A варьировался от 2 до 12 мкм. Излучение лазера выводилось через просветленную подложку n -GaAs.

Этот лазер отличается малыми оптическими потерями и высокой добротностью лазерного резонатора. Резонатор лазера образован высокоэффективным низколегированным (выходное зеркало) и нелегированным (верхнее зеркало) отражателями, что значительно снижает оптические потери поглощения свободными носителями заряда. С целью уменьшения оптических потерь все высоколегированные слои (контактные, апертурные, туннельные) располагаются в узлах стоячей волны.

Верхнее зеркало, образованное слоями GaAs/Al_{0,95}Ga_{0,05}Ox и Ti/Au, характеризуется очень высоким коэффициентом отражения в широком спектральном диапазоне (700...1200 нм). В центре этого диапазона расчетное значение коэффициента отражения зеркала составляет 0,9999.

Выходное GaAs/AlAs-зеркало также характеризуется высоким коэффициентом отражения (0,9989).

Ватт-амперные характеристики лазера с апертурой $A = 8$ мкм, работающего в режиме непрерывной накачки, представлены на рис. 12.6. Пороговый ток лазера $I_{\text{пор}} = 0,6$ мА при $T = 300$ К, внешняя квантовая эффективность $\eta = 6\%$; рабочая длина волны $\lambda = 930$ нм, $1 - \eta = 31\%$, $I_{\text{пор}} = 30$ мкА; $2 - \eta = 6\%$, $I_{\text{пор}} = 600$ мкА.

При снижении температуры растет коэффициент квантового усиления, а также увеличивается смещение максимума полосы квантового усиления и положения резонанса лазера в коротковолновую область. Максимум полосы усиления смещается в коротковолновую область за счет увеличения ширины запрещенной зоны InGaAs. Положение резонанса ЛВР смещается в коротковолновую область при снижении температуры за счет уменьшения показателя преломления материалов, образующих лазерный резонатор.

При снижении температуры до $T = 80$ К расчетное значение максимума полосы квантового усиления составляет 916 нм, а расчетное значение резонансной длины волны лазера — 918 нм.

На рис. 12.7 представлены ватт-амперные характеристики

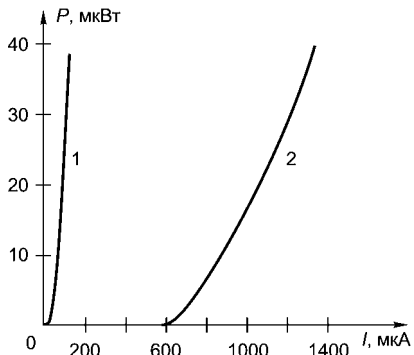


Рис. 12.6
Ватт-амперные характеристики ЛВР-2 с апертурой $A = 8$ мкм при 80 К (1) и 300 К (2)

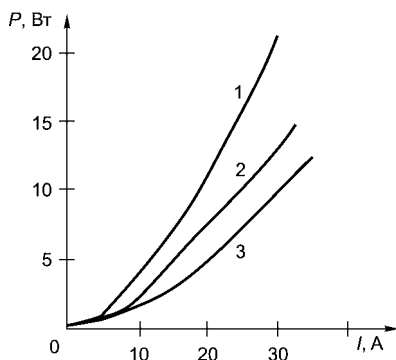


Рис. 12.7
 Ватт-амперные характеристики ЛВР-1 с апертурой $A = 500$ мкм, $\tau = 0,5$ мкм:
 1 — при 250 К; 2 — при 275 К; 3 — при 300 К.

лазера с тремя квантовыми ямами с апертурой $A = 500$ мкм при разных температурах. Лазер позволяет получить рекордно высокую выходную мощность ЛВР (до 10 Вт при $T = 300$ К и 20 Вт при $T = 250$ К в импульсном режиме); $f = 1$ кГц.

Основные достоинства наноэлектронных ЛВР-лазеров:

- низкие пороговый и рабочий токи за счет малого объема резонатора ЛВР;
- миниатюрность лазерных источников;
- малая расходимость излучения, симметричная диаграмма направленности излучения за счет относительно больших и симметричных апертур;
- высокая эффективность ввода излучения ЛВР в оптическое волокно. За счет хорошего согласования параметров излучения лазера с числовой апертурой волокна она может превышать 90%;
- сверхвысокие частоты токовой модуляции (до 20 ГГц в настоящее время) за счет сверхмалой длины и малого объема лазерного резонатора;
- одномодовый режим работы, определяемый большим межмодовым расстоянием, которое задается сверхмалой длиной резонатора;
- высокая температурная стабильность длины волны генерации, определяемая низким температурным коэффициентом изменения положения резонанса Фабри–Перо. Обычно в ЛВР $d\lambda/dT \approx 0,06$ нм/град, т. е. в пять раз ниже, чем в полупроводниковых лазерах;
- возможность создания линеек и матриц ЛВР с большим числом элементов, что необходимо для быстродействующих оптических систем передачи и обработки информации;
- возможность создания миниатюрных мощных лазеров.

Недостатком наноэлектронных лазеров следует считать высокую стоимость технологического оборудования и сложность технологических процессов, используемых при создании прецизионных и многослойных гетероструктур. Рост таких структур является предельно сложной задачей для современных технологий молекулярно-лучевой эпитаксии и эпитаксии из металлоорганических соединений.

Число слоев лазерной структуры может составлять сотни и в ряде случаев превышать тысячу, при этом требуемая точность задания толщины слоев составляет около 1%.

12.2.3. ОПТИЧЕСКИЕ МОДУЛЯТОРЫ

Структуры с квантовыми ямами могут использоваться не только для генерации, но и для модуляции светового излучения из области межзонного оптического поглощения. Физической основой эффекта модуляции являются два следующих экспериментальных факта:

- в структурах с квантовыми ямами наблюдаются резкие и значительно более интенсивные, чем в однородных полупроводниках, линии экситонного поглощения, причем не только при низкой, но и при комнатной температуре;
- спектральное положение линий заметно сдвигается при приложении сильного электрического поля перпендикулярно слоям гетероструктуры.

Эти факты нуждаются в некоторых пояснениях. Первый связан с понятием экситона — электрона и дырки, неразрывно связанных за счет кулоновского взаимодействия. При этом электрон находится в зоне проводимости, а дырка — в валентной зоне. В результате совместного движения электрона и дырки экситон может перемещаться по объему полупроводника, не перенося при этом заряд.

Потенциальные ямы низкоразмерных квантовых структур изменяют свойства не только свободных электронов, но и связанных электронов в экситонных состояниях.

Расчеты на основе уравнения Шредингера показывают, что главное отличие квазидвумерного экситона от трехмерного заключается в увеличении энергии связи экситона в квантовой яме. Экситонные эффекты в квантово-размерных структурах выражены значительно ярче, чем в обычном объемном образце. Поэтому экситонные пики в спектре поглощения таких структур могут наблюдаться при температурах вплоть до комнатной. Так, у квантовых

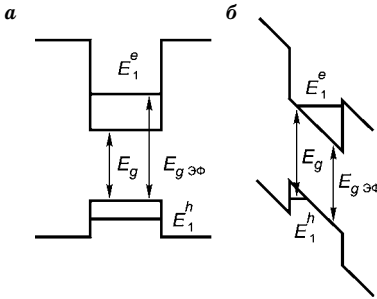


Рис. 12.8
Энергетический спектр
квантовой ямы:
a — электрическое поле отсут-
ствует; *б* — электрическое поле
присутствует.

ям толщиной около 4,6 нм на системе материалов GaAs/AlGaAs такие пики наблюдаются даже при 500 К.

Что касается второго факта, то следует отметить, что в однородных полупроводниках электрическое поле разрушает экситоны, растаскивая электрон и дырку в разные стороны. Наличие же квантовой ямы позволяет без вреда для экситона приложить в поперечном направлении достаточно сильное поле, поскольку стенки ямы не позволяют электрону и дырке разойтись. Поэтому экситонная линия поглощения в поле не исчезает, но существенно сдвигается.

Это обусловлено двумя факторами.

Во-первых, поле искажает форму самой квантовой ямы, превращая ее из прямоугольной в трапециевидную, как показано на рис. 12.8.

При этом меняются энергии квантовых уровней как в зоне проводимости E_N^e , так и в валентной зоне (E_N^h), а вместе с ними и эффективная ширина запрещенной зоны

$$E_{g\Delta\Phi} = E_3 + E_1^e + E_1^h. \quad (12.2)$$

Во-вторых, энергия связи экситона E_{ex} хотя и не обращается в нуль, как было отмечено, тем не менее зависит от приложенного поля. В результате спектральное положение экситонной линии ω_{ex}

$$\hbar\omega_{ex} = E_{g\Delta\Phi} - E_{ex}. \quad (12.3)$$

сильно зависит от напряженности электрического поля E .

Поскольку экситонная линия в спектре поглощения весьма резкая, то коэффициент поглощения α_{Π} света с частотой вблизи этой линии очень сильно меняется при изменении положения линии. Это делает весьма эффективной модуляцию света с помощью приложенного электрического поля. Ожидается, что оптические модуляторы на основе квантовых ям найдут широкое применение в системах оптической передачи информации.

12.3. НАНОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

12.3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

С позиций физики агрегатное состояние вещества определяется соотношением средней кинетической энергии теплового движения молекул и потенциальной энергии отрыва от поверхности. Дело в том, что, в отличие от дальнедействующих сил — гравитационных, электромагнитных, силы молекулярного взаимодействия короткодействующие, иными словами, имеют конечный радиус действия. Газы — это вещества, кинетическая энергия которых выше энергии отрыва, поэтому взаимодействия молекул случайны, а их основное «желание» — разбежаться, они его реализуют немедленно. Жидкости, в принципе, приграничная область. Их молекулы достаточно быстры, чтобы бежать от соседей, но не столь энергичны, чтобы оторваться от коллектива. Средняя кинетическая энергия «членов жидкого сообщества» выше энергии молекулярного взаимодействия, но ниже энергии отрыва от поверхности. Отсюда главные свойства жидких сред: текучесть и способность сохранять объем. Жидкая среда по физической классике — это неупорядоченное сообщество.

Для твердых тел характерен дальний порядок. В этом случае «тепловые метания» молекул меньше радиуса взаимодействия, что превращает их в оседлые члены сообщества. Некоторые жидкости (прежде всего высокомолекулярные органические соединения) при охлаждении, постепенно отвердевая, переходят в аморфное или стеклообразное состояние, в которых сохраняется присущий жидкостям беспорядок размещения элементов, но проявляется оседлость, характерная для молекул твердых тел. Однако настоящие твердые тела — это кристаллы, в которых местоположение любой молекулы по отношению к остальным определено кристаллической системой среды. Это и называют дальним порядком. Установлено место для каждого члена, форма элементарной (кристаллической) ячейки и форма самого монокристалла. Встречаются чаще всего поликристаллические вещества, составленные из множества спаянных мелких кристаллов. Металлы, камни — большая часть неорганических веществ, используемых нами, — поликристаллические.

Главная особенность жидких кристаллов укладывается в ту стройную физическую схему агрегатных состояний вещества, которая описана выше. Для жидких кристаллов характерны и текучесть,

и дальний порядок. Отягощенный повседневным опытом разум с большим трудом представляет такое, почти невозможное сочетание. Наука называет его мезофазой, т. е. промежуточной (в данном случае между кристаллической и жидкой фазами агрегатного состояния) фазой. Мир неорганической химии подобного не знает. В какой-то мере жидкокристаллические свойства присущи воде, особенно при температуре, близкой к точке замерзания.

Вода — это вещество настолько исключительное, что именно в нем можно заподозрить промысел божий. Воде присущ почти необозримый спектр аномальных свойств, без которых была бы невозможна сама Жизнь! Максимальной плотности вода достигает при температуре на четыре градуса выше точки замерзания — это единственное вещество с такой особенностью. Поэтому лед плавает, а не тонет, защищая все живое в толще воды. Вода — универсальный растворитель. Диэлектрическая проницаемость воды намного выше нормы для жидких сред. И многое, многое другое... Частично уникальность физико-химических свойств воды можно объяснить тем, что H_2O — только идеализированная форма главного вещества жизни, а на деле сложный полимер, состав и форма которого весьма продуманно, с позиций влияния на биологические процессы, зависят от температуры.

Все известные жидкокристаллические среды пришли из органики, что далеко не случайно. Главное требование к претендентам — резкая анизотропия формы. Это может быть распрямленная нитевидная молекула или гантелеобразная. Известны жидкие кристаллы, образованные молекулами в виде дисков, укладываемых в столбики, и даже гребнеобразные. Сложные полимеры «предпочитают» скручиваться в клубки, поэтому молекулы жидких кристаллов обычно содержат элементы, препятствующие скручиванию: бензольные кольца.

Свойства трех типов жидких кристаллов — смектических, нематических и холестерических — подробно рассмотрены в главе 8 этой книги.

В достаточно больших объемах кристаллической жидкости образуются домены, физические свойства которых подобны кристаллам. Однако в целом кристаллическая жидкость проявляет свойства, подобные обычным жидкостям. Доменная структура жидких кристаллов образуется по тем же причинам и законам, что и в сегнетоэлектриках и ферромагнетиках. Ситуация резко меняется в пленках, толщина которых сопоставима с радиусом взаимодействия молекул жидкости и пластин, формирующих слой. Это важно подчеркнуть, поскольку именно взаимодействие

жидкого кристалла и формообразующих элементов создает тот легко управляемый прибор, который столь активно встраивается в современную электронную технику.

Жидкокристаллическое состояние довольно неустойчиво и по этой причине весьма подвержено внешнему влиянию. Хорошо известно и давно используется термооптическое явление — изменение цвета жидкого кристалла в зависимости от температуры. Термооптические жидкокристаллические пленки способны регистрировать температуру с точностью до долей градуса и используются для контроля тепловых полей. К примеру, в медицине с их помощью можно определить разницу температур различных участков тела и тем самым выявить воспаленные области. В промышленности можно вести поиск перегретых участков аппаратуры. Чувствительны жидкие кристаллы и к давлению.

Жидкие кристаллы обладают резко выраженной анизотропией (зависимость физических параметров от направления — характерная особенность всех кристаллов, кроме кубических) вязкости, упругости, электропроводности, диэлектрической проницаемости и многих других параметров. Управлять этими параметрами можно, например, с помощью электрического и магнитного поля, добиваясь самых разных оптических эффектов.

Приложенное к жидкому кристаллу электрическое поле или протекающий через среду электрический ток способны переориентировать молекулы. Если на жидкий кристалл воздействовать переменным током достаточной силы, то молекулы жидкого кристалла будут закручиваться. В итоге в среде возникнут кавитационные микровихри. Каждый такой вихрь является по отношению к свету рассеивающим элементом. Подобное воздействие приводит к помутнению и окрашиванию среды. Наблюдатель воспринимает такой вихрь как помутнение и окрашивание среды. Именно этот эффект и используется в индикаторах, где достаточно двух положений: есть эффект и нет эффекта (есть помутнение или его нет). Там, где важно воспроизведение градаций, используются электрооптические эффекты двойного лучепреломления и оптической активности.

Оптика кристаллов существенно отличается от оптики, которую мы знаем из опыта работы со стеклянными приборами, причем большую роль играет поляризация. Каждый фотон определенным образом поляризован в плоскости, ортогональной направлению распространения. В целом же световой поток не поляризован или, как часто говорят, естественно поляризован, поскольку функции состояния поляризации отдельных фотонов случайны.

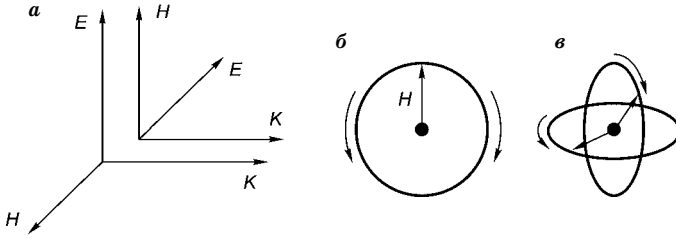


Рис. 12.9
Ортогональные функции состояния поляризации света

В анизотропной и оптически активной среде могут распространяться волны только строго определенной поляризации — линейной, круговой или эллиптической, как показано на рис. 12.9.

Электромагнитные волны можно характеризовать векторами электрической E , магнитной H напряженности и волновым вектором K . Все эти векторы взаимно ортогональны. По давней традиции за направление (вектор) поляризации электромагнитной волны принимают направление вектора напряженности магнитного поля H световой волны. При линейной поляризации направление этого вектора сохраняется в пространстве (рис. 12.9а). Другая функция поляризации — круговая. В этом случае вектор поляризации вращается, за один период волны описывая полный круг (рис. 12.9б).

Представим, что вращающийся вектор поляризации — штопор. Если такой штопор ввинчивается в направлении волнового вектора, то волну называют правой (правоциркулярной), если, напротив, вывинчивается — то левой (левоциркулярной). Волны с правой и левой круговой поляризацией по этой функции ортогональны. В некоторых случаях возникают волны с эллиптической поляризацией (рис. 12.9в).

В анизотропных средах могут распространяться только линейно поляризованные волны. При заданном направлении света разрешены лишь два ортогональных направления поляризации, определяемые параметрами анизотропии среды, — это важно, поскольку именно с этим обстоятельством тесно связана электрооптическая модуляция света. В оптически активных средах разрешены две круговые поляризации — правая и левая. Эллиптическая поляризация характерна для анизотропных сред с заметным поглощением излучения или зон вблизи оптической оси одноосных анизотропных сред, обладающих также и оптической активностью. Скорости ортогонально поляризованных волн во всех рассмотренных случаях различны.

Низкочастотное электромагнитное поле способно в довольно широких пределах менять скорости световых волн. Зависимость фазовой скорости света от напряженности электрического поля и называют электрооптическим эффектом, который используется для модуляции света в жидкокристаллических дисплеях и телевизорах.

12.3.2. ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЯТОР

Конструкция электрооптического модулятора довольно проста. Она представлена на рис. 12.10. Электрооптическая ячейка (например, сосуд с нематическим жидким кристаллом) размещена между прозрачными электродами, создающими в среде электрическое поле.

Весь этот модуль, в свою очередь, размещен между поляризаторами, причем выходной по свету поляризатор называют анализатором. Поляризатор — это оптический прибор, который из естественно поляризованного света вырезает линейно поляризованный компонент. На эту операцию тратится половина светового потока. Пленочные поляризаторы, а чаще всего используются именно они, просто поглощают отсекаемый компонент. Однако в тех случаях, когда речь идет о модуляции световых потоков очень высокой интенсивности, поглощение энергии может привести к опасным перегревам поляризатора.

За поляризатором световой поток линейно поляризован вдоль вектора P_n . В анизотропной среде могут распространяться только волны, поляризованные вдоль направлений, определяемых кристаллом, — пусть это будут векторы P_1 и P_2 . Падающий на электрооптическую ячейку световой поток разделяется на две компоненты, поляризованных вдоль собственных направлений распространения среды. Интенсивности этих компонент пропорциональны косинусам углов между направлениями поляризации падающего света и собственными направлениями распространения волн в ЖК. Если эти углы 45° , то интенсивности компонент равны. Именно так и ориентируют входной поляризатор. Собственные векторы поляриза-

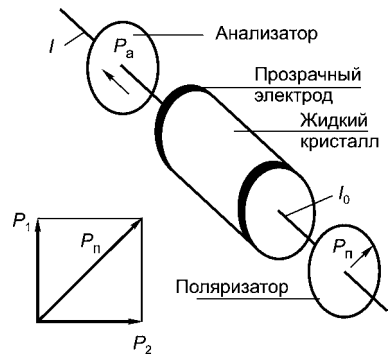


Рис. 12.10 Электрооптический модулятор

ции анализатора и поляризатора обычно либо скрещены (ортогональны), либо параллельны. При скрещенных поляризаторах модуляция позитивная, при параллельных — негативная.

Коэффициенты преломления анизотропной среды для волн с поляризациями P_1 и P_2 различны, различны и фазовые скорости этих волн. В итоге одна компонента отстает от другой по фазе. На выходе ячейки компоненты объединяются в один поток (интерferируют). При этом из-за приобретенного сдвига фаз функция поляризации меняется и становится эллиптической. Приборов, способных регистрировать фазовые сдвиги или функцию поляризации, в принципе нет, и приходится прибегать к косвенным методам — преобразованию фазового сдвига в изменение интенсивности потока. Именно эту функцию и выполняет анализатор. Он просто вырезает из эллиптически поляризованной волны компоненту, поляризация которой задана анализатором. Интенсивность этой компоненты пропорциональна косинусу удвоенного фазового сдвига:

$$I = I_0(0,5 + \cos 2\Delta\varphi). \quad (12.4)$$

Диэлектрическая проницаемость и коэффициенты преломления компоненты в ячейке зависят от приложенного к электродам электрического напряжения. Поэтому от напряжения будет зависеть и фазовый сдвиг. Если фазовый сдвиг линейно зависит от напряжения, то функцию, соответствующую выражению (12.4), можно рассматривать как модуляционную характеристику. В действительности она сложнее.

В основе управления жидкокристаллической средой лежит переориентация молекул — процесс, зависящий от вязкости среды, характера сил взаимодействия с границами ячейки и многих других факторов.

При использовании оптически активных жидких кристаллов конструкция модулятора та же, что и в рассмотренном выше случае анизотропной среды. Отличие только в функциях поляризации компонент в кристалле. Вошедшая в оптически активную среду волна распадается на круговые волны с левой и правой циркуляциями вектора поляризации. И в этом случае скорости компонент различны, а фазовый сдвиг зависит от приложенного напряжения. На выходе из ячейки волны интерferируют, в итоге образуется линейно поляризованная волна, повернутая относительно поляризатора на угол, равный фазовому сдвигу. Анализатор вырезает соответствующую компоненту. Так формируется волна, модулированная по интенсивности.

12.3.3. СВЕТОКЛАПАННЫЕ МОДУЛЯТОРЫ

Оптические модуляторы, обеспечивающие пространственную модуляцию, часто называют светоклапанными, поскольку процесс модуляции можно описать с помощью некоторого виртуального перемещаемого окошка переменной прозрачности. На стеклянные пластины наносят полосковые электроды. Две пластины соединяют, оставляя между ними зазор, который заполняют жидким кристаллом. Полосковые решетки пластин скрещены.

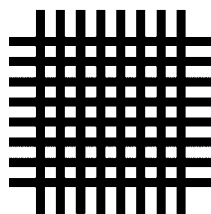
В точках пересечения полосковых электродов образуются конденсаторы — по сути, элементарные модуляторы. Остается добавить поляризатор и анализатор — и светоклапанный модулятор на жидком кристалле готов. Его конструкция представлена на рис. 12.11.

В зависимости от назначения, способов коммутации и других факторов к элементам представленной базовой конструкции могут добавляться другие элементы. К примеру, к местам пересечения полосковых электродов обычно подсоединяют МОП-транзисторы, подключая их затворы к горизонтальным электродам, а истоки — к вертикальным. Если панель предназначена для воспроизведения цветного изображения, используют цветные фильтры RGB. Размеры и форма элемента цветного фильтра соответствуют размерам модулирующей ячейки. В каждой последующей строке фильтры сдвигаются на один элемент. Это позволяет избежать визуализации вертикальных структур. Однако в этом случае проявляются диагональные структуры.

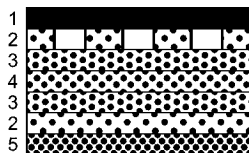
Число строк и ячеек в строках и панели зависит от стандарта, для работы в котором предназначена панель.

12.3.4. ПЛОСКИЕ ТЕЛЕВИЗОРЫ, ДИСПЛЕИ И СВЕТОКЛАПАННЫЕ МОДУЛЯТОРЫ ВИДЕОПРОЕКТОРОВ

Панели с активными ячейками на жидких кристаллах — довольно удобный прибор для воспроизведения изображений. При подаче потенциала на пару полосовых электродов активизируется ячейка, на которой пересекаются вертикальный и горизонтальный



скрещенные электроды



- 1 — поляризатор
- 2 — электроды
- 3 — подложка
- 4 — жидкий кристалл
- 5 — анализатор

Рис. 12.11
Конструкция светоклапанного модулятора

электроды. Коммутируя потенциалы по тем или иным законам, можно реализовать самые разные режимы перемещения активного «окна», включая и случайные. Эта особенность полезна для ряда специальных приложений. Чаще всего — и это естественно — применяются стандартные режимы развертки, используемые в телевидении и компьютерах.

В состав ЖК-панели, естественно, входят и схемы управления, одна из основных функций которых — коммутация управляющих импульсов. Все панели содержат схемы кадровой и строчной развертки. Видеосигнал представлен последовательностью импульсов-отсчетов. Тактовая частота определяется стандартом воспроизводимого сигнала. В принципе, ЖК-панели могут быть многостандартными и работать с телевизионными и компьютерными сигналами. Схема строчной развертки переключает с тактовой частотой импульсы-отсчеты видеосигнала с одного вертикального электрода на другой. Схема кадровой развертки в интервале строчного гасящего импульса служит для перекоммутации горизонтальных электродов.

В современных схемах управления ЖК-панелями используют самые разные ухищрения, позволяющие упростить их, исправить их недостатки и т. п. Уже упоминалось, что модуляционная характеристика прибора существенно нелинейна, из-за чего заметно снижается число передаваемых градаций. Элементы нелинейной обработки видеосигнала позволяют существенно ослабить влияние нелинейности модулятора на качество изображения. Применение сдвоенных схем строчной развертки, одна из которых управляет нечетными электродами, а другая — четными, позволяет понизить тактовые частоты строчной развертки. Примеры подобного рода можно множить и множить. Современная интегральная техника готова предложить довольно сложные электронные схемы, размещенные на ограниченном пространстве стандартного чипа.

Энергопотребление экранов и дисплеев на жидких кристаллах незначительно. В них не используются дефицитные и дорогостоящие детали. Тем не менее ЖК-экраны в сто и более раз дороже аналогичных экранов на кинескопах. Это сдерживает массовое применение таких экранов в бытовой технике, где наиболее ходовыми являются телевизоры с небольшими экранами, например прогулочные. Без ЖК-дисплеев трудно представить портативные компьютеры, электронные записные книжки и т. п.

ЖК-экраны плоских телевизоров и дисплеев работают на про-свет. В этом случае за ячейкой, если смотреть с лицевой стороны

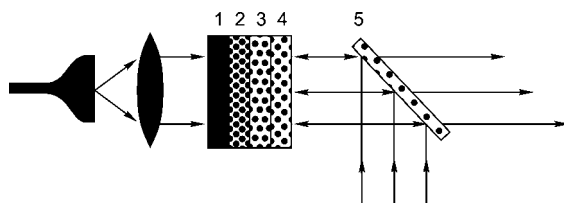
экрана, размещают источник света. Причем входящий световой поток должен иметь довольно низкую расходимость. Скрещенными поляризаторами в отсутствие модуляции такой поток задерживается полностью, а вот расходящийся поток полностью не перекрывается, и в этом заключается эффект просачивания. Просочившийся компонент в модуляции не участвует и образует фоновую засветку, снижающую контрастность воспроизводимого изображения.

При достаточно малых углах расходимости просачивание относительно мало, но, начиная с некоторого угла, быстро нарастает. Конкретные критические углы расходимости зависят от длины пути света в ячейке, разности обыкновенного и необыкновенного коэффициентов преломления жидкого кристалла и некоторых других физических параметров среды. Эффект просачивания и определяет требования к направленности используемого светового потока. При необходимости посредством направленного излучения добиваются того, что изображение на ЖК-экране воспринимается лишь в узком интервале углов наблюдения ($10...15^\circ$). Изобретательская мысль не могла пройти мимо этого недостатка. Специалисты фирмы Uchida разработали так называемую трехмерную ячейку, в которой интервалы углов наблюдения расширены примерно в два раза. Около десятка ведущих фирм — производителей ЖК-панелей уже используют технологию трехмерных ячеек.

Изобретатели ищут новые способы управления ячейками панели, поскольку традиционное решение, связанное с коммутацией системы скрещенных полосковых электродов, не во всем удовлетворительно. Интересное решение этой проблемы применено в видеопроекторе ILA фирмы JVC. В качестве светоклапанного модулятора используется оптронная пара «фотосопротивление — электрооптическая ячейка». Конструкция такого прибора представлена на рис. 12.12.

Рабочими элементами ЖК-панели являются фотосопротивление, интерференционный отражающий слой, слой жидкого кристалла, прозрачная пластина с токопроводящим слоем. Изображение, воспроизводимое кинескопом, проецируется на фотосо-

Рис. 12.12
Светомодулирующий блок видеопроектора ILA
1 — фотосопротивление; 2 — диэлектрическое зеркало; 3 — жидкий кристалл; 4 — прозрачный электрод; 5 — зеркало-поляризатор



противление (фоторезист). Сопротивление фоторезиста зависит от уровня его освещенности. В соответствии с распределением темных и светлых участков меняется сопротивление на отдельных участках. Вследствие этого меняется и электрический потенциал. Таким образом, в жидком кристалле формируется неоднородное поле электрической напряженности, функция распределения потенциала в котором повторяет изображение на поверхности фотосопротивления.

Светоклапанный блок принципиально работает только на отражение. И если использовать обычные пленочные поляризаторы, то поляризующему слою придется выполнять одновременно функции поляризатора и анализатора. Как уже указывалось, модуляция в этом случае негативная. В том нет большой беды, поскольку исправить негатив на позитив можно электронными средствами. Хуже другое: по многим причинам использовать весь динамический диапазон модулятора света крайне нежелательно, а при меньших индексах появляется остаточный световой поток, заметно снижающий контрастность. Обычная мера борьбы с этим недостатком — введение в схему дополнительного элемента, за один проход светового потока сдвигающего фазу компонентов на 45° , а за два прохода (туда и обратно) — на 90° . В итоге схема, работающая с отраженным потоком, при одном поляризаторе превращается в схему модуляции со скрещенными поляризатором и анализатором. В проекторе ILA фирма JVC нашла иное решение.

Известной американской корпорацией Hughes Aircraft Corp. создан оригинальный поляризующий элемент — зеркало, которое при падении света под углом 45° пропускает компонент, поляризованный вдоль зеркальной поверхности, и отражает компонент с ортогональной поляризацией (в данном случае направление поляризации отраженного луча совпадает с направлением проходящей волны). Благодаря этой особенности зеркало одновременно служит поляризатором и анализатором. Но главное другое: в схеме с зеркалом-поляризатором нет элементов, которые должны поглощать отсекаемую часть светового потока. Все лишнее просто отводится в сторону источника, где и рассеивается. Поэтому в сравнении с видеопроекторами, где для поляризации используется абсорбционная анизотропия, поляризующие пленки, видеопроекторы ILA могут работать с более мощными световыми потоками. Это серьезное преимущество.

Итак, создатели ILA рискнули вернуть в видеопроектор кинескопы, сохранив за ними функцию формирования изображения, а по сути — развертки. Кинескопам при этом не надо перенапрягаться, чтобы выдать как можно более яркий световой поток. Следовательно, резко возрастает надежность их работы. Принципи-

альное отсутствие в светоклапанном модуляторе светопоглощающих элементов позволяет свободно распорядиться мощностью используемых световых потоков.

Еще одна оригинальная идея воплощена в плазматроне — гибриде ЖК-дисплея и газоразрядных элементов. Первый шаг в направлении создания плазматрона около семи лет назад сделала фирма Tektronix. Технологические трудности изготовления матрицы плазматрона два года назад преодолела фирма Sony. Первый образец плоского телевизора — плазматрона был показан в 1995 г. на выставке в Берлине. Основная идея, реализованная в плазматроне, — это замена горизонтальных полосковых электродов газоразрядными каналами. В качестве источника направленного света в плазматроне используется «стена», составленная из люминесцентных ламп.

Можно с уверенностью сказать, что для совершенствования ЖК-панелей все еще остаются немалые резервы. Этим занимаются самые знаменитые компании мира, среди них, кроме уже названных, особо активны Sharp, Toshiba, Hitachi, NEC. В группу «сильнейших» стремительно ворвался Samsung. Среди российских организаций наиболее известен НИИ «Платан», где разработаны ЖК-устройства самого разного назначения.

12.3.5. ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ДИСПЛЕИ ШИРОКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Жидкокристаллические дисплеи находят широкое применение в сотовых аппаратах, видеокамерах, телевизорах и т. д.

Особенности конструкции и принципа работы жидкокристаллических дисплеев рассмотрим на примере изделий, выпускаемых фирмами LG, Philips и подробно описанных в литературе [85].

Продукцией фирмы, объединяющей LG и Philips, являются дисплеи TFT LCD (Thin Film Transistor Liquid Crystal Display).

Основу таких дисплеев составляет матрица, содержащая определенное количество элементов изображения — пикселей. Каждый пиксел цветного дисплея состоит из трех субпикселей: красного (R), зеленого (G) и синего (B).

Субпиксели не излучают свет, а только меняют прозрачность. Поэтому LCD-дисплеи требуют подсветки, для которой часто используют люминесцентные лампы с холодными катодами CCFL (Cold Cathode Fluorescent Lamp).

В каждом субпикселе поляризованным световым потоком управляет напряжение, приложенное к жидкому кристаллу. Это напряжение изменяет угол поворота вектора поляризации жидкого

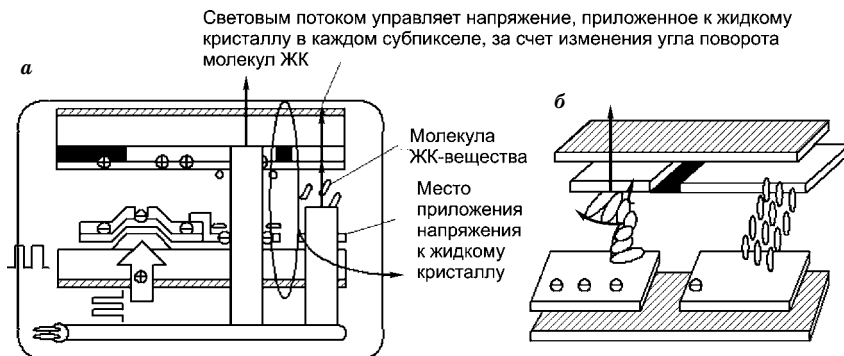


Рис. 12.13
Конструкция дисплея TFT LCD (а), фрагмент конструкции, иллюстрирующий работу ячейки (б)

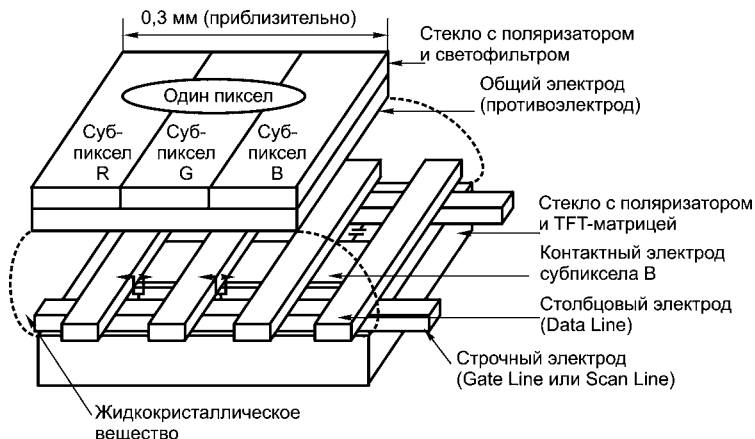


Рис. 12.14
Особенности конструкции TFT LCD

кристалла и, как следствие, поворачивает плоскость поляризации и изменяет коэффициент пропускания светового потока субпикселем. Каждым субпикселем управляет тонкопленочный полевой транзистор (ТФТ), встроенный в ячейку этого субпиксела. Конструктивно дисплей TFT LCD состоит из двух прозрачных параллельных пластин — подложек, между которыми находится ЖК-вещество, как показано на рис. 12.13а.

На одной из этих прозрачных пластин находятся светофильтр и прозрачный общий электрод (противоэлектрод), а на другой — матрица из полевых транзисторов ТФТ, прозрачные контактные электроды и заполняющие конденсаторы. В каждом таком конденсато-

ре одной обкладкой является контактная площадка субпиксела, а другой — строчный электрод соседнего субпиксела. Кроме того, с внешних сторон прозрачных пластин находятся поляризаторы, плоскости поляризации которых развернуты на 90° . Особенности конструкции дисплея TFT LCD показаны на рис. 12.14.

Когда полевой транзистор заперт, молекулы жидких кристаллов, расположенные вблизи верхней и нижней прозрачных пластин, ориентированы взаимно перпендикулярно. Такая ориентация граничных молекул жидких кристаллов обеспечивается принудительно, за счет создания на пластинах так называемых ориентационных покрытий из поверхностно-активных веществ. Все молекулы ЖК, находящиеся между граничными молекулами, занимают «переходные» положения, как показано на правой схеме рис. 12.13б.

Полученная таким образом цепочка из молекул жидких кристаллов как бы скручена в спираль, поэтому ее называют «скрученный нематический кристалл» (*twisted nematic crystal*). При этом поляризованный свет, предварительно прошедший через поляризационный фильтр, попадая на одну сторону ЖК-панели и проходя сквозь слой ЖК-вещества, меняет плоскость собственной поляризации и свободно проходит сквозь второй поляризационный фильтр с другой стороны ЖК-матрицы. Субпиксел максимально прозрачен. Если TFT-транзистор откроется, то к этой цепочке молекул ЖК будет приложено напряжение, которое уменьшит «закрученность» спирали из молекул. Это, в свою очередь, уменьшит прозрачность субпиксела. В идеале при полном открытии TFT-транзистора субпиксел становится черным (непрозрачным). Технологически можно сделать так, что субпиксел будет максимально прозрачен при открытом TFT-транзисторе и непрозрачен при запертом транзисторе, — все зависит от взаимной ориентации поляризационных фильтров и кристаллов ЖК-материала.

Панель TFT LCD можно считать аналоговым устройством отображения информации с цифровой адресацией и доставкой аналогового сигнала к каждому субпикселу. Для решения этой задачи в состав панели включают узел управления.

Оцифрованные сигналы RGB подаются на панель TFT LCD, где поступают на контроллер развертки TCON (Timing Controller). Все временные интервалы работы узлов панели задает TCON. Этот контроллер формирует сигналы управления драйверами строк, а также форматирует данные и производит их трассировку на драйверы столбцов. Драйверы строк (Row Driver Circuit) обеспечивают формирование отпирающих импульсов и подачу их на затворы

полевых ключей TFT, которые сгруппированы в строки. Эти драйверы называются драйверами затворов (Gate Driver Circuit) тонкопленочных транзисторов. Драйверы столбцов (Column Driver Circuit) используются для поочередной подачи на истоки тонкопленочных транзисторов сигналов, несущих информацию о яркости субпикселей, которые сгруппированы в столбцы. Эти аналоговые сигналы получены из цифровых сигналов RGB с помощью ЦАП, которые входят в состав драйверов столбцов. Эти драйверы называют также драйверами истоков (Source Driver Circuit). Каждая микросхема строчных и столбцовых драйверов имеет несколько сотен выводов с очень мелким шагом, поэтому такие микросхемы размещают прямо на стекле (технология CoG — Chip on Glass) или на плоских соединительных кабелях. В последнем случае кабель (шлейф) и микросхему драйвера изготавливают как единое целое. Такие совмещенные конструкции (плоский кабель — корпус драйвера) называют TSP (Tape Carrier Package).

Маркировка дисплеев TFT LCD состоит из четырех элементов. В качестве примера рассмотрим обозначение LB040Q02.

Первый элемент этого обозначения, состоящий из двух букв (LB), определяет область применения дисплея. LB — для широкого применения (автомобили, медицинская аппаратура, измерительная техника и т. д.). Возможно также LC — для телевизоров, LM — для мониторов, LP — для ноутбуков.

Второй элемент — трехзначное десятичное число — это размер панели по диагонали в десятых долях дюйма.

Следующий элемент — буква (или две), обозначающая разрешение панели. «Q» — это сокращение QVGA (разрешение 320×240 точек). Буква «V» соответствует VGA (640×480 точек), а «X» — XGA (1280×768 точек). Буква «W» обозначает широкоформатную панель.

Последний элемент маркировки (две цифры) — это технологический номер разработки.

12.4. ИЗЛУЧАЮЩИЕ ПРИБОРЫ НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКИХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

12.4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Сегодня одна из самых многообещающих и захватывающих — технология органических светодиодов (Organic Light Emitting Diodes — OLED), запатентованная в начале 1980-х гг. компанией Eastman Kodak. Повышенный интерес к OLED объясняется такими их достоинствами, как высокие яркость и контрастное отно-

шение, недостижимые с помощью других технологий, а также отсутствие необходимости подсветки и соответственно низкое энергопотребление.

Более сорока лет основными твердотельными источниками света являются светодиоды LED (Light Emitting Diodes), изготавливаемые из неорганических материалов: GaP, GaAsP, AlGaAs. В последние годы для производства светодиодов используются такие полупроводниковые соединения, как InGaAlP и GaN. Основными недостатками LED-приборов и устройств на их основе являются [68]:

- высокое энергопотребление, ограничивающее их использование в мобильных устройствах;
- низкая ударопрочность;
- относительно невысокие показатели яркости и контрастности;
- длительное время отклика (≥ 8 мс).

Острая потребность в улучшении технико-экономических показателей приборов и систем отображения информации обуславливает необходимость поиска и внедрения ресурсосберегающих технологий. К таким технологиям относятся:

- технологии OLED или Small-Molecule OLED-SMOLED, использующие низкомолекулярные органические вещества;
- технологии PLED (Polymer Light Emitting Diodes) или LEP (Light Emitting Polymer), использующие светоизлучающие полимеры, которые являются разновидностью сопряженных полимеров.

12.4.2. ОРГАНИЧЕСКИЕ СВЕТОДИОДЫ

Первый OLED на основе пленок органических полупроводников $p-n$ -типа, состоящих из групп молекул в аморфном состоянии, был получен специалистами компании Eastman Kodak, заметившими голубое свечение органического элемента солнечной батареи. Ученые установили, что в зоне соприкосновения двух органических материалов, в одном из которых присутствуют дырки, а в другом — избыточные электроны, как и в кристаллических светодиодах, возможна эмиссия фотонов. При этом, разумеется, внешний слой излучающего элемента должен беспрепятственно пропускать свет, для чего было решено использовать широко применяемый в полупроводниковой промышленности прозрачный оксид индия и олова (ITO). В результате была создана так называемая структура Kodak-типа, до сих пор практически не изменившаяся.

Таким образом, органический светодиод — монолитное твердотельное устройство, представляющее собой многослойную

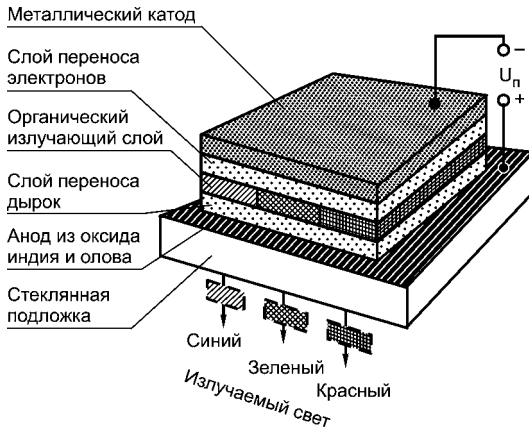


Рис. 12.15
Структура OLED

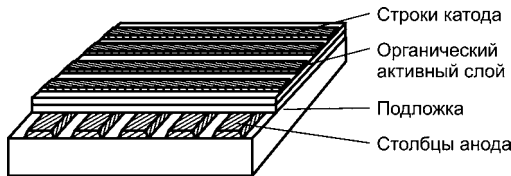


Рис. 12.16
Структура пассивно-матричного OLED

структуру, состоящую из нескольких органических слоев (дырочной инжекции, переноса дырок, светоизлучающего и переноса электронов) толщиной 100...150 нм, заключенных между прозрачным анодом, нанесенным на стеклянную или пластмассовую подложку и осажденным поверх органических пленок металлическим катодом. Эта структура представлена на рис. 12.15. При подаче напряжения на прибор электроды инжектируют в соответствующие органические пленки носители заряда (электроны и дырки), которые под действием электрического поля дрейфуют навстречу друг другу, рекомбинируя в промежуточном слое с излучением фотона.

Параметры OLED-панели во многом определяет ее тип — пассивно-матричный (PMOLED) или активно-матричный (AMOLED).

Пассивно-матричные OLED представляют собой матрицу элементов изображения, образуемую пересекающимися анодными и катодными линиями, как можно видеть на рис. 12.16. При подаче с помощью внешнего контроллера на определенные столбцы и строки входного напряжения и сигнала передачи видеоданных высвечиваются соответствующие элементы изображения. Чем больше проходящий ток, тем ярче пиксел. Для формирования изображения напряжение на каждую строку должно подаваться в течение

времени $1/N$, затрачиваемого на сканирование экрана с числом строк N . Сигнал передачи данных, поступающий на столбцы, синхронизирован с частотой развертки строк, составляющей, как правило, 60 Гц.

Панели этого типа просты в изготовлении, но требуют применения достаточно дорогостоящих внешних схем управления. К тому же они потребляют большую мощность. При подаче больших импульсов токов управления малой длительности PMOLED обычно не достигают максимальной световой эффективности, что связано как с неэффективностью самого диода, так и с потерями в строках. Анализ эффективности PMOLED показал, что на их основе целесообразно выполнять дисплеи с диагональю не больше 2...3 дюймов и числом строк до 100. Такие дешевые дисплеи с малым информационным содержанием находят достаточно широкое применение в сотовых телефонах, MP3-плеерах и портативных электронных играх.

Активно-матричные OLED выполняются на стеклянных подложках, на поверхности которых располагаются тонкопленочные транзисторы (ТПТ), обеспечивающие индивидуальную адресацию каждого пиксела дисплея и позволяющие тем самым снизить потребляемую им мощность. Для формирования ТПТ-матрицы наиболее перспективен метод низкотемпературной обработки поликристаллического кремния (Low-Temperature Polycrystalline Silicon — LTPS). По-видимому, LTPS-подложки по мере модернизации существующих предприятий и строительства новых заменят более распространенные сейчас подложки с тонкопленочными транзисторами на аморфном кремнии, поскольку обеспечивают высокое разрешение (до 200 пикселей на дюйм и выше) и низкое энергопотребление. При использовании AMOLED сокращается число требуемых внешних схем управления и существенно упрощаются электрические соединения между модулем дисплея и остальными блоками системы. Ведутся работы и по изготовлению AMOLED на подложках с ТПТ на монокристаллическом кремнии, что перспективно для создания микродисплеев с высоким разрешением. Число пикселей, разрешение и размер AMOLED практически ничем не ограничены. Панели этого типа перспективны для реализации СОИ с высоким разрешением и информационным содержанием, в том числе средств отображения видеoinформации и графических устройств.

Основные рабочие характеристики дисплея, к которым относятся длина волны излучения (цвет), срок службы и эффективность, определяет в первую очередь органический материал многослойной

структуры. Сегодня органические светодиоды в основном выполняются либо на базе материалов, молекулы которых легче молекул простейшего белка, — так называемых низкомолекулярных материалов (эти светодиоды зачастую и называют OLED или Small-Molecule OLED — SMOLED), либо на основе специального класса полимеров, способных излучать свет при возбуждении (так называемые полимерные LED, или PLED).

Пионер в области разработки PLED — компания Cambridge Display Technology (CDT), владеющая ключевыми патентами на их создание, процессы оптимизации параметров и процессы изготовления.

В PLED, как правило, используются полимеры двух семейств — поли-*p*-фениленвиниленов (PPV) и полифлуоренов (PF). Полимер наносится на подложку методом струйной печати. Для этого чрезвычайно тонкие пленки полимерного материала помещаются в раствор с целью получения распыляемых чернил, а специальный струйный принтер наносит на подложку капли жидкого красного, зеленого и синего полимеров. Правда, создание структуры, содержащей материалы разного цвета излучения, т. е. полноцветного дисплея, — задача непростая. Тем не менее метод достаточно прост и позволяет изготавливать гибкие и дешевые дисплеи довольно большого размера. Так, компания Philips методом струйной печати изготовила полноцветный PLED-дисплей с диагональю 13 дюймов и разрешением 576×324 пикселей. Красные, зеленые и синие пиксели наносились принтером с четырьмя головками и 256 управляемыми пьезоэлементами соплами, распылявшими соответствующие полимеры. Компанией CDT был изготовлен PLED-дисплей с диагональю 40 дюймов.

Производство OLED на основе низкомолекулярного материала требует применения сложного оборудования вакуумного осаждения, которое более пригодно для формирования полноцветных дисплеев с высоким разрешением. С помощью теневой маски и трехэтапного процесса осаждения RGB-пленок была продемонстрирована возможность изготовления полноцветного дисплея с диагональю 2,4 дюйма и шагом субпикселей 57 мкм.

К достоинствам OLED на низкомолекулярном материале относятся и совместимость с большинством операций производства полупроводниковых приборов. SMOLED существенно превосходит PLED по сроку службы и эффективности, но метод их изготовления неприемлем для создания дисплеев большого размера. Поэтому сейчас SMOLED-дисплей считается наиболее серьезным конкурентом ЖК-дисплеев (ЖКД), особенно в области дисплеев

малых размеров. Поскольку одно из основных достоинств OLED — отсутствие подсветки, они успешно конкурируют с ЖКД при создании субпанелей (дополнительных дисплеев) мобильных телефонов типа «раскладушка», популярность которых непрерывно растет. Благодаря прогрессивным методам продвижения OLED-дисплеев на рынок сегодня они используются в 90% «раскладушек» с субдисплеем. Ряд компаний разработали так называемые двойные, или двухсторонние, OLED-дисплеи. Так, Исследовательский институт промышленной технологии (Industrial Technology Research Institute — ITRI) Тайваня в конце 2004 г. продемонстрировал одноцветный двойной дисплей с диагональю 3,8 дюйма и разрешением 320×240 пикселей. Разработку подобных дисплеев на основе активно-матричных OLED ведут компании RiTdisplay и AU Optronics. Безусловно, двойной OLED-дисплей на вид более привлекателен, чем ЖКД. Появление мобильных телефонов со встроенной фотокамерой открывает новое направление применения OLED, на основе которых в силу их большей эффективности в сравнении с ЖКД выполняется видеоискатель. Однако, как показывает практика, технология создания ЖКД развивается так же стремительно, как и требования, предъявляемые производителями мобильных телефонов. Соревнование двух технологий продолжается.

В последнее время внимание разработчиков привлекают органические светодиоды на основе растворимого в полимере фосфоресцирующего низкомолекулярного материала. В традиционных OLED только 25% генерируемых носителей заряда участвуют в излучении света, тогда как остальные 75% носителей вызывают нагрев прибора. На основе работ, проведенных учеными Принстонского университета, Университета Южной Калифорнии и компании Universal Display Corp. (UDC), удалось получить новый органический материал, в котором благодаря процессу фосфоресценции в генерации света участвуют 100% генерируемых носителей. Наносится такой материал на подложку посредством струйной печати органическим паром. Пары органического материала пропускают через микроскопическое сопло, формирующее коллимированный пучок газа, с помощью которого на подложке создаются высококачественные светодиоды. Преимущества этой технологии перед другими методами изготовления OLED — более полное использование материалов, более высокая производительность, обеспечение более высокого разрешения дисплея.

Фосфоресцирующие OLED (Phosphorescent OLED — PHOLED) по эффективности в четыре раза превосходят обычные органические

ские диоды, не говоря уже о ЖКД, 90% излучения которых поглощается светофильтрами и другими компонентами дисплея. Световая эффективность PHOLED достигает 20 лм/Вт. Яркость активно-матричного PHOLED-дисплея с диагональю 2,2 дюйма в режиме воспроизведения видеоизображения — 200 кд/м² при потребляемой мощности всего 125 мВт против 180 мВт для ЖКД аналогичной яркости.

К достоинствам PHOLED относятся возможность формирования на их основе экранов больших размеров (благодаря малой потребляемой мощности и большой светоотдаче), а также совместимость технологии с процессами формирования активных матричных структур с ТПТ на базе аморфного или поликристаллического кремния.

Помимо PHOLED-дисплеев, компания UDC предлагает так называемые прозрачные органические светодиоды (Transparent OLED — TOLED) с прозрачными электродами, формируемые на тонких прозрачных стеклянных или пластмассовых подложках. Светодиоды типа TOLED излучают свет верхней, нижней или обеими поверхностями. Поскольку в нерабочем режиме такие панели прозрачны на 70%, они могут монтироваться на стеклах очков, лобовом стекле автомобиля или в окнах. Кроме того, компания создала наборные OLED (Stacked OLED — SOLED), в которых красные, зеленые и синие элементы каждого пикселя располагаются по вертикали.

Каждый субпиксел управляется независимо, цвет пикселя регулируется пропускаемым через каждый цветовой элемент током, шкала серого — широтно-импульсной модуляцией. Яркость устанавливается выбором соответствующего тока вертикального набора. По утверждению разработчиков, SOLED-технология позволяет в три раза увеличить разрешение и качество цветопередачи дисплеев в сравнении с дисплеями на базе ЭЛТ или ЖК. Компания считает, что в будущем SOLED-панели найдут применение в дисплеях с высоким разрешением сетевого оборудования.

Интерес представляет и разработанный учеными исследовательской группы института технологии Технион (Израиль) органический полупроводниковый материал на базе полученных ими протеинов. Протеины соединяются друг с другом, образуя пептиды, пригодные для построения электронных приборов. По мнению разработчиков, в ближайшие несколько лет им удастся создать полноцветные складные дисплеи с более высоким разрешением, чем имеют экраны современных компьютеров.

12.4.3. ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ СВЕТОДИОДОВ

Основное различие технологий OLED и PLED заключается в методах нанесения и свойствах многослойных структур светоизлучающих материалов, определяющих параметры работы различных устройств (эффективность и ресурс работы; контрастность, цветопередача и разрешение, габаритные размеры изделий и т. п.).

Для осаждения слоев материалов по технологии OLED используется метод вакуумно-термического испарения VTE (Vacuum Thermal Evaporation). Например, металл с высокой энергией выхода, как показано на рис. 12.17, осаждается на подложку в качестве анода 2. Тонкий слой 3 (HIL — Hole Injection Layer) обеспечивает инжекцию дырок через низкий энергетический барьер (менее 5 эВ). Затем на него осаждается слой 4, служащий для транспортировки дырок (HTL — Hole Transport Layer). Поверх него формируется слой эмиттера 4 (EML — Emissive Layer). Слои 6 и 7 обеспечивают транспортировку (ETL — Electron Transport Layer) и инжектирование электронов (EIL — Electron Injection Layer) соответственно. Слой 8 является катодом. Требуемый цвет обеспечивается за счет применения цветowych фильтров.

Для осаждения слоев материалов по технологии OLED полимерные материалы растворяют в органическом растворителе, а затем наносят в жидком виде с помощью специального струйного «принтера». Структура PLED представлена на рис. 12.18. На прозрачную гибкую подложку наносят пленку анода 4 и затем полимерную пленку 3, являющуюся источником инжектирования дырок HIL. Далее осаждают слой 2, являющийся инжектором электронов EIL с более низким положением дна зоны проводимости.

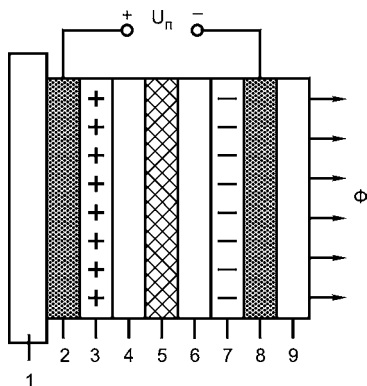


Рис. 12.17
Структура органического светодиода на кремниевой подложке (OLED):
1 — кремниевая подложка; 2 — пленка анода; 3 — слой инжектирования; 4 — слой транспортировки дырок; 5 — слой эmissiveнного материала; 6 — слой транспортировки электронов; 7 — слой инжектирования электронов; 8 — пленка катода; 9 — прозрачный слой.

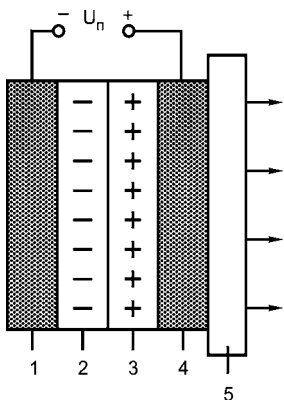


Рис. 12.18
Структура полимерного светодиода (PLED)

Толщина и электрические характеристики материалов подобраны так, чтобы электроны и дырки из соответствующих слоев собирались вдоль границы контакта слоев, где и происходит их рекомбинация с генерацией фотонов. Слой 1 является катодом.

В табл. 12.1 представлены некоторые сравнительные характеристики OLED- и PLED-структур. Из таблицы видно, что в настоящее время OLED-структуры превосходят PLED-структуры по совокупности параметров свечения. Однако OLED-технология, в отличие от PLED-технологии, не позволяет создавать дисплеи большого размера.

Таблица 12.1

Достоинства и недостатки материалов, используемых
в органических светодиодах на начало 2009 г.

Цвет	Низкомолекулярный материал — OLED		Высокомолекулярный (полимерный) материал — PLED	
	Эффективность, кд/А	Ресурс работы, ч (при яркости 150 кд/м ²)	Эффективность, кд/А	Ресурс работы, ч (при яркости 150 кд/м ²)
Красный	1...2	50 000	4...5	40 000
Зеленый	8...10	200 000	8...9	30 000
Синий	4	14 000	3	20 000
Желтый	8...10	> 30 000	8	—
Белый	2...4	100 000	6...8	—

Типы OLED-структур. В настоящее время существует несколько типов OLED-структур:

- **пассивно-матричные (ПМ) (Passive-Matrix OLED, PMOLED).** Элементы изображения (пиксели) представляют собой диодные структуры. Для генерации излучения необходима подача тока как на строку, так и на столбец матрицы. На базе PMOLED выполняются устройства малых размеров (2...3") для отображения информации на сотовых телефонах, карманных компьютерах и MP3-плеерах со сроком службы не более 5000 ч непрерывной работы. Однако PMOLED непригодны для создания экранов с большой диагональю и высоким разрешением;
- **активно-матричные (АМ) (Active-Matrix OLED, AMOLED)** — аналог пассивно-матричных структур, но пиксел в них состо-

ит из диода и тонкопленочного полевого транзистора (TFT), являющегося переключателем, который контролирует количество энергии, поступающей к диоду. Меньшая, чем у пассивно-матричных диодов, потребляемая мощность и более высокая частота обновления данных позволяют использовать AMOLED для создания больших ТВ-экранов, дисплеев портативных устройств, мониторов, электронных информационных и рекламных табло;

- **OLED-структуры с прозрачным катодом**, или прозрачные диоды (Transparent OLED, TOLED). Это могут быть как PMOLED-, так и AMOLED-структуры. Прозрачные органические светодиоды на тонких прозрачных стеклянных или пластмассовых подложках позволяют генерировать излучение оптического диапазона как верхней или нижней, так и обеими торцевыми поверхностями. В нерабочем режиме панели прозрачны. TOLED могут монтироваться на стеклах очков, наשלемных дисплеях, лобовом стекле автомобиля, самолета и т. д.;
- **наборные OLED-структуры (stacked OLED, SOLED)**. Особенностью их формирования является вертикальное расположение субпикселей. Благодаря независимой регулировке интенсивности излучения цветопередачи и шкалы серого наборные структуры OLED позволяют создавать полноцветные экраны с высоким разрешением;
- **гибкие OLED-структуры (Foldable-flexible OLED — FOLED)** могут формироваться как на гибкой металлической фольге, так и на поверхности пластмасс. Дисплеи на гибких OLED могут быть включены в ткань, из которой шьют одежду для спасательных служб и военных. При подаче фонового изображения (стены здания, рельефа местности и т. д.) на специальную одежду человек сливается с фоном и становится «невидимым»;
- **фосфоресцирующие OLED-структуры (phosphorescent OLED — PHOLED)**, разработанные компанией Universal Display Corp (UDC). В этих структурах слои транспортировки дырок и электронов выполнены на основе растворимого в полимере фосфоресцирующего низкомолекулярного материала. Благодаря фосфоресценции PHOLED теоретически могут преобразовывать практически 100% потребляемой энергии в световое излучение (обычные органические светодиоды — 23%), что приводит к значительному уменьшению потребляемой мощности, сокращению тепловых потерь и соответственно к получению матриц больших размеров. PHOLED также пригодны для изготовления AMOLED с TFT на аморфном или поликремнии.

Слои формируются на подложке с помощью струйной печати органическим паром (Organic Vapor Phase Deposition — OVPD): пары органического материала пропускают через микроскопические сопла, формирующие коллимированный пучок газа, создающий на подложке требуемый рисунок.

На базе технологий PHOLED и TOLED разрабатываются окна, которые в зависимости от погодных условий и освещенности могут либо самостоятельно испускать дневной свет, либо пропускать его. По последним рейтингам продаж 2008 г., объемы реализации AMOLED значительно превзошли PMOLED. В настоящее время в этой области деятельности лидируют две компании — Samsung SDI, выпускающая дисплеи для мобильных телефонов, и Sony, наладившая производство телевизоров.

Фирма Sony выпускает серийный телевизор Sony XEL-1-П" с разрешением 960×540 пикселей и контрастностью экрана около $10^6:1$ при мощности потребления всего 25 Вт — ниже обычной для моделей с аналогичным разрешением. Толщина матрицы составляет около 3 мм. В ближайшее время планируется поступление в продажу OLED-телевизора с экраном 21", демонстрировавшегося на выставке электроники в Лас-Вегасе CES (Consumer Electronics Show — CES) в январе 2009 г.

В середине 2008 г. на выставке электроники CeBIT-2008 компания Samsung представила OLED-дисплей толщиной 4,3 мм с диагональю 31".

12.4.4. ПОЛУЧЕНИЕ ЦВЕТНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ В OLED-ДИСПЛЕЯХ

Для получения цветного изображения в дисплеях на основе органических светодиодов разработаны три технологии, схемы которых представлены на рис. 12.19:

- с использованием отдельных RGB-эмиттеров (рис. 12.19а);
- с использованием белых эмиттеров и цветных фильтров (рис. 12.19б);
- с конвертированием спектра (рис. 12.19в).

Технология с использованием отдельных RGB-эмиттеров аналогична технологии генерации RGB в ЭЛТ: три органических материала излучают свет базовых (основных) цветов R, G и B, которые смешиваются с помощью оптической системы — линзы.

Основное достоинство этого метода — отработанность и высокая эффективность использования энергии.

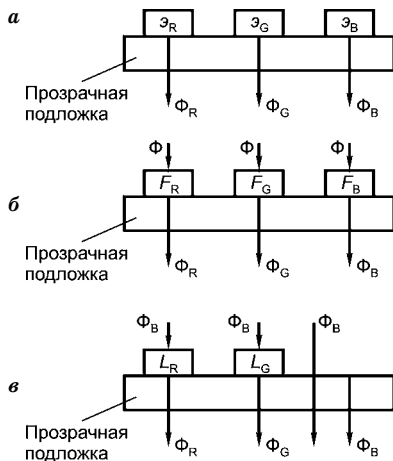


Рис. 12.19
Формирование цвета в OLED:

a — с помощью трех цветных эмиттеров;
б — с помощью трех цветных фильтров;
в — с помощью конверторов коротковолнового излучения; R, G, B — основные цвета; Э_R, Э_G, Э_B — соответствующие эмиттеры; F_R, F_G, F_B — соответствующие световые фильтры; L_R, L_G — соответствующие световые люминофоры.

Основные недостатки:

- необходимость подбора материалов, излучающих цвет нужной длины волны с одинаковой яркостью;
- разная скорость старения эмиттеров в связи с неравномерным отводом теплоты от краев и центра матрицы.

В результате свечение эмиттеров в ходе старения изменяется по-разному, суммарная цветовая температура и цвета «плывут».

Технология с применением белых эмиттеров и цветных фильтров аналогична технологии ЖК-дисплеев. Излучение трех одинаковых белых эмиттеров проходит через цветные фильтры (рис. 12.19б). В этом случае не требуется формирования отдельных по цветам эмиттеров.

Основным достоинством метода белых эмиттеров и цветных фильтров является однородное старение эмиттеров.

Основные недостатки:

- относительно низкая эффективность использования мощности, поскольку часть излученного эмиттерами света поглощается в фильтрах;
- необходимость обеспечения высокой эффективности излучения белых эмиттеров.

При использовании технологии конвертирования спектра ССМ (Color Changing Media) коротковолновое излучение «синего» эмиттера (или УФ-излучения) преобразуется в два более длинноволновых излучения (красное и зеленое), как показано на рис. 12.19в. Излучение «синего» эмиттера проходит напрямую.

Основными достоинствами метода конвертирования спектра являются:

- отсутствие формирования трех (раздельных по цветам) эмиттеров;
- достаточно высокая эффективность использования энергии излучателей;
- однородное старение эмиттеров.

Конвертирования спектра можно добиться и другим способом. Для этого тонкопленочный люминофор желтого (или зеленого) и красного цветов наносят непосредственно на синий светодиод. В результате два или три излучения смешиваются, образуя белый или близкий к белому цвет.

Основными достоинствами этого способа являются:

- невысокая стоимость изделий;
- установление определенного оттенка белого цвета при производстве светодиодов.

Недостатками методов конвертирования спектра являются:

- низкая (по сравнению с RGB-матрицами) светоотдача вследствие преобразования света в слое люминофора;
- необходимость стабилизации излучения «синего» эмиттера;
- скорость старения люминофора, превышающая скорость старения «синего» светодиода.

12.4.5.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ MEMS-КЛЮЧЕЙ ВМЕСТО ТРАНЗИСТОРОВ В AMOLED

Как известно, одним из важных элементов схемы управления матрицей AMOLED являются ключевые элементы, коммутирующие ток через OLED-светодиод, как показано на рис. 12.20. Они должны обеспечивать достаточно высокое быстродействие, пропускать большие токи (несколько миллиампер), иметь малые токи утечки, а технология их формирования должна обеспечивать высокую однородность параметров по всей площади экрана.

Технология их формирования должна быть простой, недорогой и обеспечивать стабильную воспроизводимость параметров транзисторов.

В настоящее время используются транзисторные ключи на аморфном кремнии *a-Si* и на поликремнии *p-Si*. Поликрем-

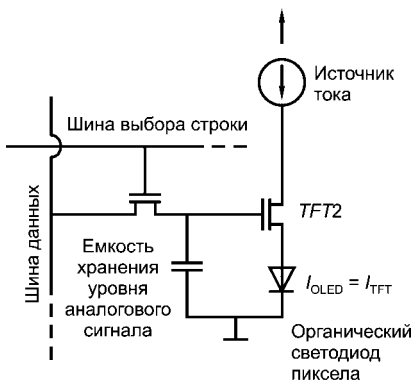
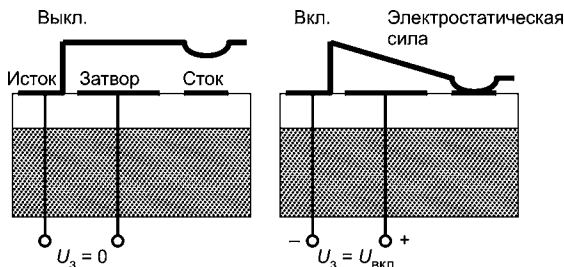


Рис. 12.20
Типовая схема
ячейки адресации AMOLED

Рис. 12.21
Принцип работы
MEMS-ключа



ниевый слой получают методом лазерного отжига пленки аморфного кремния. Пока он довольно сложен, трудоемок и недешев. Технология формирования матрицы транзисторов на аморфном кремнии в настоящее время хорошо отлажена и обеспечивает стабильность и однородность параметров транзисторов по площади.

Поликремний, в отличие от аморфного кремния, обеспечивает лучшие токовые передаточные характеристики, однако в процессе его производства очень трудно обеспечить высокую однородность характеристик, что приводит к заметной разнояркости элементов и зон экрана. Для решения этой проблемы были опробованы разные альтернативные решения. В качестве варианта реализации ключевых токовых элементов были предложены MEMS-ключи.

Для хорошо отлаженного в настоящее время процесса формирования MEMS-компонентов используются те же технологические процессы, что и для создания обычных микросхем. Главное преимущество предложенной концепции управления — высокая однородность и стабильность параметров MEMS-ключей. Эти ключи характеризуются низким сопротивлением во включенном состоянии и могут коммутировать большие токи. Разброс сопротивлений пренебрежительно мал. Время переключения ключей позволяет обеспечить коммутацию в заданном временном интервале, как показано на рис. 12.21.

На рис. 12.22 схематично изображены фазы управления OLED-пикселем на основе MEMS-ключа. Рассмотрим их подробнее.

Для управления яркостью используется метод ШИМ. Сопротивление замкнутого MEMS-ключа составляет около 20 Ом. Ключ способен пропускать токи до 15 мА. Время переключения ключа — около 5 мкс. Потребление тока ключом осуществляется только в режиме переключения, и оно незначительно по сравнению с потреблением остальной схемой управления и матрицей OLED.

У этой технологии только один недостаток: для электростатического управления MEMS-ключом требуется высокое напряже-

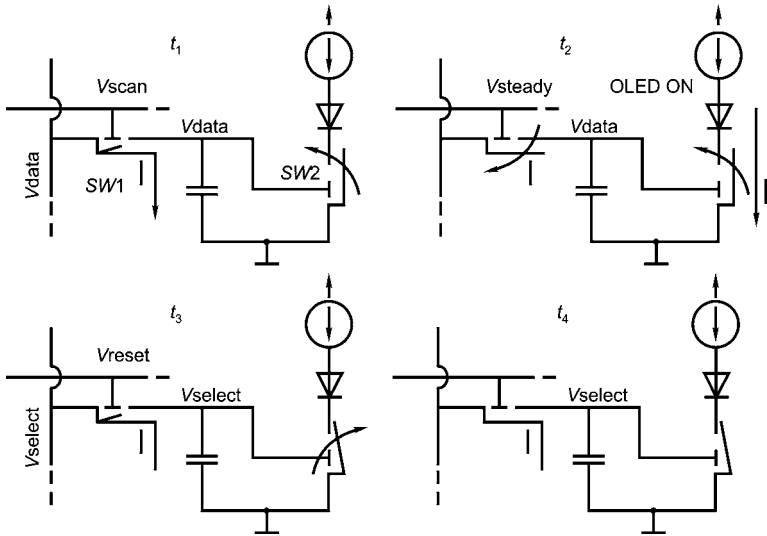


Рис. 12.22
Фазы управления OLED-пикселем на основе MEMS-ключа
(режим ШИМ-модуляции):

t_1 — фаза записи данных в элемент памяти (конденсатор) в процессе выборки строки. Ключ SW1 открыт, MEMS-ключ SW2 разомкнут; t_2 — фаза хранения данных и управление током OLED-светодиода. Ключ SW1 закрыт, SW2 — замкнут; t_3 — фаза разряда. Конденсатор разряжается и размыкает ключ SW2; t_4 — фаза сохранения выключенного состояния. Прохождение тока через светодиод блокируется. Ключ SW1 закрыт, SW2 — разомкнут.

ние — 30...50 В, однако в серийно производимых MEMS-приборах также используется электростатическое управление с амплитудами сигналов в диапазоне 30...70 В.

В результате был изготовлен прототип дисплейного устройства с MEMS-ключами. Следует признать, что пока эта технология по стоимости реализации еще не подходит для серийного производства.

12.4.6. СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТОК УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКИХ СВЕТОДИОДОВ

К основным достоинствам OLED можно отнести:

- чрезвычайно малые толщину и массу, высокую технологичность конструкции, которую можно реализовать на пластмассовой тонкопленочной подложке в виде «электронной бумаги», что делает такие средства отображения перспективными для применения в разнообразных портативных устройствах.

Возможно, в будущем OLED-панели будут печататься, как газеты, а не изготавливаться, как микросхемы;

- более высокие яркость и контрастное отношение по сравнению с характерными для ЖКД;
- высокое разрешение;
- широкий угол обзора (до 170°);
- отсутствие подсветки и хорошая видимость изображения даже при ярком освещении;
- высокая частота обновления изображения (в три раза выше, чем требуется для воспроизведения телевизионного изображения), что, по-видимому, позволит коренным образом преобразовать карманные компьютеры и сотовые телефоны;
- малая потребляемая мощность, что, помимо увеличения срока службы батарей портативных устройств, обеспечивает высокую эффективность диодов и позволяет минимизировать выделяемое тепло и вносимые помехи.

В сущности, любое изделие, в котором используется ЖКД или ЭЛТ, — кандидат для применения OLED. Игровые устройства, сотовые телефоны, видеокамеры, DVD-плееры, GPS-аппаратура, аудиодисплеи, карманные компьютеры, ноутбуки, мониторы и телевизоры — вот лишь небольшой перечень областей, где потребуется применение СОИ следующего поколения, на базе OLED-технологии. OLED — первый претендент для замены традиционных осветительных ламп твердотельными приборами. Это задача, решению которой сегодня Министерство энергетики США придает первостепенное значение, считая, что такая замена позволит на одну треть сократить энергопотребление страны.

Изделия с OLED-дисплеями появились на рынке еще в 1999 г. Это были автомобильные стереоприемники компании Pioneer с монохромными OLED-дисплеями, сотовые телефоны с панелями совместной разработки Samsung и NEC и даже электрическая бритва с OLED-индикатором фирмы Philips. Все OLED-средства отображения, используемые в этих изделиях, представляли собой устройства пассивно-матричного типа.

Преимущества OLED/PLED-технологий:

- возможность изготовления гибких матриц светодиодов;
- малое время отклика (10 мкс);
- малая толщина устройств со светодиодными матрицами;
- достаточно высокие вибропрочность и ударопрочность;
- высокий КПД, низкое напряжение питания и низкая потребляемая мощность матрицы;

- возможность в широких пределах изменять светоотдачу устройств;
- достаточно высокие разрешение и яркость. Размер пикселей может составлять 5 мкм при яркости свечения от нескольких единиц до более 100 000 кд/м²;
- высокая контрастность изображения (10⁶:1), обеспечивающая формирование изображения при ярком освещении (более 1000 лк);
- широкий рабочий температурный диапазон (–50...70°C).

Прогнозы развития технологии органических светодиодов приведены в табл. 12.2. Теоретически возможная эффективность 360 лм/Вт.

Таблица 12.2

Развитие и перспективы технологии органических светодиодов [68]

Показатели	2007 г.	2009 г.	2012 г.	2015 г.
Светоотдача образцов устройств, лм/Вт				
лабораторных	44	76	150	189
коммерческих	н/д	34	76	150
Стоимость устройств, долл./лм	н/д	0,072	0,027	0,010
Наработка на отказ, ×1000 ч	н/д	11	25	40

OLED/PLED-технологии имеют целый ряд недостатков.

Так, для OLED-экранов важно влияние излучения соседних включенных пикселей, имеющих максимальную яркость, на находящийся в центре выключенный «черный» пиксел. В этом случае контраст определяет степень паразитного излучения соседних пикселей. Для повышения контраста необходимо сформировать оптическую изоляцию между пикселями, которая приводит к сужению диаграммы излучения эмиттеров и сужению рабочих углов OLED-экрана до 150...160°.

Для стабильной работы органических светодиодов необходимо обеспечивать защиту структур от воздействия окружающей среды (кислорода, влажности и т. п.).

Цветопередача в OLED/PLED-технологиях достигается подбором определенных композитных материалов, выбор которых весьма ограничен. Для выравнивания спектра в основной светэмиссионный материал добавляют дополнительные фосфорные и люминесцентные вещества, свойства которых быстро ухудшаются со временем, причем особенно сильно под действием яркого света и высокой температуры.

Наблюдаемая деградация параметров полимеров приводит к уменьшению яркости при заданном напряжении питания. В цветных дисплеях деградация цветовых компонентов крайне неравномерна, что вызывает нарушение цветового баланса.

Несмотря на отсутствие подсветки, некоторые OLED-экраны толще иных малоформатных ЖК-дисплеев (вместе с узлом задней подсветки). В настоящее время вследствие низкого выхода годных и высокой стоимости материалов затраты на производство OLED-экранов выше, чем на производство ЖК-дисплеев.

Перспективы производства органических светодиодов в России. Исследованиями органических светодиодов в России занимаются в ряде научно-исследовательских институтов и организаций.

Специалистами НИИ «Волга» совместно с ОАО «Ангстрем» и НП «Поли-Эл» (г. Зеленоград) ведутся работы по созданию видеомодулей из органических полупроводниковых материалов, созданных на основе как OLED-, так и PLED-технологий. При этом, помимо того, что материалы пленочных покрытий наносятся на подложку методом вакуумного напыления, разрабатываются двухслойные структуры на основе полимерных материалов, наносимых методом центрифугирования.

В ОАО «НИИМЭ и Микрон» (г. Зеленоград) разработаны полимерные светодиодные панели с размером рабочего поля до 100×100 мм, разрешением до 388×268 пикселей и яркостью 1900 кд/м².

В НИИФП им. Ф. В. Лукина (г. Зеленоград) разработаны органические светодиоды, излучающие во всем диапазоне видимого спектра. Яркость светодиодов в зависимости от длины волны излучения составляет от 100 до 400 кд/м². Ведутся работы по формированию органических светодиодов на лавсане и на основе объединения технологии создания подложек на аморфном кремнии или поликремнии с технологией OLED.

ОАО ЦНИИ «Циклон» совместно с ИФХ им. А. Н. Фрумкина РАН и Институтом проблем физической химии разработали опытные образцы светодиодов и мини-дисплеев с разрешением 8×8 и 128×64 пикселей. Достигнутая яркость излучения: зеленого — 341 кд/м², белого — $100 \dots 400$ кд/м², синего — 253 кд/м² и красного — 63 кд/м² с эффективностью свечения 6 лм/Вт при долговечности 5000 ч.

Проблемы производства отечественных органических светодиодов:

- отсутствие отечественного специализированного технологического оборудования для производства органических светодиодов;

- отсутствие в РФ производства большинства необходимых органических материалов класса ОСЧ (за исключением прозрачных анодов и катодов);
- отсутствие в РФ производства TFT-матриц;
- отсутствие единых производственных стандартов;
- отсутствие необходимого числа высококвалифицированных специалистов.

Первоочередные научно-технические задачи производителей OLED:

- серийное освоение нанотехнологии с высоким процентом выхода годных изделий и доведения ресурса работы дисплеев минимум до 5000 ч непрерывной работы при высоком уровне яркости;
- повышение эффективности свечения до 76 лм/Вт;
- разработка новых долговечных композиционных органических материалов в качестве тонкопленочных слоев светоизлучающих структур;
- улучшение защиты внутренних слоев от воздуха и влаги (корпусная и бескорпусная герметизация);
- увеличение площади и яркости светящихся поверхностей;
- создание эффективных управляющих электронных подсистем.

12.5. ИСТОЧНИКИ СВЕТА НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА АВТОЭМИССИИ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН

12.5.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Перспективность применения наноструктурированных углеродных материалов для разработок катодолюминесцентных источников рассматривается в литературе, использованной при подготовке этого раздела [72].

Катодолюминесцентные источники света обладают рядом достоинств:

- возможность высокоэффективного получения любого необходимого спектра видимого излучения благодаря современным технологиям катодолуминофоров;
- время срабатывания менее 1 мс;
- возможность фокусировки излучения в любой требуемый угол;
- нечувствительность к радиационному излучению.

Эффективные катодолюминесцентные источники света с автокатодом могут быть выполнены на основе катодоструктуриро-

ванного углеродного материала — полиакрилонитральных волокон. Благодаря применению автокатода источник света не имеет греющихся частей, нечувствителен к температуре окружающей среды, отличается мгновенной готовностью к работе. Экспериментально подтверждено сохранение им работоспособности в широком диапазоне температур (от -196 до $+150^{\circ}\text{C}$).

Примером реализации катодолюминесцентного источника света является триодная вакуумная лампа с электронной пушкой и экраном, на который нанесен люминофор. Схема такого катодолюминесцентного триода представлена на рис. 12.23. Электроны вытягиваются модулятором и ускоряются анодным напряжением. Люминофор светится под действием электронов высоких энергий. Конструкция лампы разрабатывается так, чтобы наибольшая часть потребляемой энергии выделялась на аноде. Эффективность электронного прожектора с автокатодом может достигать 100% . Для этого необходимо устранить перехват тока на вытягивающем электроде.

Автоэмиссионный катод должен обладать следующими свойствами:

- низкой поверхностной подвижностью при высоком электрическом поле и высокой плотности тока;
- химической активностью в отношении атомов и молекул остаточных газов в вакуумном приборе;
- низкой работой выхода;
- высокой электро- и теплопроводностью, высокой температурой плавления, высокой прочностью на растяжение;
- обеспечивать стабильный эмиссионный ток в вакууме $\sim 0,133 \cdot 10^{-3}$ Па (10^{-6} Торр).

Совокупности указанных свойств удовлетворяет автоэмиссионный катод на основе пучка полиакрилонитральных углеродных волокон [72]. Нарботка катода на основе пучка таких углеродных волокон составила $7,5 \cdot 10^3$ ч при токе 50 мкА.

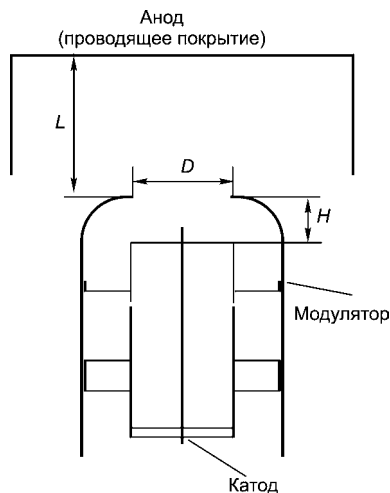


Рис. 12.23
Устройство катодолюминесцентного триода:

D — диаметр диафрагмы управляющего электрода (модулятора); L — расстояние от модулятора до люминесцентного экрана (анода); H — глубина расположения автоэмиссионного катода.

Для крепления пучок углеродных волокон подвергается остекловке. Этот прием позволяет изготавливать катоды с пучком волокон, центрированных и ориентированных вдоль оси электронного прожектора при отсутствии механических нагрузок на них. Стеклование пучка углеродных волокон позволяет также повысить вибрационную стойкость автоэлектронного катода.

Для изготовления катодолюминесцентных ламп используется «низкотемпературное» ($\sim 1450^\circ\text{C}$) полиакрилонитрильное (ПАН) углеродное волокно марки ЛУ-П диаметром 7 мкм, прошедшее дополнительную температурную обработку при $1800\dots 1950^\circ\text{C}$. После остекловки нарезаются пучки волокон требуемой длины, от остекловки освобождаются эмитирующая часть волокна и часть для создания контакта на катодный вывод прибора. Катодолюминесцентная лампа представляет собой триод: катод, управляющий электродом модулятор и катодолюминесцентный анод. Модулятор

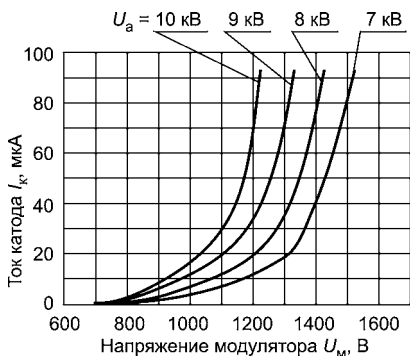


Рис. 12.24

Типичная вольт-амперная характеристика катодолюминесцентной лампы

используется для управления током автоэлектронной эмиссии с катода. Расстояние между катодом и модулятором существенно меньше расстояния между катодом и анодом, поэтому ток катода управляется напряжениями модуляции ($< 1,5$ кВ), которые меньше анодного напряжения ($U_n = 10$ кВ).

Типичные вольт-амперные характеристики разработанных триодных пальчиковых ламп с автоэмиссионным катодом представлены на рис. 12.24. Там же приведены зависимости автоэмиссионного тока катода I_k от напряжения на управляющем электроде U_m при фиксированном напряжении на аноде U_a : 7; 8; 9 и 10 кВ.

Спектры излучения ламп красного, зеленого и синего цветов представлены на рис. 12.25.

Катодолюминесцентные источники света позволяют получить излучение видимого диапазона, спектральный состав которого благоприятен для восприятия человеком и не вызывает такого утомления глаз, как большинство известных источников. В катодолюминесцентных излучателях отсутствует неблагоприятное и вредное инфракрасное и ультрафиолетовое излучение. Катодолюминесцентные лампы с автокатодом не содержат ядовитых мате-

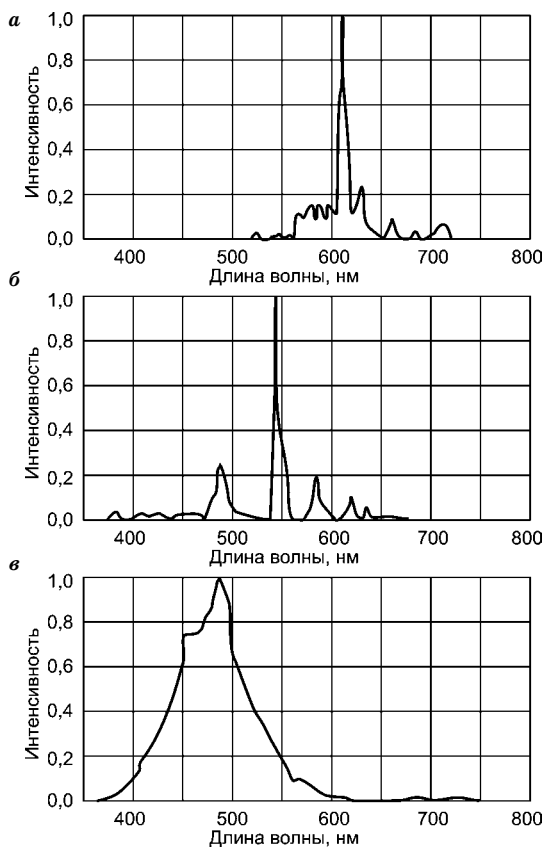


Рис. 12.25

Спектры излучения ламп:

а — красного цвета; *б* — зеленого цвета; *в* — синего цвета.

риалов и газов, вредных для здоровья человека. Для таких источников света не существует проблемы производства и утилизации, связанной с загрязнением окружающей среды, как, например, для люминесцентных ламп, содержащих пары ртути.

Катодолуминесцентные источники света применяются в составе:

- осветительных ламп;
- элементов подсветки ЖК-дисплеев;
- плоских автоэмиссионных экранов (FED);
- пикселях больших видеоэкранов коллективного пользования;
- светофоров, семафоров, источников резервного освещения;
- сигналов спасения на воде и в горах;
- любых источников света высокой яркости с возможностью подбора спектра излучения.

12.5.2.

**КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ДИСПЛЕИ
С АВТОЭЛЕКТРОННЫМИ ЭМИТТЕРАМИ**

Дисплеи с наноразмерными структурами рассматриваются в литературе [71], материалы которой использованы при подготовке данного подраздела пособия.

Работа катодолюминесцентных дисплеев основана на явлении автоэлектронной эмиссии — полевой эмиссии электронов (Field Emission). Эмиссия возникает на границе проводящего материала (катода), например металла, и вакуума при большой разности потенциалов между катодом и вытягивающим электродом (gate — затвором).

Дисплеи на основе автоэлектронной эмиссии разрабатываются более 20 лет. Известны два основных варианта холодных катодов:

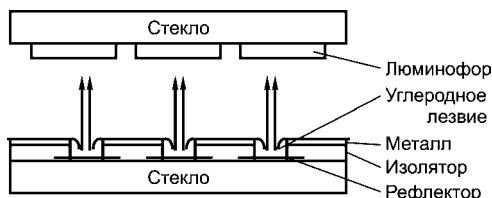
- острый катод (катод Спиндта), представляющий собой сформированную на проводящей подложке систему, состоящую из тонкого острия (кремниевого или молибденового) диаметром менее 1 мкм и вытягивающего электрода, расположенного на расстоянии нескольких десятых долей микрометра от острия;
- лезвийный — пленочный электрод, по обеим сторонам которого сформированы вытягивающие электроды. Электроны испускает край пленки, подобной лезвию бритвы.

Первый дисплей, способный воспроизводить ТВ-изображение, был разработан в начале 1990-х гг. в лаборатории LETI (Франция). Он был выполнен на основе катодов Спиндта. Эта технология получила развитие в работах компании PixTech (Тайвань), Futaba Corporation of America, Samsung, НИИ «Волга». Итог этих работ — цветные дисплеи с диагональю до 15 см, с размером пиксела до 0,3 мм и яркостью до нескольких сотен кандел на квадратный метр. Основная задача при создании автокатодов на остриях снижения высокой стоимости технологии формирования остриев субмикронных размеров. Это стимулировало изучение других структур, пригодных для получения автоэмиссии, в том числе пленочных углеродных структур, структур на основе углеродных нанотрубок (Carbon Nanotubes — CNT).

В НИИ «Волга» создана оригинальная структура катода, так называемый планарно-торцевой тонкопленочный катод. Структура дисплея с планарно-торцевым катодом представлена на рис. 12.26.

Пленка наносится методом осаждения на заготовленную структуру, созданную на стеклянной подложке. Электроны эмитирует

Рис. 12.26
Устройство дисплея
с планарно-торцевым катодом



тонкая пленка углерода под действием поля вытягивающего электрода, расположенного под углеродной пленкой. Часть электронов отражается на анодный электрод, на который нанесен люминофор.

К достоинствам катодолюминесцентных дисплеев с автоэлектронными эмиттерами можно отнести:

- изготовление по планарной технологии, подобной технологии литературных микросхем;
- отсутствие операции фотолитографии, требующей применения дорогостоящего оборудования с чрезвычайно высоким разрешением;
- возможность использования в качестве подложки любого подходящего материала;
- низковольтное управление;
- минимальное разрушение катода при бомбардировке ионами края катода;
- высокую стабильность работы благодаря чрезвычайно малому расстоянию между эмиттером и вытягивающим электродом.

На основе такой структуры эмиттера изготовлены цветные дисплеи с разрешением $64\text{ (RGB)} \times 64$, яркостью 300 кд/м^2 и высокой равномерностью свечения.

Перспективы промышленного выпуска катодолюминесцентных дисплеев связаны с использованием новых материалов, в частности нанотрубок. Исследования выявили весьма многообещающие механические и электрические характеристики углеродных нанотрубок. Согласно теоретическим расчетам основные достоинства дисплеев на основе CNT — высокое качество изображения и низкая стоимость. Однако создание электронных приборов с использованием углеродных нанотрубок, особенно дисплеев и активных компонентов, — задача далеко не простая.

Традиционный метод выращивания нанотрубок химическим осаждением из первой фазы (CVD) при температуре $800 \dots 1200^\circ\text{C}$ не позволяет использовать в качестве подложки стеклянные платы. Чтобы CNT можно было наносить на стеклянную подложку,

необходимо получать их низкотемпературными методами. Кроме того, при изготовлении дисплея углеродные нанотрубки должны располагаться на подложке равномерно, иначе глаз может уловить разницу в яркости свечения соседних элементов.

Специалисты научно-исследовательского отделения компании Motorola разработали низкотемпературную технологию изготовления наноизлучающих дисплеев (Nano Emissive Display — NED) путем непосредственного выращивания CNT-структур с использованием материала, способного к самоформированию на стеклянной подложке частиц чрезвычайно малых размеров (диаметром 3 нм). В атмосфере углеводорода при температуре 500°C частицы проявляют себя как катализаторы, способствуя росту CNT диаметром 3 нм.

За счет размещения на стеклянной подложке CNT с заданными размерами и зазорами можно создавать плоскоплатные дисплеи с высоким качеством воспроизведения изображения, оптимизированными яркостью, чистотой света и разрешением. К достоинствам таких дисплеев относятся довольно низкое энергопотребление и срок службы до 30 000 ч против 2000 ч для плоскоплатных газоразрядных устройств при стоимости дисплея с экраном 40 дюймов (100 см) около 400 долларов.

В 2005 г. Motorola Labs объявила о создании полноцветной пятидюймовой (12,5 см) NED-секции с разрешением 1280×720 элементов изображения. Толщина панели, в которой используются люминофоры стандартных ЭЛТ, составляет всего 3,3 мм. По характеристикам (времени срабатывания, углу обзора, диапазону рабочей температуры) NED сопоставима с ЭЛТ или превосходит ее.

Компания ISE Electronics разработала CNT-панель с диагональю 40 дюймов (100 см). Нанотрубки наносили на катодную пластину методом печати. При наличии вытягивающего электрода однородность люминесценции стала выше. Размер элемента изображения 2,54×7,62 мм, или 3 (RGB)×2,54 мм, разрешение — 342×204 пикселей. Яркость зеленого излучения при напряжении анода 5 кВ составляла 105 кд/м². При уменьшении толщины пластины с вытягивающим электродом до 20 мкм управляющее напряжение удастся снизить до 100 В. Специалисты Университета Кенг Хи и Исследовательского института электроники и средств связи Кореи разработали активно-матричный дисплей (AMFED) на основе CNT и тонкопленочных полевых транзисторов (ТПТ) на аморфном кремнии (*a*-Si TFT) с диагональю 5 дюймов (12,5 см). Элемент изображения формируют высоковольтный *a*-Si TFT и на-

несенные методом печати CNT-эмиттеры. Разрешение панели 136×160 пикселей. С применением управляющих тонкопленочных транзисторов повысилась однородность тока эмиссии. Высокие характеристики панели были получены при напряжении возбуждения менее 15 В. Снижение энергопотребления — еще одно достоинство AMFED.

В России дисплеи на основе углеродных нанотрубок разрабатываются в НИИ «Волга». Предложены технологии изготовления трех видов дисплеев:

- планарных, в которых CNT и люминофор наносятся на электроды, сформированные в одной плоскости пластины;
- с навесными катодами из W-образной проволоки диаметром 17 мкм, на которую методом катафореза наносились CNT. Такие панели изготавливались на базе серийно выпускаемых вакуумных люминесцентных индикаторов, в которых оксидные катоды заменялись нанотрубками;
- матричных экранов диодного типа вакуумно-люминесцентных приборов, на анодные (с люминофором) и катодные (с CNT) платы которых нанесены электроды (In_2O_3 или Al). При этом электроды анодной и катодной плат перпендикулярны.

Основные проблемы при создании серийных дисплеев — получение равномерного свечения пикселей и минимизация процессов деградации автоэмиссионных катодов при эксплуатации.

Автоэмиссионные дисплеи по физическим и техническим свойствам, возможностям и областям применения — самый интересный тип устройств отображения информации.

В настоящее время многие фирмы пытаются создать дисплеи с поверхностной эмиссией электронов (Surface-conduction Electron-emitter Display — SED).

Впервые эффект поверхностной эмиссии электронов был обнаружен в 1963 г. учеными Института физики АН УССР. Эффект заключается в том, что при прохождении электрического тока через тонкие металлические структуры толщиной несколько десятков ангстрем (для золота 48 нм) возникает эмиссионный ток, обусловленный тем, что часть электронов, переносящих заряд между металлическими островками в пленке, имеет нормальную к поверхности пленки компоненту скорости. При напылении окиси бария на тонкий слой золота проводимость слоя и ток эмиссии возрастают.

Исследования показали, что эмиссия диспергированных золотых пленок начинается при напряженности электрического поля $4 \cdot 10^3 \dots 4 \cdot 10^4$ В/см. Ток эмиссии при напряженности $1,2 \cdot 10^4$ В/см

составляет $0,35...0,4 \text{ А/см}^2$. Структура (размеры островков и заряда между ними) оказывает влияние на эмиссионные параметры системы. Так, для эмитирующей области 8 мкм оптимальные размеры островков и промежутков между ними составляют $\sim 10 \text{ нм}$.

SED характеризуются высокой яркостью изображения и низкой потребляемой мощностью (в три раза ниже, чем мощность плазменных дисплеев, и в два раза ниже, чем мощность кинескопов). Эти миниатюрные дисплеи (толщина их экрана — несколько сантиметров) обеспечивают высокое быстродействие, хороший контраст и высокий уровень градации тонов. По яркости и цветопередаче SED и плазменные дисплеи близки, по уровню черного SED превосходят большинство плазменных дисплеев. Яркость ЖК-дисплеев несколько выше, однако SED значительно превосходят их по быстродействию. В плазменных и ЖК-дисплеях детальность воспроизведения движущегося изображения значительно уступает детальности воспроизведения статичной картины. В SED все движущиеся изображения остаются четкими и ясными. По долговечности SED сопоставим с ЭЛТ (снижение яркости на 50% за 30 000 ч).

Цены SED, плазменных и ЖК-дисплеев сопоставимы.

Достигнутые и ожидаемые показатели SED представлены в табл. 12.3 [84].

Таблица 12.3

Достигнутые и ожидаемые показатели дисплеев с поверхностной эмиссией (SED)

Параметр	2005 г.	2007 г.	2010 г.
КПД, %	1	2,5	5
Эффективность, л/Вт	4	10	20
Время жизни при яркости 300 кд/м ² , ч	10 000	20 000	40 000
Максимальная плотность, пикселей на дюйм	100	200	300
Контрастность при 500 лк в соответствии со стандартом VESA 2.0	50	100	200
Максимальное число точек в устройстве, 10 ⁶	1	5	10
Максимальная диагональ экрана, дюймов (см)	20(50)	40(100)	60(150)
Толщина панели, мм	2,0	1,0	0,5
Максимальное рабочее напряжение, В	8	5	3
Удельный вес панели, г/см ²	0,5	0,25	0,1
Стоимость производства, долл./кв. дюйм	5,00	1,00	0,50

12.6. ФОТОПРИЕМНЫЕ НАНОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

12.6.1. ФОТОПРИЕМНИКИ НА КВАНТОВЫХ ЯМАХ

Эффекты размерного квантования в квантовых ямах могут использоваться для создания новых типов приемников инфракрасного излучения. Принцип приемника весьма прост: выброс носителей в зону проводимости широкозонного полупроводника (потенциального барьера) увеличивает проводимость в направлении, перпендикулярном слоям гетероструктуры.

По принципу действия такой приемник напоминает примесный фоторезистор, где центрами являются квантовые ямы, как видно на рис. 12.27.

Поэтому в качестве времени жизни неравновесных носителей — важнейшего параметра фоточувствительного материала — выступает характерное время их захвата в квантовую яму τ_p . Оно имеет два существенных отличия от обычного времени жизни носителей, связанного с захватом рекомбинационными центрами.

Во-первых, τ_p значительно (на несколько порядков) меньше времени захвата центрами. Причина в том, что акт захвата связан с необходимостью передачи решетке от носителя довольно большой энергии, равной энергии связи центра или ΔE при захвате в квантовую яму.

Наиболее эффективный механизм передачи энергии — испускание оптических фононов с энергией $h\nu_0$. Фонон — это один квант колебаний кристаллической решетки. Однако энергия связи центров отнюдь не совпадает с $h\nu_0$, поэтому такой процесс невозможен. Электрон должен отдавать энергию в ходе значительно более медленного каскадного процесса испускания множества акустических фононов. В случае квантовой ямы наличие непрерывного спектра движения в плоскости ямы существенно меняет ситуацию. Становится возможным переход в связанное состояние в яме при испускании оптического фонона с одновременной передачей

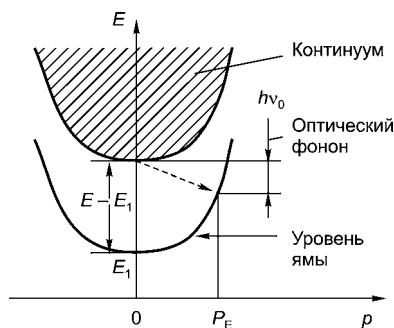


Рис. 12.27
Процесс захвата неравновесного электрона в квантовую яму с испусканием оптического фонона

оставшейся избыточной энергии движению в плоскости. Если энергия исходного электрона близка к краю зоны в широкозонном материале, то испускаемый фотон обладает достаточно большим импульсом в плоскости квантовой ямы:

$$P_{\Phi} = \sqrt{2m(\Delta E - E_1 - \hbar\omega_0)}. \quad (12.5)$$

Гораздо более активное взаимодействие электронов с оптическими фотонами, нежели с акустическими, определяет малое время захвата в квантовую яму τ_p по сравнению с временем захвата из центра.

Во-вторых, τ_p зависит от параметров ямы немонотонно. Это объясняется свойствами волновой функции электронов Ψ_E в делокализованных состояниях над квантовой ямой. Если яма не резонансная, то амплитуда этой волновой функции в непосредственной окрестности ямы при низкой энергии электрона весьма мала. Собственно τ_p будет относительно велико. В резонансных квантовых ямах вероятность захвата возрастает, т. е. τ_p падает.

Фотопроводимость рассматриваемой структуры, так же как и обычного фоторезистора, определяется как произведение трех сомножителей: скорости оптической генерации, которая, в свою очередь, пропорциональна коэффициенту поглощения α , времени жизни носителей в делокализованном состоянии τ_p и эффективной подвижности их в нем $\mu_{\text{эфф}}$, которая, очевидно, должна быть пропорциональна квантово-механическому коэффициенту прохождения электрона над квантовой ямой. Однако анализ показывает, что совокупное действие этих трех составляющих таково, что фотоприемники на квантовых ямах имеют лучшие параметры в случае резонансных ям.

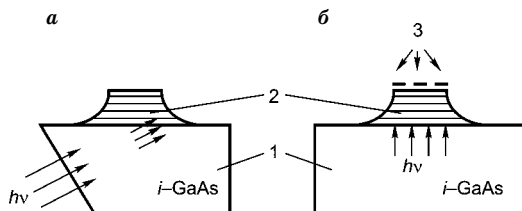
Для самой распространенной гетеросистемы GaAs/Al_xGa_{1-x}As, где $x = 0, 2 \dots 0,25$, условие резонанса выполняется для ям толщиной, кратной 40 Å. Если толщина от 40 до 45 Å, то диапазон фоточувствительности структуры лежит в области длин волн около 8 мкм, соответствующей одному из окон атмосферной прозрачности и потому очень важной для практического применения. Приемники на основе квантовых ям могут составить конкуренцию фоточувствительным структурам на основе твердых растворов CdHgTe — важнейшему типу приемников для данного спектрального диапазона.

Основным достоинством структур на квантовых ямах является высокая стабильность и меньший разброс параметров, что особенно ценно для матричных фоточувствительных структур.

Рис. 12.28

Способы ввода излучения
в фотоприемник
с квантовыми ямами:

a — через скошенный торец; *b* — с помощью дифракционной решетки: 1 — подложка; 2 — фоточувствительная структура с квантовыми ямами; 3 — дифракционная решетка.



Путем сравнительно небольших изменений состава широкозонных слоев и толщины ямы можно варьировать положение максимума и ширину полосы фоточувствительности. Последнее обстоятельство связано с тем, что по мере нарушения условия резонанса спектр фотоионизации квантовой ямы становится более плавным, с менее резким максимумом.

Поскольку оптическую ионизацию квантовых ям может вызывать лишь свет, поляризованный по нормали к квантовым слоям, описанные фотоприемники должны содержать специальные приспособления, поляризующие падающий свет таким образом. Есть два варианта. Свет может направляться в фоточувствительную структуру под углом через скошенный торец подложки, как показано на рис. 12.28*a*. Или же свет пропускается через подложку по нормали, приобретая должную поляризацию после дифракции на решетке, специально нанесенной на верхнюю поверхность структуры, как можно видеть на рис. 12.28*б*.

Возможно альтернативное решение проблемы поляризации, позволяющее избежать описанных выше конструктивных усложнений. Речь идет о выращивании квантовых структур из полупроводников с анизотропным энергетическим спектром. При наличии анизотропии электрическое поле нормально падающей световой волны, лежащее в плоскости слоев, придает электронам импульс, направленный под некоторым углом к этой плоскости. С позиций квантовой механики это означает возможность переходов между различными квантово-размерными уровнями или между уровнем и континуумом состояний над квантовой ямой, что и требуется для работы приемника.

На практике для реализации этой идеи чаще всего используют гетероструктуры на основе той же, наиболее освоенной технологически системы GaAs/Al_xGa_{1-x}As, но с *p*-типом легирования вместо *n*-типа. При этом сложный характер энергетического спектра валентной зоны обеспечивает фоточувствительность при нормальном падении света.

12.6.2. ФОТОПРИЕМНИКИ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

Сравнение свойств фотоприемников с объемными слоями на квантовых ямах и квантовых точках выявляет преимущества последних.

Преимущества приемников излучения на основе квантовых точек (КТ) следующие:

- отсутствие запрета на оптические переходы, поляризованные в плоскости ФП, обеспечивающее возможность работы прибора при нормальном падении света без использования дополнительных решеток и отражателей;
- высокий коэффициент поглощения света для внутризоновых и экситонных переходов из-за локализации волновой функции носителей заряда в трех измерениях пространства;
- большее время жизни фотовозбужденных носителей заряда (а значит, и большой коэффициент фотоэлектронного усиления) вследствие низкой скорости захвата носителей в КТ. Причиной последнего служит либо отсутствие разрешенных энергетических состояний между уровнем в КТ и зоной распространенных состояний, либо подавленное рассеяние на оптических фотонах в условиях, когда энергетический зазор между уровнями различного квантования больше энергии оптического фотона;
- малые темновые токи (а значит, и высокая рабочая температура фотодетектора) как следствие равенства энергии фотоионизации КТ и энергии активации проводимости из-за дискретного энергетического спектра носителей в КТ.

Недостатками фотоприемников со слоями квантовых точек являются:

- дисперсия размеров КТ в массиве, приводящая к неоднородному уширению спектра поглощения и уменьшению абсолютной интенсивности фотоотклика;
- низкая слоевая плотность КТ ($10^9 \dots 10^{12} \text{ см}^2$), на два-три порядка меньше типичных концентраций электронов ($10^{11} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$) в двухмерных подзонах ФП с квантовыми ямами.

Конструкция фотоприемника, содержащего в активной области восемь слоев квантовых точек Ge, изображена на рис. 12.29.

Слой выращивался методом молекулярно-лучевой эпитаксии на сильно легированной кремниевой подложке *p*-типа, служащей нижним электрическим контактом. Верхний электрод формировался осаждением p^+ -Si-слоя 50 нм с концентрацией бора 10^{19} см^{-3} . Толщина областей Si между соседними слоями Ge составляет 10 нм. Нанокластеры Ge (квантовые точки) имели средние разме-

ры в плоскости роста 15 нм, высоту 1,5 нм, их слоевая плотность составляла $3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

В 10 нм от каждого слоя Ge проводилось легирование Si бором со слоевой концентрацией бора $6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. При таком расстоянии практически все дырки переходили из легированных слоев в слои Ge, что обеспечивало практически полное заселение основного состояния КТ дырками.

Активная область прибора $1,5 \times 1,5 \text{ мм}$ формировалась с помощью жидкостного травления в растворе $\text{HF}:\text{HNO}_3$ на глубину 5 мкм.

Для создания контактов на слои $p^+-\text{Si}$ напылялись золотые площадки диаметром 0,5 мм. Измерения фототклика проводились между верхним и нижним слоями $p^+-\text{Si}$.

Фотодетектор представляет собой фоторезистор с плавающей базой. Роль базы выполняет массив нанокластеров Ge, заключенный внутри слоя $i-\text{Si}$, между $p^+-\text{Si}$ -эмиттером и $p^+-\text{Si}$ -коллектором.

В отсутствие освещения КТ обладают положительным зарядом дырок, находящихся в основном состоянии. Электрический потенциал заряженных КТ создает потенциальный барьер для дырок размером

$$\Delta\varphi = 2LN \frac{\Sigma}{\epsilon\epsilon_0},$$

где L — период повторения слоев Ge; N — число слоев КТ; Σ — плотность заряда в каждом слое КТ; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость кремния; ϵ_0 — энергетическая постоянная.

При освещении дырки в КТ переходят из основного состояния в возбужденное, в котором вследствие барьерного проникновения волновая функция дырки имеет больший радиус локализации. Это означает, что при освещении уменьшается эффективная плотность положительного заряда Σ , сосредоточенного в слое КТ, а значит, снижается потенциальный барьер $\Delta\varphi$ между эмиттером и коллектором и возрастет термоэмиссионный ток дырок через структуру.

Для работы в оптическом диапазоне 1,1...1,6 мкм предложены биполярные $p-i-n-\text{Ge/Si}$ -фототранзисторы [76]. Роль плавающей

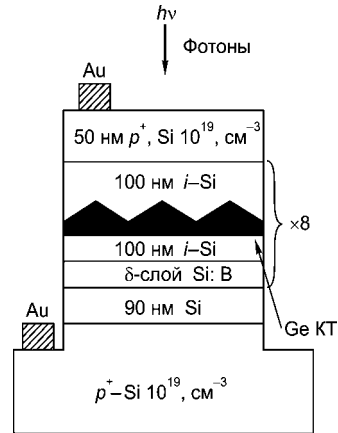


Рис. 12.29
Схематичное изображение фотоприемника на основе кремниевой $p-i-p$ -структуры со встроенными слоями квантовых точек Ge

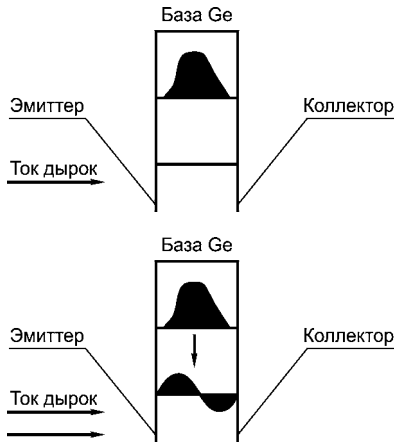


Рис. 12.30

Схема фототранзисторного механизма

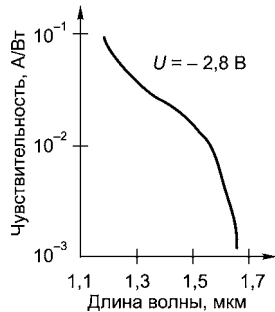


Рис. 12.31

Спектральная характеристика фотоотклика

базы транзистора выполняют 12 слоев нанокластеров Ge, встроенные в p -область Si. Действие транзистора основано на уменьшении потенциального барьера для электронов между сильно легированными областями n^+ -Si вследствие фотогенерации дырок в островах Ge в результате межзонных переходов и появления в базе положительного заряда, приводящего к увеличению тока инжекции из эмиттера в коллектор.

Освещение фототранзистора осуществляют со стороны p - n -переходов.

На рис. 12.30 схематично показано появление фототока при переходах дырок между локализованными состояниями в КТ Ge (профили валентной зоны для одного слоя квантовых точек Ge в Si). Спектральная характеристика фотоотклика рассматриваемого прибора приведена на рис. 12.31.

Максимальная квантовая эффективность составила 3% для длины волны 1,3 мкм. Повышение квантовой эффективности до 21% возможно за счет реализации волновой структуры фотоприемника.

В настоящее время широкое применение находят ВОСП, работающие в ИК-области — 1,3...1,5 мкм. Представляет интерес создание для этих систем чипов, содержащих весь набор элементов и узлов (модуляторов, демодуляторов, мультиплексоров, излучателей и, естественно, фотоприемников).

Для уменьшения стоимости систем нужно, чтобы все их компоненты могли быть интегрированы в современную кремниевую

технологии сверхбольших интегральных схем (СБИС) и сформированы на кремниевых подложках. Однако сам кремний прозрачен для фотонов с длиной волны больше 1,1 мкм. Высокой чувствительностью в области 1,3...1,5 мкм обладают германиевые ФП. В связи с этим представляет интерес создание Ge/Si-гетероструктур, фоточувствительных при комнатной температуре в диапазоне длин волн 1,3...1,5 мкм.

На начальном этапе были разработаны фотоприемники, использующие осаждение объемных слоев Ge на Si, а также выращивание многослойных напряженных сверхрешеток $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$. Обычно критерием оценки качества таких ФП служит квантовая эффективность темнового тока при напряжении 1 В или тока насыщения в диодных структурах.

При длине волны $\lambda = 1,3$ мкм квантовая эффективность таких ФП составляла $\eta = 11\%$ в случае засветки торца планарных волноводов, сформированных на той же кремниевой подложке.

В последнем случае прохождение света вдоль слоев GeSi и многократное отражение от стенок волновода и позволяло достичь высокой квантовой эффективности η .

Типичная плотность темнового тока при смещении 1 В и комнатной температуре составляла $10^{-4} \dots 10^{-3}$ А/см², а плотность тока насыщения — 10^2 А/см², что существенно превышало токи как в кремниевых, так и в германиевых *p-n*-диодах.

Важным шагом в решении проблемы разработки эффективных Ge/Si-фотоприемников стала замена сплошных слоев GeSi слоями германиевых квантовых точек.

С точки зрения перспектив встраивания таких элементов в кремниевые СБИС, Ge/Si-гетероструктуры с когерентно введенными нанокластерами Ge представляют интерес, поскольку характеризуются возможностью зарращивания упруго напряженных германиевых слоев совершенными по структуре слоями Si, на которых затем можно формировать другие элементы СБИС.

Возможно создание Ge/Si-фотоприемника, содержащего массивы КТ Ge со слоевой плотностью примерно 10^{12} см⁻² и точками менее 10 нм, характеризующегося малыми темновыми токами и высокой чувствительностью к излучению с длиной волны фотонов 1,3...1,5 мкм. Такой фотоприемник представляет собой кремниевый *p-i-n*-диод со встроенными в базовую область 30 слоями КТ Ge, разделенными промежуточными слоями Si толщиной 20 нм. Для того чтобы уменьшить островки Ge и повысить их плотность, они были сформированы на предварительно окисленной поверхности кремния.

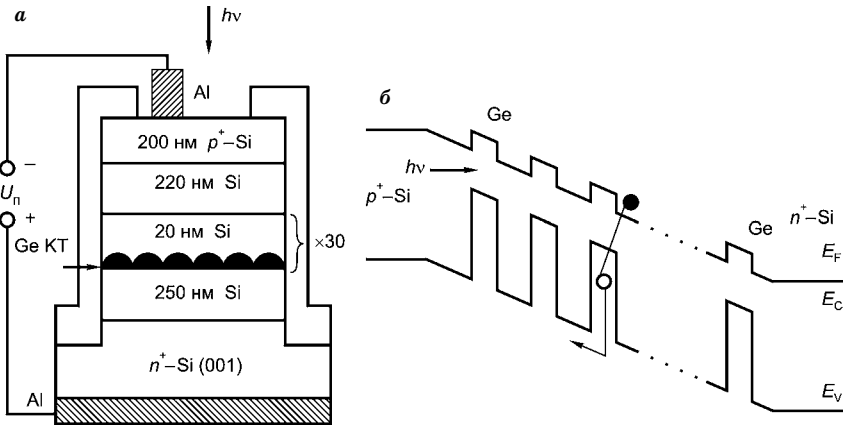


Рис. 12.32

Поперечное сечение кремниевого $p-i-n$ -фотодиода с квантовыми точками Ge (а) и энергетическая диаграмма диода в равновесии (б)

Конструкция фотоприемника и энергетическая диаграмма диода в равновесии приведены на рис. 12.32. Средний размер островков Ge в плоскости роста — 8 нм, плотность островков — $1,2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Рассматриваемый фотоприемник имеет малый темновой ток насыщения: на один-два порядка меньше тока в германиевых $p-n$ -диодах. Это указывает на то, что ширина запрещенной зоны в гетероструктуре Ge/Si с КТ больше, чем в объемном Ge, вероятно, вследствие эффекта размерного квантования энергетического спектра. Плотность темнового тока при обратном смещении 1 В составила $2 \cdot 10^{-5} \text{ А/см}^2$.

Типичные спектральные зависимости ватт-амперной чувствительности при различных обратных напряжениях показаны на рис. 12.33.

Поглощение фотонов с энергией меньше ширины запрещенной зоны Si приводит к переходу электронов из валентной зоны Ge в зону проводимости Si. При этом в зоне проводимости Si появляются свободные электроны, а в островках Ge — дырки. Поскольку дырки локализованы в КТ Ge, то в слабых электрических полях основной вклад в фототок вносят

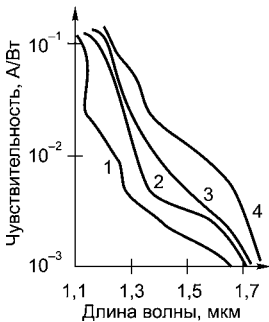


Рис. 12.33

Спектральная зависимость чувствительности при различных обратных смещениях фотодиода U , В:

1 — 0; 2 — 0,3; 3 — 0,5; 4 — 2.

только электроны. При высоком напряжении дырки могут эффективно туннелировать из локализованных в КТ состояний в валентную зону Si, увеличивая тем самым фототок. При достаточно сильных полях, когда все фотодырки имеют возможность оторваться от КТ, происходит насыщение фотоотклика. Квантовая эффективность $p-i-n$ -фотодиода с квантовыми точками Ge при обратном напряжении 3 В составила 3%.

12.7. ФОТОМАТРИЦЫ ШИРОКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

12.7.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Фотоматрицы, или светочувствительные матрицы, — это специализированные аналоговые или цифроаналоговые интегральные микросхемы, состоящие из светочувствительных элементов — фотодиодов.

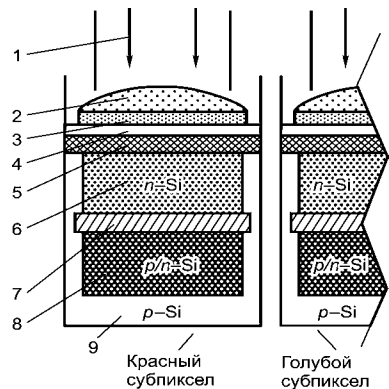
При подготовке этого раздела использованы литературные данные [86].

Фотоматрицы предназначены для преобразования спроецированного на них оптического изображения в аналоговый электрический сигнал или в поток цифровых данных (при наличии АЦП в составе матрицы). Они являются основным элементом цифровых фотоаппаратов, современных видео- и телевизионных камер, фотокамер, встроенных в мобильный телефон, камер систем видеонаблюдения и многих других устройств; применяются в оптических детекторах перемещения компьютерных мышей, сканерах штрихкодов, планшетных и проекционных сканерах, системах астро- и солнечной навигации.

Устройство субпиксела фотоматрицы представлено на рис. 12.34.

Рис. 12.34
Схема субпикселей ПЗС-матрицы с карманом n -типа:

1 — фотоны света, прошедшие через объектив фотоаппарата; 2 — микролинза субпиксела; 3 — R-красный светофильтр субпиксела, фрагмент фильтра Байера; 4 — прозрачный электрод из поликристаллического кремния или сплава индия и оксида олова; 5 — оксид кремния; 6 — кремниевый канал n -типа; 7 — зона генерации носителей — зона внутреннего фотоэффекта; 8 — зона потенциальной ямы (карман n -типа), где скапливаются электроны из зоны генерации носителей; 9 — кремниевая подложка p -типа.



Буферные регистры сдвига на ПЗС-матрице, равно как и обрамление КМОП-пиксела на КМОП-матрице, «съедают» значительную часть площади матрицы, в результате каждому пикселу достается лишь 30% светочувствительной области на ее поверхности. В матрице с полнокадровым переносом эта область составляет 70% поверхности. Именно поэтому в большинстве современных ПЗС-матриц над пикселом устанавливается микролинза. Такое простейшее оптическое устройство покрывает большую часть поверхности ПЗС-элемента и собирает все падающие на эту площадь фотоны в концентрированный световой поток, который, в свою очередь, направлен на довольно компактную светочувствительную область пиксела.

12.7.2.

ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТРИЦ

Светочувствительность, отношение сигнал/шум и физический размер пиксела взаимосвязаны (для матриц, созданных по одной и той же технологии). Чем больше физический размер пиксела, тем выше отношение сигнал/шум при заданной чувствительности или тем выше чувствительность при заданном отношении сигнал/шум. Физический размер матрицы и ее разрешение однозначно определяют размер пиксела, который, в свою очередь, определяет такую важную характеристику качества изображения, как динамический диапазон (D). Производители цифровых фотокамер, особенно любительских, о ней умалчивают. Но надо понимать, что при размерах используемых в них матриц широкий динамический диапазон не может быть реализован.

Отношение сигнал/шум. Всякое физическое тело совершает некоторые колебания относительно своего среднего состояния, в науке называемые флуктуациями. Вследствие этого каждое свойство всякого тела изменяется, колеблясь в некоторых пределах. Это справедливо и для светочувствительности фотоприемника, независимо от того, что собой представляет этот фотоприемник. В итоге отношение сигнал/шум не может иметь какое-то конкретное значение, а изменяется в зависимости от обстоятельств. В качестве примера можно рассмотреть обычную фотопленку, где фотодатчики — зерна бромистого серебра — и их размер и «качество» неконтролируемо меняются от точки к точке (изготовитель фотоматериала может обеспечить только среднее значение параметра и отклонение от среднего значения, но не конкретные значения параметра в конкретных позициях). В силу этого обстоятельства пленка, проявленная без экспозиции, продемонстрирует

некоторое, очень маленькое, но отличное от нуля почернение, которое называется вуалью. И в фотоматрице цифрового фотоаппарата наблюдается то же самое явление. В науке оно называется шумом, так как мешает правильному восприятию и отображению информации. Для точной передачи структуры исходного сигнала изображением необходимо, чтобы уровень сигнала превосходил уровень шумов, характерных для данного устройства.

Чувствительность. Применительно к матрицам используется термин «эквивалентная чувствительность», поскольку, во-первых, в зависимости от назначения матрицы формальное значение чувствительности может определяться разными способами по разным критериям; а во-вторых, аналоговым усилением сигнала и цифровой постобработкой можно менять чувствительность матрицы в широком диапазоне.

Эквивалентная чувствительность цифровых фотоаппаратов может меняться в диапазоне ISO 50...25 600. Максимальная чувствительность массовых фотоаппаратов соответствует отношению сигнал/шум 2...5.

Разрешение. Фотоматрица оцифровывает (разделяет на кусочки — пиксели) то изображение, которое формируется объективом фотоаппарата. Но если объектив в силу недостаточно высокой разрешающей способности передает ДВЕ светящиеся точки объекта, разделенные третьей черной, как одну светящуюся точку на ТРИ подряд расположенных пиксела, то говорить о высоком разрешении изображения фотоаппаратом не приходится.

В фотографической оптике существует приблизительное соотношение: если разрешающую способность фотоприемника выразить числом линий на миллиметр (или же пикселей на дюйм), обозначим ее M , и так же выразить разрешающую способность объектива (в его фокальной плоскости), обозначим ее N , то результирующее разрешение системы «объектив + фотоприемник», обозначим его K , можно найти по формуле

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{N} + \frac{1}{M} \quad \text{или} \quad K = \frac{NM}{N+M}. \quad (12.6)$$

При $N = M$ разрешение равно $N/2$. Желательно, чтобы разрешающая способность объектива соответствовала разрешающей способности фотоприемника.

Разрешающая способность современных цифровых фотоматриц определяется размером пиксела, который варьирует от 0,0025 до 0,0080 мм, а в большинстве фотоматриц равен 0,006 мм. Поскольку две точки будут различаться, если между ними находится

третья (незасвеченная) точка, то разрешающая способность соответствует расстоянию в два пиксела, т. е. $M = 1/2p$, где p — размер пиксела.

Разрешающая способность цифровых фотоматриц составляет от 200 линий на миллиметр (веб-камеры и мобильные телефоны) до 70 линий на миллиметр (крупноформатные цифровые фотокамеры).

Физический размер. Физические размеры фотосенсоров определяются размером пикселей. В современных матрицах пиксели обычно 0,005...0,006 мм. Чем крупнее пиксел, тем больше его площадь и количество собираемого им света и тем выше его светочувствительность и больше отношение сигнал/шум (в обычной фотографии шумы называются вуалью). Необходимое разрешение деталей фотографии определяет общее число пикселей, которое в современных фотоматрицах достигает десятков миллионов (мегапикселей) и тем самым задает физический размер фотоматрицы.

Законы оптики определяют зависимость качества изображения от физического размера матрицы. Если сфотографировать тремя фотоаппаратами с разными физическими размерами матрицы одну и ту же сцену из одной и той же точки и при одном и том же значении диафрагмы на объективах, изучить результат (файл на компьютере, распечатку с принтера) в одинаковых условиях, то снимок, сделанный фотоаппаратом с наименьшей матрицей, будет самого высокого качества (больше предметов в кадре будет показано резко), а снимок, сделанный фотоаппаратом с наибольшей матрицей, — самого низкого качества (предметы не в зоне резкости будут сильнее размыты).

Размеры фотосенсоров чаще всего обозначают как «тип» в виде дробных частей дюйма (например, 1/1,8", или 2/3"), которые фактически больше реального физического размера диагонали сенсора. Эти обозначения происходят от стандартных обозначений размеров трубок телекамер, принятых в 1950-х гг. Они выражают не размер диагонали матрицы, а внешний размер колбы передающей трубки. Инженеры быстро установили, что по различным причинам диагональ полезной площади изображения составляет около двух третей диаметра трубки. Это определение закрепилось (хотя и должно было быть давно заменено). Не существует четкой математической взаимосвязи «типа» сенсора, выраженного в дюймах, с фактической длиной его диагонали. Однако в грубом приближении можно считать, что диагональ составляет две трети типоразмера.

12.7.3. ТИПЫ МАТРИЦ ПО ПРИМЕНЯЕМОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Долгое время ПЗС-матрицы были практически единственным массовым видом фотосенсоров. Реализация технологии Active Pixel Sensors примерно в 1993 г. и развитие технологий привели в итоге к тому, что к 2008 г. КМОП-матрицы стали практически альтернативой ПЗС.

ПЗС-матрица состоит из светочувствительных фотодиодов, выполнена на основе кремния, использует технологию ПЗС-приборов с зарядовой связью.

КМОП-матрица выполнена на основе КМОП-технологии. Каждый пиксел снабжен усилителем считывания, а выборка сигнала с конкретного пиксела произвольна, как в микросхемах памяти.

Матрица SIMD WDR выполнена на основе КМОП-технологии, имеет в обрамлении каждого пиксела еще и автоматическую систему настройки времени его экспонирования, что позволяет радикально увеличить фотографическую широту устройства.

Матрица Live-MOS выполнена на основе МОП-технологии, однако в сравнении с другими типами матриц содержит меньшее число соединений для одного пиксела и питается меньшим напряжением. За счет этого и за счет упрощенной передачи регистров и управляющих сигналов можно получать «живое» изображение при отсутствии традиционного для такого режима работы перегрева и повышения уровня шумов.

Матрицы с пикселями разного размера. В фотоаппаратах фирмы Fujifilm применяются матрицы, получившие название «Super CCD», в которых присутствуют зеленые пиксели двух размеров. Большие — для малых уровней освещенности и малые — совпадающие по размеру с синими и красными. Это позволяет повысить качество изображения.

12.7.4. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЦВЕТНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ В ФОТОМАТРИЦАХ

Сам по себе пиксел фотоматрицы черно-белый. Для того чтобы матрица давала цветное изображение, используются специальные технические приемы.

Пример работы дихроических призм: поступающий в камеру свет, попадая на две дихроические призмы, разделяется на три основных цветовых пучка: красный, зеленый и синий. Каждый пучок направляется на отдельную матрицу (чаще всего используются

ССD-матрицы, поэтому в наименовании соответствующей аппаратуры употребляется обозначение ЗССD).

Преимущества ЗССD-матриц перед ПЗС-матрицами:

- лучше передача цветовых переходов, отсутствие цветного муара;
- выше разрешение; отсутствие необходимого для устранения муара low-pass-фильтра;
- выше светочувствительность и ниже уровень шумов;
- возможность цветокоррекции при установке дополнительных фильтров перед отдельными матрицами, а не перед съёмочным объективом, что позволяет добиться существенно лучшей цветопередачи при нестандартных источниках света.

Недостатки трех матриц по сравнению с одноматричными фотосенсорами:

- принципиально большие размеры;
- запрет использования с объективами с малым рабочим отрезком;
- проблема сведения цветов. Необходима точная юстировка, причем чем большего размера матрицы применяются и чем выше их физическое разрешение, тем сложнее добиться нужного класса точности.

Матрицы с мозаичными фильтрами. В таких матрицах пиксели расположены в одной плоскости, и каждый пиксел покрыт светофильтром определенного цвета. Недостающая цветовая информация восстанавливается путем интерполяции.

Существует несколько способов расположения светофильтров. Они различаются светочувствительностью и цветопередачей, причем чем выше светочувствительность, тем хуже цветопередача:

- RGGB — фильтр Байера, исторически самый ранний;
- RGBW. Такие сенсоры характеризуются более высокой чувствительностью и большей фотографической широтой (обычно выигрыш чувствительности в 1,5...2 раза, по фотографической широте — одна ступень). Частный случай RGBW-матрицы — CFAK-матрица компании Kodak;
- RGEV (красный — зеленый — изумрудный — синий);
- CGMY (голубой — зеленый — лиловый — желтый).

Матрицы с полноцветными пикселями. Существуют две технологии, позволяющие получать с каждого пиксела три цветовые координаты. Первая применяется в серийно выпускаемых камерах фирмы Sigma, вторая в 2008 г. существовала только в виде прототипа.

Многослойные матрицы (Foveon X3). Основная статья: Foveon X3. Фотодетекторы матрицы X3 компании Foveon расположе-

ны в три слоя — синий, зеленый, красный. Название сенсора «X3» означает его трехслойность и трехмерность. Матрицы X3 применяются в цифровых фотоаппаратах Sigma.

Полноцветные RGB-матрицы Nikon. В полноцветных матрицах Nikon (патент Nikon от 9 августа 2007 г.) лучи RGB предметных точек в каждом пикселе проходят в сжатом виде через линзу и при помощи цветоделительных зеркал в порядке «синий, зеленый, красный» попадают на подпиксельные детекторы.

12.8. ЛАЗЕРНЫЙ МИКРОПРОЕКТОР СО СПИРАЛЬНОЙ РАЗВЕРТКОЙ ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Микропроектор со спиральной разверткой разработан на факультете инженерной механики Вашингтонского университета.

Микропроектор имеет две исключительные особенности, которые выделяют его в ряду подобных устройств с механической разверткой луча. Первая — уникальные размеры: головка сканера имеет форму цилиндра диаметром всего 1,07 мм и длиной 13 мм! Вторая особенность конструкции сканера — спиральная развертка луча, точнее, развертка по спирали Архимеда. При таких малых размерах сканера обеспечивается довольно широкий угол сканирования — около 100° . В других устройствах для достижения такого широкого угла потребовалась бы дополнительная оптика и немалый объем.

Конструкция микропроектора представлена на рис. 12.35.

Механическая развертка лазерного луча, проходящего через оптоволокно от трех лазеров, осуществляется с помощью миниатюрного пьезопривода. При развертке источник света работает в импульсном режиме и обеспечивает подсветку только светящихся пикселей. При этом на электронный блок привода расходуется немного энергии; собственно привод тоже потребляет очень мало энергии, поскольку механические подвижные детали очень малы и невелика амплитуда их движения. В качестве источников могут использоваться лазерные светодиоды или твердотельные лазеры с довольно высокой эффективностью излучения — 10...20%. Кантилевер сканера крепится к торцу трубки пьезопривода. В трубке проходит оптоволокно, через которое передается модулированный поток света от лазерного светодиода. Светоизлучающий кончик волокна движется по спирали. Сигнал изображения, поступающий в обычном формате растровой развертки, буферизуется в ОЗУ. Для модуляции лазерного светодиода формируется другой выходной видеопоток данных, представленных уже в полярных координатах.

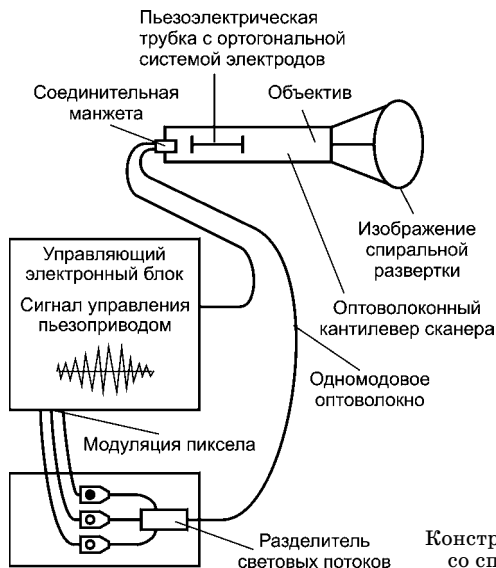


Рис. 12.35
Конструкция микропроектора со спиральной разверткой

Для управления пьезоприводом на одну систему электродов подаются сигналы синуса, на другую — сигналы косинуса. Маленькие размеры и низкое энергопотребление микропроектора обеспечивают идеальное решение для использования его в мобильных устройствах. Отсутствие подвижных частей гарантирует высокую надежность и долговечность сканера. Проекционная система может синтезировать изображение с разрешением, эквивалентным 500 строкам обычной развертки, и с кадровой частотой 30 Гц. Возможны и другие режимы развертки — 240 строк/60 Гц и 1000 строк/15 Гц, что позволяет отображать неподвижные объекты с высоким разрешением или просматривать видео с реальной кадровой разверткой.

12.9. КВАНТОВАЯ НАНОТЕХНОЛОГИЯ И ЕЕ ПРОДУКЦИЯ

12.9.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

При подготовке этого раздела использованы материалы, опубликованные в литературе [61, 79–81].

Нанотехнологии имеют дело с объектами размером около 10^{-9} м. Таковы отдельные атомы, у которых наиболее ярко проявляются волновые свойства. Волновые свойства частиц наиболее успешно объясняются квантовыми эффектами, имеющими место в микро-

мире. Поэтому целесообразно использование этих эффектов в нанотехнологиях.

Квантовые технологии являются одной из перспективных областей нанотехнологии. Сейчас ведутся работы в следующих направлениях:

- квантовая теория информации;
- квантовые компьютеры;
- квантовая криптография;
- связь.

Квантовая теория информации. Информация — не просто математическое понятие, она всегда имеет физическое воплощение, которое в традиционной теории информации следует законам классической физики, а в квантовой информатике — законам квантового мира. Простые правила квантовой механики порождают нетривиальные законы поведения сложных систем. Цель квантовой теории информации — выявление общих принципов, управляющих поведением этих сложных квантовых систем. Квантовая теория информации позволяет решить задачи, оказавшиеся неразрешимыми для классической теории информации. В конце XX в. было установлено, что использование наноструктур и квантовых законов, которым они подчиняются, способно радикально увеличить эффективность вычислений и повысить безопасность коммуникаций.

Квантовые компьютеры. Главное значение слова «компьютер» — машина для вычислений. Существуют классы вычислений, которые легче выполнить, используя квантовые, а не классические принципы. Есть и такие вычисления, которые в классическом случае просто невыполнимы. Например, никакой современный классический компьютер не способен по-настоящему «вычислить» случайное число. С другой стороны, при помощи квантовой технологии можно генерировать подлинно случайные числа (например, путем последовательного измерения поляризации фотонов).

Как бы ни развивалась технология квантовых вычислителей, они вряд ли целиком и полностью заменят классические компьютеры. В лучшем случае, как представляется автору, будут созданы квантовые сопроцессоры, ответственные за определенные типы вычислений.

Если производительность обычного процессора пропорциональна количеству элементов (транзисторов), то в случае квантового компьютера добавление каждого элемента экспоненциально увеличивает его производительность. Считается, что квантовый

компьютер, состоящий из 1000 кубитов, будет заведомо превосходить по производительности любые современные компьютеры.

Квантовая криптография. Технология квантовой криптографии опирается на принципиальную неопределенность поведения квантовой системы: невозможно одновременно получить координаты и импульс частицы, невозможно измерить один параметр фотона, не исказив другой. Квантовая криптография — метод защиты коммуникаций, основанный на определенных явлениях квантовой физики, рассматривает случаи, когда информация переносится с помощью объектов квантовой механики.

Квантовая криптография, по словам Боба Гельфонда, главного исполнительного директора компании Magiq, позволит существенно повысить безопасность передачи данных. Некоторые специалисты считают, что квантовая криптография может стать абсолютно неуязвимым методом шифрования. Если в традиционных вариантах криптографии стороны (отправитель и получатель информации) обмениваются довольно длинными цифровыми ключами, то в квантовой криптографии другая идея: в целях защиты информации используется природа объектов микромира — квантов света (фотонов), поведение которых подчиняется законам квантовой физики. Информация о ключе заключается в единственном фотоне. Согласно принципам квантовой физики при выполнении измерений состояние квантовой системы меняется, а полученная в результате информация не полностью соответствует состоянию системы до измерений. Попытка перехвата информации, таким образом, будет неизбежно обнаружена. Обмен квантовыми ключами позволяет обеспечить безопасную передачу данных в оптических сетях.

12.9.2.

РАЗРАБОТКИ КВАНТОВЫХ КОМПЬЮТЕРОВ

В современной науке обрабатывается много различных идей и теорий, многие из которых кажутся совершенно фантастическими, но открывают со временем новые возможности, недоступные ранее. Присматриваясь к ним, можно разглядеть контуры будущего, в том числе весьма отдаленного. Одной из таких идей, которые прорабатываются в настоящее время, является развитие квантового счисления и квантовых компьютеров (КК).

Элементарной ячейкой памяти в КК является квантовый бит, или кубит (qubit). Однако между классическим битом и кубитом существует принципиальное отличие. Если бит может находиться в одном из двух булевых состояний — «0» или «1», то кубит

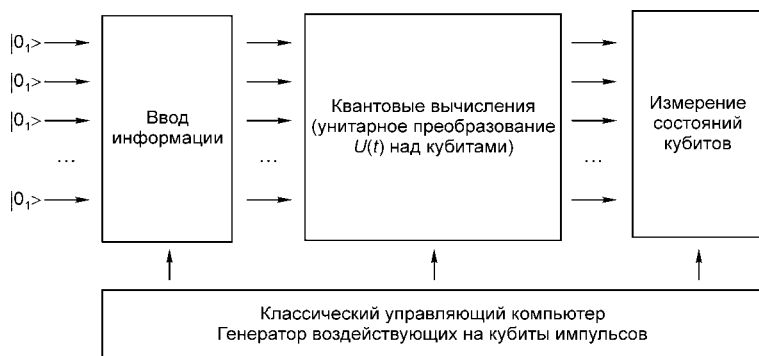


Рис. 12.36
Структурная схема работы КК

может находиться в состоянии, представляющим собой суперпозицию базисных состояний. В качестве кубитов рассматриваются различные квантовые двухуровневые системы, и искомой характеристикой могут быть электронные и ядерные спины со спиновым квантовым числом $I = 1/2$.

Принцип работы КК поясняет структурная схема, приведенная на рис. 12.36.

Квантовый компьютер обладает рядом преимуществ перед классическим. В отличие от классических, КК оперирует при вычислении не с числами, а с квантовыми состояниями. Иначе говоря, когда в классическом компьютере вычисляется единственное выходное значение для одного входного, в КК вычисляются значения для всех выходных состояний, именно этот процесс принято называть квантовым параллелизмом.

В начале 1980-х гг. нобелевский лауреат Ричард Фейнман из Калифорнийского технологического института, известный как автор «Фейнмановских лекций по физике», увлек научную общественность идеей точного моделирования явлений квантовой физики на компьютере принципиально нового типа — квантовом.

Кроме Фейнмана, идеи квантовых вычислений пропагандировали такие физики-теоретики, как Поль Бениофф из Аргонской национальной лаборатории в Иллинойсе, Дэвид Дойч из Оксфордского университета и Чарльз Беннетт из Исследовательского центра ИВМ им. Т. Дж. Ватсона в Йорктаун-Хайтсе (штат Нью-Йорк). Не стоит забывать также и о российском математике Ю. И. Манине, чей первый труд по квантовому компьютерингу появился еще в 1980 г.

Долгое время идея квантового компьютера считалась ненаучной фантастикой, пока в 1994 г. Питер Шор из исследовательского

подразделения AT&T Research не описал специфичный квантовый алгоритм для разбиения на простые множители (факторизации) больших чисел.

В 1998 г. в Калифорнийском университете Беркли под руководством доктора Айзека Чуанга был создан первый двухкубитовый квантовый компьютер, который позволял реализовать четыре вычислительных потока.

Современные разработки рассматривают возможность работы квантовых компьютеров на основе различных материалов и явлений. Сейчас в области квантовых компьютеров ведутся разработки по следующим направлениям:

- квантовые компьютеры на основе ядерного магнитного резонанса в молекулярных, жидкостных или твердых телах;
- компьютеры на ионах в ловушках;
- компьютеры на нейтральных атомах;
- квантовая оптика резонансных явлений *caviti QED*;
- оптические квантовые компьютеры, реализующие квантовые операции с помощью линейных оптических элементов;
- твердотельные квантовые компьютеры;
- квантовые компьютеры на сверхпроводниковых элементах;
- квантовые компьютеры на электронах, «плавающих» на поверхности жидкого сверхтекучего вещества.

Большое внимание уделяется идее использования для модельной реализации квантовых компьютеров в качестве кубитов уровней энергии ионов, захваченных ионными ловушками, создаваемыми в вакууме определенной конфигурацией электрического поля в условиях лазерного охлаждения их до микрокельвиновых температур.

Первый прототип квантового компьютера на этих принципах был предложен австрийскими физиками И. Цираком и П. Цоллером в 1995 г. В настоящее время интенсивные экспериментальные исследования ведутся в Los Alamos Natl. Lab. (LANL) и Natl. Inst. Stand. Tech. (NIST) в США. Преимущество такого подхода состоит в сравнительно простом индивидуальном управлении отдельными кубитами. Основными недостатками квантовых компьютеров этого типа являются необходимость создания сверхнизких температур, обеспечение устойчивости состояний ионов в цепочке и ограниченное число кубитов ($n < 40$).

Ведутся разработки по использованию в качестве кубитов входящих в молекулы органических жидкостей атомов с ядерными спинами. Прорабатывается применение методов ядерного магнитного резонанса (ЯМР) для управления кубитами.

Первые предложения были сформулированы в Massach. Inst. Tech. (MIT), LANL в США и в Clarendon Lab. в Оксфорде в Великобритании в 1997 г., и в том же году были выполнены первые эксперименты на ядерных спинах двух атомов водорода в молекулах 2,3-дибромотиофена и на трех ядерных спинах — одном в атоме водорода и двух в изотопах углерода в молекулах трихлорэтилена.

В области квантовых компьютеров на основе ЯМР в органических жидкостях к настоящему времени достигнуты наибольшие успехи. Они связаны в основном с хорошо развитой импульсной техникой ЯМР-спектроскопии, обеспечивающей выполнение различных операций над когерентными суперпозициями состояний ядерных спинов, и с возможностью использования для этого стандартных ЯМР-спектрометров, работающих при комнатной температуре.

В 1998 г. Д. В. Авериним (российским ученым, ныне работающим в США) было предложено использовать в качестве кубитов зарядовые состояния куперовских пар в квантовых точках, связанных переходами Джозефсона.

Первый твердотельный кубит на этих принципах был создан в NEC Fund. Res. Lab. в Японии в 1999 г. Полагают, что перспективность этого направления состоит в возможности создания электронных квантовых устройств высокой степени интеграции на одном кристалле, при этом для управления кубитами не потребуются громоздкие лазерные или ЯМР-установки. Однако на пути создания квантовых компьютеров еще остаются нерешенными ряд серьезных проблем, в частности устойчивость состояний кубитов и декогерентизация.

Исследования в области квантовых компьютеров на высокотемпературных сверхпроводниках в России ведутся в Институте теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН.

Перечисленные выше три в разной степени реализованных направления развития элементной базы квантовых компьютеров дополнились еще двумя, широко обсуждаемыми пока на уровне предложений.

Большие перспективы у направления твердотельных квантовых компьютеров на основе ЯМР. В 1998 г. австралийским физиком Б. Кейном было предложено использовать в качестве кубитов обладающие ядерным спином $1/2$ донорные атомы с изотопами P31, имплантированные в кремниевую структуру. Если эта идея будет реализована, появится возможность создания квантовых вычислительных устройств с практически неограниченным

числом кубитов. В России работы в этом направлении ведутся в Физико-технологическом институте РАН.

Еще одним интересным направлением является использование в качестве состояний кубитов двухспиновых или двухзарядовых электронных состояний в полупроводниковых наноструктурах, в частности в квантовых точках, формируемых в гетероструктурах типа AlGaAs/GaAs, либо со спин-спиновым обменным, либо с электрическим взаимодействием кубитов. Индивидуальное управление кубитами в случае спиновых электронных состояний предполагается осуществлять с помощью так называемых спиновых клапанов, а для измерения состояния отдельного спина использовать спиновые фильтры из ферромагнитных туннельных барьеров. В случае зарядовых состояний предполагается управлять кубитами с помощью либо электрического воздействия на высоту разделяющего их барьера, либо посредством лазеров инфракрасного диапазона. Активные поисковые исследования в этом направлении проводятся в исследовательских центрах IBM. Моделированием полупроводниковых кубитовых наноструктур из квантовых точек в России занимаются в Физико-технологическом институте РАН.

Среди других направлений есть и такие пока еще слабо разработанные идеи, как использование квантовых электродинамических полостей для фотонов и фотонных кристаллов; электронов, плавающих на поверхности жидкого гелия; системы двух одномерных квантовых каналов для электронных волн (квантовые проволоки); системы ядерных спинов в двумерном электронном газе в условиях квантового эффекта Холла и некоторые другие.

Специалисты Los Alamos Nat. Lab предлагают использовать магнитный атомно-силовой микроскоп с крошечным (4 нм) магнитом на острое кантилевера. Оказывается, такой микроскоп позволяет измерять чистое состояние отдельного ядерного спина («спин вверх» или «спин вниз»). Система спинов помещается в постоянное внешнее магнитное поле, создаваемое сверхпроводящим магнитом. Измерение состояния выделенного кубита производится при подведении к нему острия микроскопа и включении радиочастотного (РЧ) электромагнитного поля на частоте ЯМР. Для повышения чувствительности микроскопа амплитуда этого поля промодулирована с резонансной частотой колебаний кантилевера.

Американские физики Р. М. Platzman (Bell Laboratories, Lucent Technologies) и М. I. Dykman (Michigan State University) раз-

работали квантовый компьютер на электронах, плавающих на поверхности жидкого сверхтекучего гелия. Как известно, электроны, находящиеся вблизи границы жидкого гелия и вакуума, попадают в потенциальную яму сил изображения и создают двумерный электронный газ. Низшее и первое возбужденное состояния электрона в этой яме могут служить квантовым битом.

Схема оптического квантового компьютера хорошо известна. Но ее не торопятся воплощать ввиду малой пригодности для практических целей — слишком громоздки оптические элементы, делители, фазовращатели. Идея использовать электронные волны вместо оптических общепризнанна, так что трудно установить ее автора. Заслуга сотрудников Engineering Department, University of Cambridge (Англия) состоит в том, что они детально разработали устройство на электронных волнах, выполняющее квантовые логические алгоритмы.

В феврале 2007 г. канадская компания D-Wave Systems представила первый работающий прототип квантового компьютера Orion. И это случилось лет на 20 раньше, чем предсказывали ученые. Квантовый компьютер Orion — это первая реализация технологии, позволяющей осуществлять одновременно до 65 536 вычислительных потоков. Его создатель — компания D-Wave занимается только этой проблемой; уставный капитал предприятия составил 20 млн долларов, а конечной целью является разработка доступного и эффективного устройства. Презентация работающего в Ванкувере компьютера состоялась в Силиконовой долине. Чип устройства выполнен из ниобия, который охлаждается в жидком гелии до температуры, близкой к абсолютному нулю. Поэтому компьютер называют адиабатическим, так как при таком охлаждении создаются условия, когда система не получает и не отдает тепло. При этом 16 металлических дорожек из ниобия, расположенные на кремниевой подложке и разделенные изолятором, начинают пропускать электрический ток по часовой стрелке, против нее или в обоих направлениях. Таким образом, выполняется главное условие квантовых вычислений — суперпозиция двух состояний в квантовом кубите информации. Вся информация хранится в виде направлений течения тока по металлическим петлям и переходам. Работа квантового компьютера основана на измерении магнитных полей и переводе их изменений, вызванных ниобием, в результат счисления.

Позже, в 2008 г., компания D-Wave Systems представила 28-кубитовый **квантовый процессор Leda** с усовершенствованной технологией связи между кубитами. Для демонстрации возможностей

квантового компьютера выбрано приложение, определяющее сходство изображений. Кроме того, представители D-Wave готовы к обсуждению других задач, включающих сопоставление с образцом, поиск и оптимизацию.

Работают над квантовыми компьютерами и в России. Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН и Физико-технологический институт РАН проводят опыты с квантовыми компьютерами разной архитектуры, с разными материалами.

Российский исследователь М. В. Фейгельман, работающий в Институте теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН, предлагает собирать квантовые регистры из миниатюрных сверхпроводниковых колец. Каждое кольцо выполняет роль кубита, а состояниям «0» и «1» соответствуют направления электрического тока в кольце — по часовой стрелке и против. Переключать такие кубиты можно магнитным полем.

В Физико-технологическом институте РАН группа под руководством академика К. А. Валиева предложила два варианта размещения кубитов в полупроводниковых структурах. В первом случае роль кубита выполняет электрон в системе из двух потенциальных ям, создаваемых напряжением, приложенным к мини-электродам на поверхности полупроводника. Состояния «0» и «1» — положения электрона в одной из этих ям. Переключается кубит изменением напряжения на одном из электродов. В другом варианте кубитом является ядро атома фосфора, внедренного в определенную точку полупроводника. Состояния «0» и «1» — направления спина ядра вдоль и против внешнего магнитного поля. Управление ведется с помощью совместного действия магнитных импульсов резонансной частоты и импульсов напряжения.

На протяжении многих лет параллельно с японскими исследователями российские ученые А. Орликовский, В. Вьюрков, А. Ветров (ФТИАН) и Л. Горелик (Chalmers University, Швеция) работают над идеей квантового компьютера в канале транзистора. Они разрабатывают идею изменения состояния спина электрона, помещенного в канал полевого транзистора, с помощью тока в квантовой нити.

Многие зарубежные научные школы и направления работ по созданию квантовых компьютеров возглавляют наши соотечественники: Ю. Мамин — Исследовательский центр IBM, США; А. Китаев — Microsoft Corporation, США; Ю. Пашкин — Japan Science and Technology Corporation; А. Сергиенко — Boston University, США; М. Лукин — Harvard, США; Л. Левитов — MIT, США; А. Усти-

нов — Phisicalisches Institut, Германия; Д. Аверин, К. Лихарев — Story Brook State University of New York, США.

На семинаре по квантовой информатике в Физико-технологическом институте РАН А. А. Кокин выступил с обзором современных экспериментальных достижений в области квантовых компьютеров. Ученый, составляя обзор, основывался на законе Мура, который гласит, что удвоение элементов микросхемы происходит каждые два года. Этот закон соблюдается в микроэлектронике на протяжении многих десятилетий. Если взять за начало отсчета компьютер на ионах в ловушках с двумя кубитами, который был представлен в 2006 г., то 100 кубитов следует ожидать в 2014 г., 1000 кубитов — в 2020 г. Такой компьютер позволил бы практически решать серьезные задачи.

К. А. Валиев, заведующий лабораторией квантовых компьютеров, высказал другой принцип прогнозирования. Развитие техники показывает, что с момента изобретения до момента широкого использования проходит 50 лет. Если начальным моментом считать год публикации статьи Р. Фейнмана (1984), то полномасштабный квантовый компьютер должен появиться только в 2034 г. История покажет, кто прав. Однако оба прогноза предполагают интенсивную работу и достаточное финансирование.

12.9.3. РАЗРАБОТКИ В КВАНТОВОЙ КРИПТОГРАФИИ

В мире существует несколько организаций, где ведутся активные исследования в области квантовой криптографии.

В IBM продолжаются фундаментальные исследования в области квантовых вычислений, начатые группой во главе с Чарльзом Беннеттом в 1984 г. О практических достижениях IBM в квантовой криптографии в последние годы известно немного; эти работы не рекламируются.

Исследования в области квантовой криптографии ведутся и в европейском исследовательском центре Toshiba Research Europe, расположенном в Кембридже. Отчасти они спонсируются английским правительством; в них участвуют сотрудники Кембриджского университета и Империял-колледжа в Лондоне.

QinetiQ, своего рода исследовательская корпорация, поддерживаемая министерством обороны Великобритании, также продолжает разработки в области квантовой криптографии.

Среди компаний, занимающихся исследованиями в квантовой криптографии, — GAP-Optique, Mitsubishi, Национальная

лаборатория в Лос-Аламосе, Калифорнийский технологический институт (Caltech), а также молодая компания MagiQ.

В марте 2004 г. Евросоюз запустил программу «Безопасные коммуникации на основе квантовых вычислений» (Secure Communications with Quantum Computing) с бюджетом 13 млн долл. Авторы проекта надеются, что в конечном итоге им удастся создать криптографическую систему, гарантирующую абсолютную защиту от взлома. В проекте примут участие ученые из Австрии, Бельгии, Великобритании, Канады, Чехии, Дании, Франции, Германии, Италии, Швеции, Швейцарии и России.

Предполагается, что в основу новой криптографической структуры будет положена система SECOQC (Secure Communication based on Quantum Cryptography), предназначенная не столько для передачи уже зашифрованных данных, сколько для безопасной генерации и обмена криптографическими ключами, которые и будут впоследствии использоваться для шифрования данных. Ученые, работающие над программой SECOQC, в 2008 г. отчитались, что успешно протестировали систему, которая в следующие три-четыре года приведет к коммерциализации практически невзламываемой технологии. Такое событие станет колоссальным прорывом в технологии обеспечения безопасности. Пользователи смогут избежать утомительных проблем работы с ключами, поскольку любой квантовый ключ генерируется случайно и уникален для каждого применения. А сами ключи будут невзламываемыми, так как для сбора и обработки их фотонов-переносчиков потребуются специальный приемник.

Прогресса на пути создания квантовых вычислительных сетей достигли Д. Н. Мацукевич и А. Кузьмич, ученые Технологического института штата Джорджия, разработавшие технологию переноса информации, закодированной в состояниях атомов рубидия, в состояния единичных фотонов. Такой перенос имеет очень большое значение для реализации масштабируемых квантовых компьютеров, а также для развития квантовых сетевых технологий. Использовать эту методику можно будет уже через 7–10 лет.

Первые действующие системы квантовой криптографии. В июне 2004 г. в Кембридже (Массачусетс, США) была запущена в действие первая в мире компьютерная сеть Quantum Net, состоящая более чем из двух узлов, безопасность связи в которой обеспечивалась с помощью квантовой криптографии. Сеть связала компьютеры Кембриджского и Гарвардского университетов. Позже к ней были подключены и компьютеры Бостонского университета.

Пока Quantum Net состоит из шести серверов, которые можно интегрировать с Интернетом. Данные в Qnet передаются по оптоволоконным кабелям, протянутым на 10 км между кембриджской компанией BBN Technologies и Гарвардским университетом. Криптографический ключ зашифровался в состоянии унитарной поляризации серий единичных фотонов. Коммерческим внедрением этой разработки будет заниматься на контрактной основе британская компания QinetiQ.

В 2008 г. в Европе реализована система квантовой криптографии, которая положена в основу работы компьютерной сети, развернутой в столице Австрии — городе Вене. Сами разработчики называют свою сеть «невзламываемой», так как она опирается на базовые физические принципы, нарушение которых ведет к разрушению последовательности информации. На практике это означает, что система сама себя шифрует. Фотоны света, курсирующие в сетях, представляют собой «ключи шифрования» и информацию одновременно.

Пока в сеть объединены шесть австрийских офисов компании Siemens, этот же производитель создал оборудование для квантовой системы кодирования/декодирования данных. Система состоит из специальных боксов размером с системный блок компьютера, оснащенных световыми детекторами.

Разработчики говорят, что использованный принцип известен специалистам в деталях уже полтора десятка лет, но вот реализовать такую систему в масштабах города удалось только в 2008 г. Была продемонстрирована работа сети и систем квантовой криптографии. По словам инженеров из Университета Вены, в самом ближайшем будущем такие системы будут востребованы в банковской, военной, промышленной и телекоммуникационной сферах.

В штате Массачусетс с 2005 г. в сети Quantum Network агентства передовых оборонных разработок США DARPA, разработанной компанией BBN Technologies, действует линия беспроводной передачи данных с квантовым шифрованием. В настоящий момент она объединяет 10 абонентов, среди которых офисы BBN, а также Гарвардский и Бостонский университеты.

Судя по результатам разработок, европейские ученые и инженеры имеют определенные преимущества в развитии квантовых информационных и коммуникационных технологий. Европейское космическое агентство уже разрабатывает планы создания защищенных каналов космической связи как элемента будущей глобальной сети.

Тестовые вопросы к главе 12

«НАНОФОТОННЫЕ ПРИБОРЫ, УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ»

- 12.1. На основе каких структур создают нанoeлектронные лазеры:
 а) моно $p-n$ -переходов;
 б) гетероструктур;
 в) полимерных материалов;
 г) жидких кристаллов?
- 12.2. Какая особенность присуща лазерам с вертикальным резонатором:
 а) отсутствие горизонтальных резонаторов;
 б) встроенная система накачки;
 в) низкий пороговый ток;
 г) высокий КПД?
- 12.3. В каких приборах используется электронная эмиссия нанотрубок:
 а) в транзисторах;
 б) в осветительных лампах;
 в) в дисплеях;
 г) в фотоприемниках?
- 12.4. На основе какой технологии можно создать дисплей-невидимку:
 а) LED;
 б) OLED;
 в) TOLED;
 г) PHOLED?
- 12.5. Какие дисплеи отличаются низким энергопотреблением:
 а) на основе кинескопа;
 б) на основе светодиодов;
 в) на основе жидких кристаллов;
 г) на основе плазменных панелей?
- 12.6. Какие элементы используются для управления излучающими светодиодами AMOLED:
 а) биполярные транзисторы;
 б) тонкопленочные полевые транзисторы;
 в) тонкопленочные диоды;
 г) MEMS-ключи?
- 12.7. Какой тип эмиссии используется в современных катодолупи-несцентных дисплеях:
 а) с помощью катода с косвенным подогревом;
 б) с помощью катода с косвенным подогревом;
 в) с помощью полевой эмиссии электронов;
 г) с помощью инжекции электронов $p-n$ -перехода?
- 12.8. Какой эффект используется в работе нанoeлектронных фотоприемников на квантовых схемах:
 а) туннельный;
 б) размерного квантования;
 в) тиристорный;
 г) лавинного пробоя?
- 12.9. Какой квантовой эффективностью характеризуются фотоприемники на квантовых точках:
 а) $n < 1\%$;
 б) $n \approx 3...30\%$;
 в) $n \approx 31...50\%$;
 г) $n > 50\%$?
- 12.10. С какой целью в микропроекторах используют спиральную развертку:
 а) для обеспечения высокой четкости изображения;
 б) для обеспечения широкого угла сканирования;
 в) для упрощения системы вывода изображения;
 г) для снижения стоимости элементов развертки?

ОТВЕТЫ НА ТЕСТОВЫЕ ВОПРОСЫ

Глава 1

Вопрос	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.10
Ответ	в	б	г	а	е, г, д, б, а, ж, в	в	б	а	в	а

Глава 2

Вопрос	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.10
Ответ	б	а	а	б	в	в	г	в, г	б	б

Глава 3

Вопрос	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	3.10
Ответ	б	б	в	б	а	г	а	а, г	в	г

Глава 4

Вопрос	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	4.10
Ответ	б	б	в	г	а	б	а	д, е	б, е	ж

Глава 5

Вопрос	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	5.10
Ответ	а	б	а	б	а	б	а	в	в	а, б

Глава 6

Вопрос	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7	6.8	6.9	6.10
Ответ	а	б, в	в	г	б	г	в, г	б	б	б

Глава 7

Вопрос	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9	7.10
Ответ	в	а	б	в, г	а	б	а	б	г	д

Глава 8

Вопрос	8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7	8.8	8.9	8.10
Ответ	в	в	а	б	а	б	в	г	д	е

Глава 9

Вопрос	9.1	9.2	9.3	9.4	9.5	9.6	9.7	9.8	9.9	9.10
Ответ	а	б, г	г	б, г	в, г	в, г	г	б	в	г

Глава 10

Вопрос	10.1	10.2	10.3	10.4	10.5	10.6	10.7	10.8	10.9	10.10
Ответ	г	в	б	а	г	б	в, г	в	б, в	в

Глава 11

Вопрос	11.1	11.2	11.3	11.4	11.5	11.6	11.7	11.8	11.9	11.10
Ответ	г	г	б	г	г	г	б	а, г	б, в	в, г

Глава 12

Вопрос	12.1	12.2	12.3	12.4	12.5	12.6	12.7	12.8	12.9	12.10
Ответ	б	а, в	в	в	в	б, г	в	б	б	б, в

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПАРАМЕТРЫ

Параметр	Единица измерения	Corning Inc		
		50/125	62,5/125	InfiniCor 300
Геометрические характеристики				
Диаметр сердцевины	мкм	50,0±3,0	62,5±3,0	62,5±3,0
Диаметр оболочки	мкм	125±2,0	125±2,0	125±2,0
Погрешность концентричности сердцевины	мкм	≤ 3,0	≤ 3,0	≤ 3,0
Некруглость сердцевины	%	≤ 5	≤ 5	≤ 5
Некруглость оболочки	%	≤ 2	≤ 2	≤ 2
Диаметр покрытия	мкм	245±5,0	245±5,0	245±5,0
Погрешность концентричности покрытия	мкм	≤ 12	≤ 12	≤ 12
Передаточные характеристики				
Рабочий диапазон длин волн	нм	850...1300	850...1300	850...1300
Числовая апертура		0,220±0,015	0,275±0,015	0,275±0,015
Коэффициент затухания на длине волны:	дБ/км			
850 нм		≤ 2,5	≤ 3,0	≤ 3,0
1310 нм		≤ 0,8	≤ 0,7	≤ 0,7
Длина волны нулевой дисперсии	нм	1300	1332	1332
		1320	1354	1354
Ширина полосы пропускания на длинах волн 850/1310 нм (со светодиодными источниками)	МГц·км	400/400	160/500	н/д
		400/600		
		400/1200		
		500/500	200/500	
		600/600		
		600/1000		
Наклон дисперсионной кривой в точке нулевой дисперсии	пс/нм ² ·км	≤ 0,101	≤ 0,097	≤ 0,097
Локальные неоднородности затухания в интервале рабочих длин волн 850...1310 нм	дБ	≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,2

МНОГОМОДОВЫХ ОВ ТИПА G.651

Corning Inc			Alcatel			
InfiniCor 600	InfiniCor CL 1000	InfiniCor SX+	6930 Multimode 50/125	6931 Multimode GLight 62,5/125	6932 Multimode 62,5/125	
Геометрические характеристики						
50,0±3,0	62,5±3,0	50,0±3,0	50,0±3,0	62,5±3,0	62,5±3,0	
125±2,0	125±2,0	125±2,0	125±2,0	125±3,0	125±3,0	
≤ 3,0	≤ 3,0	≤ 3,0	≤ 3,0	≤ 3,0	≤ 3,0	
≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 6	≤ 6	≤ 6	
≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2	
245±5,0	245±5,0	245±5,0	245±10,0	245±10,0	245±10,0	
≤ 12	≤ 12	≤ 12	≤ 12,5	≤ 12,5	≤ 12,5	
Передаточные характеристики						
850...1300	850...1300	850...1300	850...1300	850...1300	850 1300	
0,220±0,015	0,275±0,015	0,220±0,015	0,220±0,015	0,275±0,015	0,275±0,015	
≤ 2,5	≤ 3,0	≤ 2,5	2,4...2,8	2,4	2,8...3,5	
≤ 0,8	≤ 0,7	≤ 0,8	0,6...1,0	0,5	0,8...1,5	
1300	1332	1300	1295	1320	1320	
1320	1354	1320	1320	1365	1365	
н/д	н/д	1500/500	300/300	200/500	1600/200	
			400/800		200/500	
			600/1200		250/800	
≤ 0,101	≤ 0,097	≤ 0,101	≤ 0,11	≤ 0,11	≤ 0,11	
≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,2	

Параметр	Единица измерения	Corning Inc						
		50/125	62,5/125	InfiniCor 300				
Прирост коэффициента затухания на длине волны гидроксильного пика 1383 нм относительно коэффициента затухания на длине волны 1310 нм	дБ/км	≤ 3,0	≤ 1,0	≤ 1,0				
Пропускная способность: расстояние передачи по протоколу IEEE802.3 на длинах волн:	м	н/д	н/д					
1 Gigabit Ethernet								
850 нм				300				
1310 нм				500				
10 Gigabit Ethernet 850 нм				н/д				
Прирост коэффициента затухания на длинах волн 850 и 1310 нм при воздействии факторов окружающей среды:	дБ/км							
температуры от –60 до +80°C						≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,2
циклов от –10 до +85°C при влажности 98%						≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,2
Прирост коэффициента затухания из-за микроизгибов	дБ/км	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5				
Рабочий интервал температур	°C	–60...+85	–60...+85	–60...+85				
Эффективный групповой показатель преломления на длинах волн:								
850 нм						1,490	1,496	1,496
1310 нм						1,486	1,491	1,491
Механические характеристики								
Уровень напряжения при prooftest-испытаниях	Гн/м ²	0,7	0,7	0,7				
Параметр динамической усталости <i>n</i>	н/д	20	20	20				
Усилие стягивания покрытия	Н	3,2	3,2	2,7				

Продолжение табл.

Corning Inc			Alcatel		
InfiniCor 600	InfiniCor CL 1000	InfiniCor SX+	6930 Multimode 50/125	6931 Multimode GLight 62,5/125	6932 Multimode 62,5/125
≤ 3,0	≤ 1,0	≤ 3,0	н/д	н/д	н/д
			н/д		н/д
600	500	н/д		275	
600	1000	н/д		1200	
н/д	н/д	300		н/д	
≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,2
			-10...+70°C	-10...+70°C	-10...+70°C
≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,2
≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
-60...+85	-60...+85	-60...+85	-60...+85	-60...+85	-60...+85
1,490	1,496	1,490	1,482	1,497	1,482
1,486	1,491	1,386	1,480	1,492	1,480
Механические характеристики					
0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
20	20	20	20	20	20
2,7	2,7	2,7	> 1,0	> 1,0	> 1,0

ПАРАМЕТРЫ

Параметр	Единица измерения	OFS	
		Graded Index Multimode	
		50/125	62,5/125
Геометрические параметры			
Диаметр сердцевины	мкм	50,0±2,5	62,5±2,5
Диаметр оболочки	мкм	125,0±1,0	125,0±1,0
Погрешность concentричности сердцевины	мкм	≤ 1,5	≤ 1,5
Некруглость сердцевины	%	≤ 5	≤ 5
Некруглость оболочки	%	≤ 1	≤ 1
Диаметр покрытия	мкм	245±10	245±10
		500±25	500±25
Погрешность concentричности покрытия	мкм	н/д	н/д
Передаточные характеристики			
Рабочий диапазон длин волн	нм	850...1300	850...1300
Числовая апертура		0,220±0,015	0,275±0,015
Коэффициент затухания на длине волны:	дБ/км		
850 нм		≤ 2,5	≤ 3,0
1310 нм		≤ 0,7	≤ 0,8
Длина волны нулевой дисперсии	нм	1297	1320
		1316	1365
Наклон дисперсионной кривой в точке нулевой дисперсии	пс/(нм ² ·км)	≤ 0,101	≤ 0,097
Локальные неоднородности затухания в интервале рабочих длин волн 850...1310 нм	дБ	н/д	н/д
Прирост коэффициента затухания на длине волны гидроксильного пика 1383 нм относительно коэффициента затухания на длине волны 1310 нм	дБ/км	н/д	н/д

МНОГОМОДОВЫХ ОВ ТИПА G.651

OFS				Fujikura	
Graded Index Multimode	LaserWave G+	GigaGuide	LaserWave 500/300	G.50/125UV	
100/140	50/125	62,5/62.5XL			
Геометрические параметры					
100±4	50,0±2,5	62,5±2,5	50,0±2,5	50,0±2,5	
140±3,0	125,0±1,0	125,0±1,0	125,0±1,0	125,0±2,0	
≤ 3,0	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5	
≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 6	
≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1	
245±10	245±10	245±10	245±10	245±10	
500±25					
н/д	≤ 6	≤ 6	≤ 6	≤ 12,5	
Передаточные характеристики					
850...1300	850...1300	850...1300	850...1300		
0,290±0,015	0,200±0,015	0,275±0,015	0,200±0,015	0,200±0,015	
				≤ 2,4	
				≤ 0,7	
≤ 4,0	≤ 2,4	≤ 2,9	≤ 2,4		
≤ 1,5	≤ 0,7	≤ 0,7	≤ 0,7		
1332	1297	1320	1297	н/д	
1358	1316	1365	1316		
≤ 0,097	≤ 0,101	≤ 0,097	≤ 0,101	н/д	
н/д	≤ 0,08	≤ 0,08	≤ 0,08	н/д	
н/д	≤ 1,5	≤ 1,0	≤ 1,0	н/д	

Параметр	Единица измерения	OFS				
		Graded Index				
		50/125	62,5/125			
Ширина полосы пропускания на длинах волн (со светодиодными источниками)	МГц·км					
850 нм		400	160			
1310 нм		400	500			
Прирост коэффициента затухания из-за микроизгибов (100 витков \varnothing 75 мм на длинах волн 850 и 1310 нм)	дБ/км	$\leq 0,5$	н/д			
Пропускная способность: расстояние передачи по протоколу IEEE802.3 на длинах волн:	м	н/д	н/д			
1 Gigabit Ethernet						
850 нм						
1310 нм						
10 Gigabit Ethernet 850 нм						
Рабочий интервал температур	$^{\circ}\text{C}$	н/д	н/д			
Эффективный групповой показатель преломления на длинах волн:						
850 нм					1,483	1,496
1310 нм					1,479	1,491
Прирост коэффициента затухания при воздействии факторов окружающей среды на длинах волн 850 и 1310 нм:	дБ/км	н/д	н/д			
температуры от -60 до $+80^{\circ}\text{C}$						
циклов от -10 до $+85^{\circ}\text{C}$ при влажности 98%						
погружение в воду при $+23^{\circ}\text{C}$						
ускоренного старения при $+85^{\circ}\text{C}$						
Механические характеристики						
Уровень напряжения при prooftest-испытаниях	Гн/м ²	0,7	0,7			
Параметр динамической усталости n	н/д	н/д	н/д			
Усилия стягивания покрытия	Н	н/д	н/д			

Продолжение табл.

	OFS				Fujikura
	Multimode 100/140	LaserWave G+ 50/125	GigaGuide 62,5/62.5XL	LaserWave 500/300	G.50/125UV
			н/д		
	100	950 (лазер)		4000/2000 (лазер)	400
	100	500 (лазер)		500/500 (лазер)	600
	н/д	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	н/д
	н/д				н/д
		750	300/500		
		600	550/1000		
		150	н/д		
	н/д	-60...+85	-60...+85	-60...+85	-60...+85
					н/д
	1,497	1,483	1,496	1,483	
	1,492	1,479	1,491	1,479	
	н/д				н/д
		≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	
		≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,2	
		-10...+90°C, 85%	-10...+90°C, 85%		
		н/д	н/д	н/д	
	н/д	н/д	н/д		
Механические характеристики					
	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
	н/д	3,0	3,0	3,0	н/д

1. ПАРАМЕТРЫ ИНЖЕКЦИОННЫХ

Тип	Длина волны, мкм	Мощность излучения, мВт	Рабочий ток, мА	
ИЛПН-235	0,650...0,670	3	100	
ИДЛ-650А	0,650...0,670	10	140	
ИДЛ-650Е	0,650...0,670	20	200	
ИДЛ-650В	0,650...0,670	30	250	
ЛД-670	0,650...0,680	3...5	80...120	
ЛДН-21	0,660...0,680	5	90	
ИЛПН-670	0,660...0,680	5	120	
ЛДН-22	0,660...0,680	10	150	
ИЛПН-237	0,670...0,690	5	70...90	
ИДЛ-670А	0,670...0,690	5	90	
ИДЛ-670Б	0,670...0,690	10	120	
ИДЛ-670В	0,670...0,690	20	190	
ИЛПН-670	0,670...0,690	30	90...150	
ЛДН-7	0,760...0,800	3	90	
ЛДН-12	0,760...0,800	4	80	
ИЛПН-212А	0,760...0,800	3...5	20...70	
ИЛПН-0354-1А	0,760...0,800	5	80	
ИЛПН-230В	0,760...0,800	5	100	
ЛФО-201	0,760...0,860	10	50	
ЛФО-202	0,760...0,860	20	70	
ЛФО-203	0,760...0,860	30	90	
ЛФО-204	0,760...0,860	50	110	
ЛФО-205	0,760...0,860	100	230	
ЛФО-209	0,760...0,860	500	900	
ЛФО-210	0,760...0,860	1000	1700	
ИЛПН-780Б	0,770...0,790	40	100	
ИЛПН-780С	0,770...0,790	50	120	
ИЛПН-780А	0,770...0,800	30	80	
ИДЛ-780А	0,775...0,795	30	90	
ИДЛ-780Д	0,775...0,795	30	90	
ИДЛ-780Б	0,775...0,795	40	130	
ИДЛ-780В	0,775...0,795	50	170	
ИЛПН-0354-1Б	0,777...0,7830	5	80	
ИЛК-1	0,780	1,5	90	

ПРИЛОЖЕНИЕ III

ЛАЗЕРОВ И РЕШЕТОК ЛАЗЕРОВ

Расходимость, град	Спектральная ширина, нм (МГц)	Отличительные особенности
33×10	25	
30×7	н/д	ФД
30×7	н/д	ФД
30×7	н/д	ФД
45×15	н/д	Одномодовый, ФД
8×33	4	Одномодовый
15×45	8	ФД, термоконтроль
8×33	4	Многомодовый
30×12	н/д	ФД
30×7	н/д	ФД
30×7	н/д	ФД
30×7	н/д	ФД
30×15	н/д	ФД
10×40	4	Одномодовый
10×30	4	Одномодовый
10×30	0,1...3	ФД, одномодовый
н/д	(90)	Термоконтроль, одночастотный, ФД
15×35	2	ФД, термоконтроль
15×40	1...3	Одномодовый
15×40	1...3	Одномодовый
10×40	3	Одномодовый
10×40	3	Одномодовый
10×40	3...5	Одномодовый
10×40	3...5	ФД, многомодовый
15×40	3...5	ФД, многомодовый
12×27	н/д	ФД, термоконтроль
12×27	н/д	ФД, термоконтроль
12×37	н/д	ФД, термоконтроль
30×12	н/д	ФД, термоконтроль
30×12	н/д	ФД, термоконтроль
30×12	н/д	ФД, термоконтроль
30×12	н/д	ФД, термоконтроль
	(90)	ФД, одночастотный, термоконтроль
0,30	4	ФД, коллиматор

Тип	Длина волны, мкм	Мощность излучения, мВт	Рабочий ток, мА
ИЛПН-236	0,780	7	50
АТС-2210	0,780...0,820	50 (макс. 100)	190
АТС-2220	0,780...0,820	100 (макс. 125)	280
АТС-2220А	0,780...0,820	200 (макс. 220)	440
АТС-2320	0,780...0,820	100 (макс. 200)	380
АТС-2320А	0,780...0,820	200 (макс. 300)	560
АТС-2420	0,780...0,820	300 (макс. 500)	890
АТС-2430	0,780...0,820	500 (макс. 600)	1100
АТС-2430А	0,780...0,820	600 (макс. 700)	1290
АТС-2440	0,780...0,820	1000 (макс. 1200)	1890
АТС-2440А	0,780...0,820	120 (макс. 1500)	2190
АТС-2550	0,780...0,320	3000 (макс. 3500)	4500
АТС-3690	0,780...0,820	25 000 (макс. 30 Вт)	3900
ПТЛ-3011-Н1	0,780...0,860	500	1200
ПТЛ-3011-Т1	0,780...0,860	500	1200
ПТЛ-3011-Т2	0,780...0,860	500	1200
ПТЛ-3011-Т3	0,780...0,860	500	1200
ПТЛ-3011-Т4	0,780...0,860	500	1200
МТ-1	0,780...0,880		0,1
МПР-1-АМ	0,780...0,880	0,003	н/д
МПР-1-БМ	0,780...0,880	0,006	н/д
МПД-4	0,780...0,880	0,5	50
МПД-1-1А	0,780...0,880	1,0	н/д
МПД-3-АМ	0,780...0,880	1,0	н/д
МПД-3-БМ	0,780...0,880	1,0	н/д
МПД-1-1Б	0,780...0,880	2,0	н/д
ЛД-11	0,780...0,880	250	1500
ИЛПН-112Б	0,780...0,880	280	900
ИЛПН-850А	0,780...0,880	500	1500
ИЛПН-850Б	0,780...0,880	1000	2000
ИДЛ-1000	0,780...0,980	1000	1600
FLD250-А/В1-30	0,790...0,803	250	700
FLD250-А/В1-50	0,790...0,803	250	700

Продолжение табл.

	Расходимость, град	Спектральная ширина, нм (МГц)	Отличительные особенности
	10×0	4	Термоконтроль
	10×40	2	Излучающая поверхность 35×1 мкм
	10×40	2	Излучающая поверхность 35×1 мкм
	10×40	2	Излучающая поверхность 35×1 мкм
	10×40	2	Излучающая поверхность 100×1 мкм
	10×40	2	Излучающая поверхность 100×1 мкм
	10×40	2	Излучающая поверхность 100×1 мкм
	10×40	2	Излучающая поверхность 100×1 мкм
	10×40	2	Излучающая поверхность 100×1 мкм
	10×40	2...4	Излучающая поверхность 200×1 мкм
	10×40	2	Излучающая поверхность 150×1 мкм
	10×40	2	Излучающая поверхность 150×1 мкм
	10×40	2	Излучающая поверхность 500×1 мкм
	10×40	2	Квазинепрерывный, излучающая поверхность 5000×1 мкм
	10	5	н/д
	40	5	н/д
	26	5	н/д
	40	5	н/д
	26	5	ФД
	н/д	н/д	0,01...17 Мбит/с
	н/д	н/д	34 МГц, ресурс 15 000 ч
	н/д	н/д	34 МГц, ресурс 15 000 ч
	н/д	н/д	Частота модуляции 1 кГц...200 МГц, ресурс 1000 ч
	н/д	н/д	0,01...17 МГц, ресурс 2000 ч
	н/д	н/д	6,5 Мбит/с, ресурс 15 000 ч
	н/д	н/д	8,5 Мбит/с, ресурс 15 000 ч
	н/д	н/д	0,01...17 МГц, ресурс 2000 ч
	н/д	8	
	15×45	7	ФД
	15×40	4	ФД
	15×40	4	ФД
	10×30	3,0	Излучающая поверхность 120×1,5 мкм
	14	н/д	ФД, оптоволоконный вывод излучения
	8	н/д	ФД, оптоволоконный вывод излучения

Тип	Длина волны, мкм	Мощность излучения, мВт	Рабочий ток, мА
FLD500-A/B1-50	0,790...0,803	500	1100
FLD500-A/B1-100	0,790...0,803	500	1100
ТХ-ТЛ-380	0,790...0,820	300	1500
ИЛПН-212Г	0,800...0,820	10	20...70
ИЛПН-212	0,800...0,820	100...150	н/д
АТС-4015	0,800...0,820; 0,960...0,980	100...150	н/д
ЛДН-16	0,800...0,840	3	200
ИП-1-31	0,800...0,840	5	70
ЛДН-11	0,800...0,840	5	90
ИЛПН-230А	0,800...0,840	5	100
ЛДН-14	0,800...0,840	20	140
ИЛПН-232Д	0,800...0,840	25	170
ЛДН-8	0,800...0,840	30	150
ЛДН-10	0,800...0,840	30	150
ИЛПН-820А	0,800...0,840	30	80
ИЛПН-232Г	0,800...0,840	35	190
ИЛПН-820С	0,800...0,840	50	120
ИЛПН-820Б	0,800...0,840	40	100
ОА-850	0,800...0,860	1	120
ИЛПН-361	0,800...0,860	2	140
ЛДН-19	0,800...0,860	500	1600
ИЛПН-131	0,800...0,860	500	800...1000
ИЛПН-232В	0,800...0,870	10	150
ИЛПН-232Б	0,800...0,870	20	160
ИЛПН-2156	0,800...0,870	30	180
ИЛПН-232А	0,800...0,870	30	180
ИЛПН-215А	0,800...0,870	40	200
ИП-Г-50	0,800...0,870	50	300
FLD250-A/B2-30	0,804...0,815	250	700
FLD250-A/B2-50	0,804...0,815	250	700
FLD500-A/B2-50	0,804...0,815	500	1100
FLD500-A/B2-100	0,804...0,815	500	1100

Продолжение табл.

Расходимость, град	Спектральная ширина, нм (МГц)	Отличительные особенности
14	н/д	ФД, оптоволоконный вывод излучения
8	н/д	ФД, оптоволоконный вывод излучения
8×1	0,2	ФД, термоконтроль
н/д	н/д	ФД
н/д	н/д	Непрерывный и импульсный режимы (0...50 Гц, 30 мс...104 с), термоэлектр. охлаждение, оптоволоконный вывод излучения
н/д	н/д	Непрерывный и импульсный режимы (частота до 50 Гц, длительность импульсов > 30 мс)
10×40	15	Одномодовый
33×10	н/д	
10×40	4	Одномодовый
33×15	2	ФД, термоконтроль
10×40	4	Одномодовый
25×8	н/д	ФД, термоконтроль
10×40	4	Одномодовый
10×40	4	Одномодовый
27×12	н/д	ФД, термоконтроль
27×10	н/д	ФД, термоконтроль
27×12	н/д	ФД, термоконтроль
27×12	н/д	ФД, термоконтроль
н/д	10	Усилитель 6 дБ, полоса 250 МГц
н/д	18	Перестраиваемый, одночастотный, термоконтроль
8×35	4	Многомодовый
35×15	н/д	
32×10	н/д	ФД, термоконтроль
30×10	н/д	ФД, термоконтроль
27×10	н/д	ФД, термоконтроль
27×10	н/д	ФД, термоконтроль
27×10	н/д	ФД, термоконтроль
27×10	н/д	
14	н/д	ФД, оптоволоконный вывод излучения
8	н/д	ФД, оптоволоконный вывод излучения
14	н/д	ФД, оптоволоконный вывод излучения
8	н/д	ФД, оптоволоконный вывод излучения

Тип	Длина волны, мкм	Мощность излучения, мВт	Рабочий ток, мА
ИДЛ-810А	0,805...0,815	250	700
ИЛПН-112А	0,805...0,815	280	900
ИЛПН-810А	0,805...0,815	500	1500
ИДЛ-810Б	0,805...0,815	500	850
ИЛПН-810Б	0,805...0,815	1000	2000
ИДЛ-810В	0,805...0,815	1000	1600
ИДЛ-810Д	0,805...0,815	2000	3500
НЛП	0,810	500	1500
ИДЛ-810Е	0,805...0,815	3000	5000
ИЛПН-112А	0,807...0,812	250	600...800
ЛДН	0,810	40	350
ИДЛ-820А	0,810...0,840	30	70
ИДЛ-820Д	0,810...0,840	30	70
ИДЛ-820Е	0,810...0,840	40	90
ИДЛ-820В	0,810...0,840	50	110
ИЛПН-301	0,810...0,860	0,1	120...200
ИЛПН-304-1	0,810...0,880	0,1	100...150
ИЛПН-304	0,810...0,880	0,1	80...100
ИЛПН-203А	0,810...0,880	3,5	100
ИЛПН-203Б	0,810...0,880	3,5	100
ИЛПН-203В	0,810...0,880	3,5	100
ЛД10	0,810...0,880	30	300
П-01-1	0,810...0,890	1,2	120
МП01	0,810...0,890	5,0	
ИЛПН-115	0,810...0,890	30	350
ИЛПН-108	0,810...0,890	40	300
ИЛПН-114	0,810...0,890	2С0	600
FLD250-А/В3-30	0,816...0,830	250	700
FLD250-А/В3-50	0,816...0,830	250	700
FLD500-А/В3-50	0,816...0,830	500	1100
FLD500-А/В3-10G	0,816...0,830	500	1100
ИЛПН-233Б	0,820	5 + 10 + 5	47 + 70 + 47
ИЛПН-233М3	0,820	15 + 15	75 + 75
ИЛПН-233А	0,820	5 + 20 + 5	47 + 70 + 47
ИЛПН-233М2	0,820	25 + 25	95 + 95

Продолжение табл.

	Расходимость, град	Спектральная ширина, нм (МГц)	Отличительные особенности
	30×15	н/д	ФД
	50×20	7	ФД
	40×20	4	ФД
	30×15	н/д	н/д
	40×20	4	ФД
	30×12	н/д	н/д
	30×12	н/д	н/д
		0,1	Подстраиваемая длина волны
	30×12	н/д	н/д
	35×12	н/д	ФД
	н/д	н/д	Квазинепрерывная работа от 0,25 до 10 с
	27×12	н/д	ФД, термоконтроль
	27×12	н/д	ФД
	27×12	н/д	ФД, термоконтроль
	27×12	н/д	ФД, термоконтроль
	н/д	н/д	
	н/д	н/д	$F = 18$ МГц, крутизна фронта 9 нс
	н/д	н/д	
	н/д	3	ФД, ресурс 50 000 ч
	н/д	3	ФД, ресурс 10 000 ч
	н/д	3	ФД, ресурс 2000 ч
	2	≤ 5	Термоконтроль, микрообъектив, одномодовый
	н/д	н/д	Модуль, передача данных 500 Мбит/с
	н/д	н/д	Модуль
	н/д	10	ФД
	35×8	н/д	ФД
	30×8	10	ФД
	14	н/д	ФД, оптоволоконный вывод излучения
	8	н/д	ФД, оптоволоконный вывод излучения
	14	н/д	ФД, оптоволоконный вывод излучения
	8	н/д	ФД, оптоволоконный вывод излучения
	27×9	н/д	3 лазерных луча
	27×9	н/д	2 лазерных луча
	27×9	н/д	3 лазерных луча
	27×9	н/д	2 лазерных луча

Тип	Длина волны, мкм	Мощность излучения, мВт	Рабочий ток, мА	
ИЛПН-233М1	0,820	70	120 + 120	
ИЛПН-2123	0,820...0,840	10	20...70	
ЛДН-32	0,820...0,870	50	100	
ЛДН-31	0,820...0,870	100	170	
ИЛПН-110М	0,830	0,1	80	
ЛМ1-850	0,830	1,0	120	
ЛМ2-850	0,830	1,0	200	
ИЛПН-109М	0,830	3	120	
32ДЛ106	0,830	5	100	
ИЛПН-109М1	0,830	5	120	
ИЛПН-109М2	0,830	10	н/д	
ИЛПН-109М3	0,830	30	н/д	
ЛЛД-16(32)	0,830	3 (16...32)	130 (16...32)	
ИЛПН-109М4	0,830	50	н/д	
SFL-1	0,830	500	н/д	
SFL-2	0,830...0,850	5000	н/д	
ИЛПН-0354-2А	0,830...0,870	5	65	
ИДЛ-850А	0,830...0,870	50	160	
FLD250-А/В4-30	0,830...0,870	250	700	
FLD250-А/В4-50	0,830...0,870	250	700	
ИДЛ-8506	0,830...0,870	250	700	
FLD500-А/В4-50	0,830...0,870	500	1100	
FLD500-А/В4-100	0,830...0,870	500	1100	
ИЛПН-230Б	0,840...0,880	5	100	
ИЛПН-0354-2Б	0,847...0,853	5	65	
ПД1	0,850		н/д	
ПД2	0,850	0,1	н/д	
МПД-3-1	0,850	1	н/д	
МПД-1-1	0,850	2	н/д	
ПОМ-14М	0,850	3,0	30	

Продолжение табл.

Расходимость, град	Спектральная ширина, нм (МГц)	Отличительные особенности
27×9	н/д	2 лазерных луча
н/д	н/д	ФД
7×33	3	Одномодовый
7×33	3	Одномодовый
н/д	40	Частота модуляции 50 МГц, оптоволоконный вывод излучения
н/д	4	Частота модуляции 250 МГц, ФД, оптоволоконный вывод излучения
н/д	> 15	Частота модуляции 250 МГц, оптоволоконный вывод излучения
н/д	4	Частота модуляции 250 МГц, ФД, оптоволоконный вывод излучения
н/д	4	Бескорпусное исполнение
н/д	4	Частота модуляции до 250 МГц, ФД, оптоволоконный вывод излучения
н/д	4	Частота модуляции до 250 МГц, ФД, оптоволоконный вывод излучения
н/д	4	Частота модуляции до 250 МГц, ФД, оптоволоконный вывод излучения
н/д		16 или 32 элемента с независимой адресацией
н/д	4	Частота модуляции до 250 МГц, ФД, оптоволоконный вывод излучения
н/д	н/д	Оптоволоконный вывод излучения
н/д	н/д	Оптоволоконный вывод излучения
н/д	(90)	Одночастотный, ФД
27×12	н/д	ФД, термоконтроль
14	н/д	ФД, оптоволоконный вывод излучения
8	н/д	ФД, оптоволоконный вывод излучения
35×15	н/д	ФД, термоконтроль
14	н/д	ФД, оптоволоконный вывод излучения
8	н/д	ФД, оптоволоконный вывод излучения
35×15	2	ФД, термоконтроль
н/д	90	Одночастотный, ФД, термоконтроль
н/д	н/д	Модуль, крутизна фронта 7 нс
н/д	н/д	Модуль, крутизна фронта 5 нс
н/д	н/д	Модуль, частота модуляции до 17 МГц
н/д	н/д	Модуль, частота модуляции до 17 МГц
н/д	3	560 Мбит/с, ФД, термоконтроль, термоохладитель, многомодовое волокно

Тип	Длина волны, мкм	Мощность излучения, мВт	Рабочий ток, мА
ИДЛ-850В	0,830...0,870	500	1200
	0,850	500	н/д
БА162Б	0,850...0,890	н/д	70
БА162А	0,850...0,890	н/д	70
ЗДЛ-105	0,880	н/д	н/д
ЗДЛ-106	0,880	н/д	н/д
ИЛПН-110	0,880	5	н/д
ИДЛ-900Д	0,880...0,920	40	120
ИДЛ-900А	0,880...0,920	50	150
ИДЛ-900Б	0,880...0,920	80	250
ИДЛ-900В	0,880...0,920	500	1000
ЛФО-301	0,910...1,020	10	55
ЛФО-302	0,910...1,020	20	75
ЛФО-303	0,910...1,020	30	100
ЛФО-304	0,910...1,020	10	130
ЛФО-305	0,910...1,020	100	200
ЛФО-306	0,910...1,020	150	270
ЛФО-307	0,910...1,020	200	380
ЛФО-309	0,910...1,020	500	900
ЛФО-310	0,910...1,020	1000	1700
ЛФО-311	0,910...1,020	1500	2600
ИЛПН-960	0,940...0,980	60	300
ИДЛ-960А	0,950...0,970	50	150
ИДЛ-960Б	0,950...0,970	80	250
ИДЛ-960В	0,950...0,970	500	1100
ЛДН-33	0,950...1,000	50	100
АТС-2210	0,960...0,980	50 (макс. 100)	190
АТС-2220	0,960...0,980	100 (макс. 125)	280
АТС-2320	0,960...0,980	100 (макс. 200)	380
АТС-2220А	0,960...0,980	200 (макс. 220)	440
АТС-2320А	0,960...0,980	200 (макс. 300)	560
АТС-2420	0,960...0,980	300 (макс. 500)	890
АТС-2430	0,960...0,980	500 (макс. 600)	1100
АТС-2430А	0,960...0,980	600 (макс. 700)	1290

Продолжение табл.

	Расходимость, град	Спектральная ширина, нм (МГц)	Отличительные особенности
	35×15	н/д	ФД, термоконтроль
	н/д	н/д	Нестабильность мощности ±5%, многомодовый
	н/д	н/д	Модуль
	н/д	н/д	Модуль
	н/д	н/д	Ресурс 10 000 ч
	н/д	н/д	Ресурс 100 000 ч
	н/д	н/д	Ресурс 5000 ч
	30×12	н/д	ФД, термоконтроль
	30×12	н/д	ФД, термоконтроль
	30×12	н/д	ФД, термоконтроль
	30×12	н/д	ФД, термоконтроль
	20×35	1...3	Одномодовый
	20×35	1...3	Одномодовый
	20×35	1...3	Одномодовый
	20×35	3	Одномодовый
	15×35	3	Одномодовый
	15×35	3	Одномодовый
	15×35	3...5	Одномодовый
	10×40	3...5	ФД, многомодовый
	10×40	3...5	ФД, многомодовый
	10×40	3...5	Многомодовый
	35×15	8	ФД, термоконтроль
	30×12	н/д	ФД, термоконтроль
	30×12	н/д	ФД, термоконтроль
	30×12	н/д	ФД
	8×33	3	н/д
	10×40	2	Излучающая поверхность 35×1 мкм
	10×40	2	Излучающая поверхность 35×1 мкм
	10×40	2	Излучающая поверхность 100×1 мкм
	10×40	2	Излучающая поверхность 35×1 мкм
	10×40	2	Излучающая поверхность 100×1 мкм
	10×40	2	Излучающая поверхность 100×1 мкм
	10×40	2	Излучающая поверхность 100×1 мкм
	10×40	2...4	Излучающая поверхность 200×1 мкм

Тип	Длина волны, мкм	Мощность излучения, мВт	Рабочий ток, мА	
АТС-2440	0,960...0,980	1000 (макс. 1200)	1890	
АТС-2440А	0,960...0,980	1200 (макс. 1500)	2190	
ИДЛ-960-1	0,960...1,000	500	700...900	
ЛД-960-1	0,960...1,000	500	700...900	
ЛДН-19	0,960...1,000	1000	1600	
ИДЛ-960-2	0,960...1,000	1000	1300...1600	
ЛД-960-2	0,960...1,000	1000	80...120	
ИЛПН-980	0,975...0,985	30	300	
ПОМ-20	1,000	1,5	15	
МТ-4	1,200...1,350	н/д	н/д	
ИЛПН-206-1	1,220...1,330	1	120	
ISF-1ЕТ	1,220...1,330	1	150	
ПОМ-0354-1	1,240...1,350	1	85	
ПОМ-0354-2	1,240...1,350	2	85	
ИЛПН-216А	1,240...1,350	3	85	
ИЛПН-216Б	1,240...1,350	4	100	
ЛФО-400	1,260...1,370	5,0	45	
ЛФО-401	1,260...1,370	10	70	
ЛФО-402	1,260...1,370	20	110	
ЛФО-403	1,260...1,370	30	160	
ЛФО-404	1,260...1,370	50	230	
ЛФО-405	1,260...1,370	100	500	
ЛФО-407	1,260...1,370	200	1000	
ЛФО-408	1,260...1,370	300	1500	
ЛД-(1,26...1,69)	1,260...1,690	5,0	30...80	
ОА-1300	1,270...1,330	1,0	150	
ПОМ-15А	1,270...1,330	1,0	80	
ИЛПН-206М	1,270...1,330	2,0	80	
ИЛПН-206-2М	1,270...1,330	2,5	80	
ПОМ-14А	1,270...1,330	2,5	80	
ПОМ-14М	1,270...1,330	3,0	80	
ЛМ2-1300	1,300	0,2	150	
ЛМ4-1300	1,300	0,3	100	

Продолжение табл.

Расходимость, град	Спектральная ширина, нм (МГц)	Отличительные особенности
10×40	2	Излучающая поверхность 150×1 мкм
10×40	2	Излучающая поверхность 150×1 мкм
32×12	н/д	н/д
32×12	н/д	н/д
8×35	4	Многомодовый
32×15	н/д	н/д
32×12	н/д	н/д
н/д	3	ФД, термоконтроль
н/д	3	5...60 Мбит/с, одномодовое/многомодовое волокно
н/д	н/д	1...140 Мбит/с
н/д	10	ФД
35×15	н/д	н/д
	н/д	Модуль, ФД, передача данных до 2 Гбит/с
	н/д	Модуль, ФД, передача данных до 2 Гбит/с
1,30	н/д	ФД, термоконтроль, крутизна фронта 0,25 нс
1,30	н/д	ФД, термоконтроль, крутизна фронта 0,25 нс
25×40	3...5	Одномодовый
25×40	5...8	Одномодовый
25×40	8...10	Одномодовый
25×40	10...15	Одномодовый
25×40	10...15	Одномодовый
20×40	15...20	ФД, многомодовый
15×40	15...20	ФД, многомодовый
25×40	15...20	ФД, многомодовый
н/д	1	Для спектроскопии
н/д	10	Усилитель 10 дБ, частота модуляции до 250 МГц
н/д	5	Модуль, ФД, термоконтроль, передача данных до 5 Гбит/с
н/д	10	Модуль, ФД, передача данных до 144 Мбит/с
н/д	10	Модуль, ФД, передача данных до 144 Мбит/с
н/д	8	Модуль, ФД, термоконтроль, частота до 560 Мбит/с
н/д	8	Модуль, ФД, термоконтроль, передача данных до 560 Мбит/с
н/д	> 15	Частота модуляции 100 МГц
н/д	40	Частота модуляции 100 МГц

Тип	Длина волны, мкм	Мощность излучения, мВт	Рабочий ток, мА	
МПД-4-1	1,300	0,5	н/д	
РС-3002-С4	1,300	0,5	н/д	
ИЛПН-303	1,300	0,6	120	
ЛМ1-1300	1,300	1,0	100	
ЛМ1-1300-01	1,300	1,0	100	
ЛМЗ-1300	1,300	1,0	100	
ПОМ-15 DFB	1,300	1,0	80	
ИЛПН-206-1	1,300	1,0	н/д	
ПОМ-14	1,300	1,5	60	
ИЛПН-202	1,300	1,5	60	
ИЛПН-206	1,300	1,5	60	
ПОМ-17	1,300	1,5	50	
ИЛПН-206-2	1,300	2,0	н/д	
ПОМ-6	1,300	2,0	н/д	
RM-3022-B5	1,300	2,0	н/д	
РС-3002-Б5	1,300	2,0	н/д	
РС-3022-В4	1,300	2,0		
РС-3022-В5	1,300	2,0	н/д	
ЛД-1,3	1,300	5,0	50	
РС-3052-В5	1,300	5,0		
ТС-3100-Б2	1,300	10	250	
ЛС-3102-В4	1,300	10	н/д	
ТМ-3400-БЗ	1,300	40	300	
ТС-3500-А	1,300	50	250	
ТМ-3510-БЗ	1,300	60	500	
ТМ-3530-А	1,300	80	300	
ЛМ-3802-В5	1,300	80	н/д	
ТМ-3550-БЗ	1,300	100	600	
ТМ-3600-А	1,300	150	600	
ТМ-3711-ДЗ	1,300	300	1500	
ТМ-3770-А	1,300	600	1500	

Продолжение табл.

Расходимость, град	Спектральная ширина, нм (МГц)	Отличительные особенности
н/д	н/д	Модуль, 200 МГц
н/д	н/д	DIL — 14 pin, одномодовое волокно
н/д	60	Модуль
н/д	4	Частота модуляции 250 МГц
н/д	0,1	Частота модуляции 250 МГц
н/д	4	Частота модуляции 250 МГц, ФД, оптоволоконный вывод излучения
н/д	0,01	3 Гбит/с, ФД, термоконтроль, термоохладитель, одномодовое волокно
н/д	н/д	144 Мбит/с
н/д	3	560 Мбит/с, ФД, термоконтроль, термоохладитель, одномодовое волокно
н/д	6	Термоконтроль
н/д	6	Термоконтроль, ФД
н/д	3	Передача данных до 560 Мбит/с, ФД, одномодовое/многомодовое волокно
н/д	н/д	144 Мбит/с
н/д	3	Модуль, 560 Мбит/с
н/д	н/д	DIL — 14 pin, многомодовый, оптоволоконный вывод излучения
н/д	н/д	DIL — 14 pin, одномодовое волокно
н/д	н/д	DIL — 14 pin, одномодовое волокно
н/д	н/д	DIL — 14 pin, многомодовый оптоволоконный вывод излучения
н/д	н/д	Крутизна фронта 0,5 нс
н/д	н/д	DIL — 14 pin, одномодовое волокно
н/д	15	
н/д	н/д	DIL — 14 pin, одномодовое волокно, импульсный
н/д	15	н/д
30×35	15	н/д
	15	н/д
30×25	15	н/д
н/д	н/д	DIL — 14 pin, многомодовое волокно
	15	н/д
35×20	15	н/д
	15	Термоконтроль
35×12	15	н/д

Тип	Длина волны, мкм	Мощность излучения, мВт	Рабочий ток, мА
ЛФО-500	1,480...1,580	5,0	70
ЛФО-50Ю	1,480...1,580	10	100
ЛФО-5020	1,480...1,580	20	160
ПОМ-13А	1,500...1,580	1,0	120
ПОМ-13Б	1,500...1,580	1,0	120
ПОМ-15Б	1,500...1,580	1,0	120
ИЛПН-234-А	1,500...1,600	3	85
ИЛПН-234-Б	1,500...1,600	4	100
ПОМ-14Б	1,520...1,580	2,0	80
РС-5002-В4	1,550	0,5	
Р10М-16 DFB	1,550	1,0	50
ПОМ-13 DFB	1,550	1,5	80
ПОМ-18	1,550	1,5	60
РС-5022-В4	1,550	2	н/д
ЛД-1.55	1,550	5,0	50
ЛС-5052-В4	1,550	5,0	н/д
ЛД17	1,70...1,77	1...10	300...1200
ЛД19	1,80...1,87	1...10	300...1200
ЛД20	2,000	100	
ЛД20	2,00...2,06	1...10	0,300...1200
ЛД22	2,18...2,22	1...10	300...1200
ЛД2.2	2,200	100	н/д
ЛД2.4	2,400	50	н/д
ЛД28	2,74...2,77	2	80...200
ЛДЗ.0-3	3,000	0,8	200
ЛД31	3,14...3,19	4	120...240
ЛДЗ.2-2	3,200	1	160
ЛД32	3,21...3,26	1...10	80...320
ЛД33	3,26...3,33	1...10	80...320
ЛД34	3,40...3,45	1...10	140...240
ЛД35	3,52...3,59	1...10	160...320
ЛДЗ.6-2.5	3,600	0,8	н/д
ЛД38	3,75...3,79	1...6	200...480
ЛДЗ.9-3	3,900	н/д	800

Продолжение табл.

Расходимость, град	Спектральная ширина, нм (МГц)	Отличительные особенности
25×40	3...5	Одномодовый
25×40	5...7	Одномодовый
25×40	7...10	Одномодовый
н/д	0,1	Модуль, 560 Мбит/с, ФД, термоконтроль
н/д	0,1	Модуль, 3 Гбит/с, ФД, термоконтроль
н/д	0,01	Модуль, 2,4 Гбит/с, ФД, термоконтроль
н/д	1,30	ФД, термоконтроль
н/д	1,30	ФД, термоконтроль, крутизна фронта 0,25 нс
н/д	8	Модуль, 560 Мбит/с, ФД, термоконтроль
н/д	н/д	DIL — 14 pin, одномодовое волокно
н/д	0,01	3 Гбит/с, ФД, термоконтроль, термоохладительник, одномодовое волокно
н/д	0,1	560 Мбит/с, ФД, термоконтроль, термоохладительник, одномодовое волокно
н/д	3	560 Мбит/с, ФД, термоконтроль, термоохладительник, одномодовое волокно
н/д	н/д	DIL — 14 pin, одномодовое волокно
н/д	н/д	Крутизна фронта 0,5 нс
н/д	н/д	DIL — 14 pin, одномодовое волокно
10×45	< 70	Одномодовый, крутизна фронта < 20 нс
10×45	< 70	Одномодовый, крутизна фронта < 20 нс
	2	
20×45	< 70	Одномодовый, крутизна фронта < 20 нс
20×45	< 70	Одномодовый, крутизна фронта < 20 нс
н/д	15	н/д
н/д	2	н/д
30×50	< 90	Одномодовый, крутизна фронта < 10 нс
		н/д
30×50	< 90	Одномодовый, крутизна фронта < 10 нс
н/д	н/д	н/д
30×50	< 90	Одномодовый, крутизна фронта < 10 нс
30×50	< 90	Одномодовый, крутизна фронта < 10 нс
30×50	< 90	Одномодовый, крутизна фронта < 10 нс
30×50	< 90	Одномодовый, крутизна фронта < 10 нс
н/д	н/д	н/д
30×50	< 90	Одномодовый, крутизна фронта < 10 нс
н/д	н/д	н/д

2. ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЕ

Тип	Длина волны, мкм	Пиковая мощность, Вт	Длитель- ность им- пульса, нс	Расходи- мость, град	
ИДЛИ-670А	0,670...0,690	1	100	н/д	
ИДЛИ-670Б	0,670...0,690	3	100	н/д	
ИДЛИ-670В	0,670...0,690	5	100	н/д	
ИДЛИ-780А	0,770...0,795	1	100	н/д	
ИДЛИ-780Б	0,770...0,795	3	100	н/д	
ИДЛИ-780В	0,770...0,795	5	100	н/д	
АТС-2300	0,780...0,820	1,5	200	10×40	
АТС-2400	0,780...0,820	н/д	200	10×40	
ПИЛ-01-2А	0,800...0,860	н/д	30	н/д	
ИЛПИ-110	0,800...0,860	110	120	н/д	
ИЛПИ-114	0,800...0,860	320	120	н/д	
ПИЛ-01-1А	0,800...0,870	н/д	15	н/д	
ЛПИ-101	0,800...0,950	4	70...150	н/д	
ЛПИ-102	0,800...0,950	2,7...6,5	70...150	н/д	
СЛМ-1	0,802...0,815	100 Вт с линейки	0,5 мс	15×40	
ИЛДИ-810А	0,805...0,815	1	100	н/д	
ИЛДИ-810Б	0,805...0,815	3	100	н/д	
ИЛДИ-810В	0,805...0,815	5	100	н/д	
ИЛДИ-800А	0,805...0,815	40	200 000	н/д	
ИЛДИ-800Б	0,805...0,815	60	200 000	н/д	
ИЛДИ-850А	0,820...0,870	1	100	н/д	
ИЛДИ-850Б	0,820...0,870	3	100	н/д	
ИЛДИ-850В	0,820...0,870	5	100	н/д	
ЛПИ-121	0,850...0,900	6	60	н/д	
ЛПИ-120	0,850...0,900	15	70	н/д	
ИЛПИ-Ю8	0,850...0,910	8	60	н/д	
ИЛД-14	0,850...0,930	1	300	н/д	
ИЛД-1	0,850...0,330	1	100...300	н/д	
ЛПИ-15М	0,850...0,930	3	100	н/д	

ИНЖЕКЦИОННЫЕ ЛАЗЕРЫ

	Частота повторения импульсов, кГц	Спектральная ширина, нм (МГц)	Отличительные особенности
	3	н/д	Излучающая поверхность 100×1 мкм
	3	н/д	Излучающая поверхность 200×1 мкм
	3	н/д	Излучающая поверхность 300×1 мкм
	3	н/д	Излучающая поверхность 100×1 мкм
	3	н/д	Излучающая поверхность 200×1 мкм
	3	н/д	Излучающая поверхность 300×1 мкм
	50	2	Излучающая поверхность 100×1 мкм
	50	2	Излучающая поверхность 150×1 мкм
	100	н/д	н/д
	1,6	10	$P_{cp} = 40$ мВт, с оптическим интегратором
	5,2	10	$P_{cp} = 200$ мВт, с оптическим интегратором
	100	н/д	н/д
	6	10	Длительность фронта 1,5 мкс
	6	10	Длительность фронта 1,5 мкс
	0,025	1	Решетка импульсно-периодических лазеров с непрерывной накачкой, пиковая интенсивность 1 кВт/см ² , плотность энергии в импульсе до 0,8 Дж/см ²
	3	н/д	Излучающая поверхность 100×1 мкм
	3	н/д	Излучающая поверхность 200×1 мкм
	3	н/д	Излучающая поверхность 300×1 мкм
	0,1	н/д	Излучающая поверхность 10 000×1 мкм
	0,1	н/д	Излучающая поверхность 10 000×1 мкм
	3	н/д	Излучающая поверхность 100×1 мкм
	3	н/д	Излучающая поверхность 200×1 мкм
	3	н/д	Излучающая поверхность 300×1 мкм
	50	10	Встроенный генератор
	15	10	Встроенный генератор
	12	10	
	6	5	
	6	5	Встроенный согласующий трансформатор
	0,25	5	н/д

Тип	Длина волны, мкм	Пиковая мощность, Вт	Длитель- ность им- пульса, нс	Расходи- мость, град	
ПЛИ-4	0,850...0,930	4	150	н/д	
ИЛПИ-108	0,850...0,930	4	100	н/д	
ЛПИ-10	0,850...0,930	5	100	н/д	
ЛПИ-12	0,850...0,930	5	100	н/д	
ИЛПИ-105	0,850...0,930	6	100	н/д	
ЛПИ-105	0,850...0,930	8	50...120	н/д	
ИЛПИ-107	0,850...0,930	10	100	н/д	
ИЛПИ-104	0,850...0,930	16	100	н/д	
ИЛПИ-103	0,850...0,930	18	100	н/д	
ЛПИ-14	0,850...0,930	30	100	н/д	
ИЛПИ-102	0,850...0,930	68	100	н/д	
ИЛПИ-112	0,850...0,930	50	70	н/д	
ЛДИ-107	0,850...0,950	6	50	н/д	
ИЛПИ-109	0,860...0,910	3	400	н/д	
ИЛПИ-110-А	0,860...0,910	200	100...250	н/д	
ЛД-15	0,860...0,920	5	100	н/д	
ИЛПИ-113	0,860...0,920	75	60	н/д	
ИЛПИ-108	0,880	3	н/д	н/д	
ЛПИ-15М	0,880	3	н/д	н/д	
ЛПИ-12	0,880	5	н/д	н/д	
ЛПИ-105	0,880	8	н/д	н/д	
ИЛПИ-ЮЗ	0,880	18	н/д	н/д	
ЛПИ-14	0,880	30	н/д	н/д	
ИЛПИ-113	0,880	75	н/д	н/д	
ИЛД-8	0,880...0,905	6	150	н/д	
ИЛД-10	0,880...0,905	8	150	н/д	
ЛПИ-102М	0,880...0,910	5	70	н/д	
ЛПИ-101М	0,880...0,910	7	70	н/д	
ИЛДИ-900А	0,880...0,920	3	100	н/д	

Продолжение табл.

	Частота повторения импульсов, кГц	Спектральная ширина, нм (МГц)	Отличительные особенности
	15	10	н/д
	6	5	Встроенный согласующий трансформатор
	6	5	Встроенный согласующий трансформатор
	6	5	Встроенный согласующий трансформатор
	12	5	Встроенный согласующий трансформатор
	12	5	Встроенный согласующий трансформатор, $P_{cp} = 1$ мВт
	25	5	Встроенный согласующий трансформатор
	6	10	Встроенный согласующий трансформатор
	6	10	Встроенный согласующий трансформатор
	0,5	10	Встроенный согласующий трансформатор
	1,6	10	Встроенный согласующий трансформатор
	1,6	10	Встроенный согласующий трансформатор, $P_{cp} = 16$ мВт
	16	10	Формирующая оптика, встроенный генератор
	4	10	Встроенный генератор
	3	10	Встроенный генератор
	6	5	Бескорпусный
	1,6	10	Встроенный согласующий трансформатор, $P_{cp} = 14$ мВт
	6	н/д	Срок службы 2000 ч
	0,5	н/д	Срок службы 2000 ч
	6	н/д	Срок службы 5000 ч
	12	н/д	Срок службы 15 ч
	6	н/д	Срок службы 150 ч
	0,5	н/д	Срок службы 600 ч
	1	н/д	Срок службы 2000 ч
	6	5	Корпус ТО-18-02
	6	5	Корпус ТО-18-02
	6	н/д	Излучающая поверхность 500×1 мкм
	6	н/д	Излучающая поверхность 500×1 мкм
	6	н/д	Излучающая поверхность 100×1 мкм

Тип	Длина волны, мкм	Пиковая мощность, Вт	Длитель- ность им- пульса, нс	Расходи- мость, град
ИЛДИ-900Б	0,880...0,920	5	100	н/д
ИЛДИ-900В	0,880...0,920	10	100	н/д
ЛПИ-120М	0,880...0,910	12	70...150	н/д
ПЛИ-6	0,890	6	100	н/д
ПЛИ-6-9	0,900	6	110	н/д
ПЛИ-200	0,900	200	250	н/д
ИЛДИ-904А	0,900...0,910	50	100	н/д
ИЛДИ-904Б	0,900...0,910	100	100	н/д
ИЛДИ-904В	0,900...0,910	150	100	н/д
ИЛПИ-111	0,904	120	100 000	н/д
ИЛПИ-130	0,904	250	150	н/д
ИЛД-9	0,940...0,980	20	10	н/д
ИЛДИ-960А	0,950...0,970	3	100	н/д
ИЛДИ-960Б	0,950...0,970	5	100	н/д
ИЛДИ-960В	0,950...0,970	10	100	н/д
ПИЛ-02	1,300	н/д	50	н/д
ЛД17р	1,74...1,78	0,15	$10^4...10^5$	10×45
ЛД19р	1,83...0,87	0,15	0,1...1 мкс	10×45
ЛД2.0	2,000	н/д	100	н/д
ЛД20р	2,03...2,06	0,15	$10^4...10^5$	20×45
ЛД2.2	2,200	н/д	100	н/д
ЛД20р	2,20...2,24	0,15	$10^4...10^5$	20×45
ЛД2.4	2,400		100	н/д
ЛД20р	2,74...2,77	0,01	$10^4...3\cdot10^5$	30×50
ЛЕД-29	2,900	0,002	100	н/д
ЛЗ.0-3	3,000	н/д	500 000	
ЛД20р	3,14...3,19	0,02	$10^4...3\cdot10^5$	30×50
ЛЗ.2-2	3,200	н/д	500 000	н/д

Продолжение табл.

	Частота повторения импульсов, кГц	Спектральная ширина, нм (МГц)	Отличительные особенности
	6	н/д	Излучающая поверхность 100×1 мкм
	6	н/д	Излучающая поверхность 200×1 мкм
	6	н/д	Излучающая поверхность 900×1 мкм
	16	н/д	н/д
	16	н/д	н/д
	1	н/д	н/д
	1	н/д	Излучающая поверхность 1000×1000 мкм
	1	н/д	Излучающая поверхность 1500×1000 мкм
	1	н/д	Излучающая поверхность 2000×1000 мкм
	0,1	н/д	н/д
	0,1	н/д	н/д
	15	5	н/д
	6	н/д	Излучающая поверхность 100×1 мкм
	6	н/д	Излучающая поверхность 100×1 мкм
	6	н/д	Излучающая поверхность 200×1 мкм
	100	н/д	Двойной импульс
	10	< 70	н/д
	10	< 70	н/д
	10	2	н/д
	10	< 70	н/д
	10	2	$P_{cp} = 100$ мВт
	10	< 70	н/д
	10	2	$P_{cp} = 100$ мВт
	10	< 90	н/д
	10	400	СW/импульсный, квантовая эффективность 0,3%
	1	< 90	н/д
	10	< 90	н/д
	1	н/д	н/д

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- А — номинальная числовая апертура
АВС — активный волоконный световод
АИМ — амплитудно-импульсная модуляция
АПП — абсолютный показатель преломления
АЦП — аналого-цифровой преобразователь
ВАХ — вольт-амперная характеристика
ВКР — вынужденное комбинационное рассеяние
ВОЛС — волоконно-оптическая линия связи
ВОС — волоконно-оптическая система
ВОСП — волоконно-оптическая система передачи
ВОСС — волоконно-оптические системы связи
ВУ — вращательные уровни
ГИП — газоразрядная индикаторная панель
ГИС — гигантская интегральная схема
ГЛИН — генератор линейно изменяющегося напряжения
ДА — диэлектрическая анизотропия
ДГС — двойная гетероструктура
ДКВ — двойная корреляционная выборка
Еф — энергия, соответствующая уровню Ферми
ЖК — жидкий кристалл
ЖКИ — жидкокристаллический индикатор
ЖКЭ — жидкокристаллический экран
ЗУ — запоминающее устройство
ИК — инфракрасный
ИМС — интегральная микросхема
ИС — информационная система
КМОП — комплементарные приборы со структурой «металл–окисел–полупроводник»
КПД — коэффициент полезного действия
КУ — колебательный уровень
ЛВС — локально-вычислительная система
ЛД — лазерный диод
ЛФД — лавинный фотодиод
МКО — Международная комиссия по освещению
МП — мультиплексор
МЭВ — монохроматическая электромагнитная волна
НЖК — нематические жидкие кристаллы

- ОВ — оптическое волокно
- ОЗУ — оперативное запоминающее устройство
- ОИ — окно интерфейса
- ОК — оптический канал
- ОКГ — оптический квантовый генератор
- ООС — отрицательная обратная связь
- ОС — обратная связь
- ОУ — операционный усилитель
- ОЭП — оптоэлектронные приборы
- ПВО — полное внутреннее отражение
- ПОВ — планарный оптический волновод
- ПОС — положительная обратная связь
- ППЛ — полосковый полупроводниковый лазер
- ПФП — пиротехнический фотоприемник
- СБИС — сверхбольшая интегральная схема
- СВ — стекловолокно
- СД — светодиод
- СИД — светоизлучающий диод
- СКР — спонтанное комбинационное рассеяние
- СПФ — спонтанный фотон
- ССИД — суперлюминесцентный светоизлучающий диод
- СТФ — стимулированный фотон
- СЭ — солнечный элемент
- СЭУ — солнечная энергетическая установка
- УБИС — ультрабольшая интегральная схема
- ФАПЧ — фазовая автоподстройка частоты
- ФД — фотодиод
- ФКВ — фотонно-кристаллическое волокно
- ФНЧ — фильтр нижних частот
- ФП — фотоприемник
- ФПЗС — фотоприемные приборы с зарядовой связью
- ФЭС — фотоэлектрические системы
- ЦАП — цифроаналоговый преобразователь
- ЦСК — цилиндрическая система координат
- ЭДС — электродвижущая сила
- ЭКП — экран коллективного пользования
- ЭЛИ — электролюминесцентный индикатор
- ЭР — электронный регулятор
- ЭУ — электронные устройства
- ЭУ — электронный уровень
- DWDM — многоканальная система передачи с плотным мультиплексированием
- EDFA — эрбиевый усилитель
- G-Ethernet — пакетная технология передачи информации компьютерных сетей
- NZDSF — волокно с ненулевой смещенной дисперсией
- ОТН — оптическая транспортная иерархия — стандарт построения гибких мультисервисных оптических сетей
- PON — технология пассивных оптических сетей
- SDH — синхронная цифровая иерархия
- SMF — одномодовое волокно
- WAN — система глобальной связи
- WDW — система со спектральным мультиплексированием
- ZWPE — волокно с нулевым водяным пиком

СПИСОК ПРИНЯТЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- A_0 — механический эквивалент света
 B — синий свет
 c — скорость света в свободном пространстве
 C_d — емкость диода
 D_n — коэффициент диффузии электронов
 \vec{E} — вектор напряженности
 E — энергия, освещенность поверхности
 E_Φ — энергия фотона
 $E_{\text{фон}}$ — энергия фонона
 E_z — энергетическая ширина запрещенной зоны
 $E_{\text{ц}}$ — дно зоны проводимости — минимальное значение энергии свободного электрона
 $E_{\text{в}}$ — потолок валентной зоны — максимальное значение энергии валентного электрона
 $E_{\text{вын}}$ — энергия вынуждающего излучения
 E_e — облученность поверхности
 E_F — энергия Ферми
 $E_{\text{Ю}}$ — модуль Юнга
 e — заряд электрона
 f — частота
 G — зеленый свет
 Φ_e — поток излучения
 h — постоянная Планка
 l_r — длина когерентности
 K — постоянная Больцмана
 K_i — коэффициент передачи по току
 K_V — коэффициент световой эффективности
 $K_{\text{д}}$ — коэффициент усиления лазера
 $K_{\text{п}}$ — коэффициент потерь излучения в резонаторе лазера
 k_1, k_2 — коэффициенты отражения зеркал резонатора
 I — ток
 I_n — электронная составляющая тока
 I_p — дырочная составляющая тока
 $I_{\text{обр}}$ — обратный ток
 $I_{\text{пов}}$ — ток утечки по поверхности
 $I_{\text{пр}}$ — прямой ток
 $I_{\text{рек}}$ — ток рекомбинации

- $I_{\text{тун}}$ — туннельный ток
 I_V — сила света
 L — яркость светящейся поверхности
 M — светимость излучающей поверхности
 $M_{\text{ф}}$ — масса фотона
 M_e — энергетическая светимость
 n — показатель преломления
 N_a — число Авогадро
 P — мощность
 $P_{\text{вых}}$ — выходная мощность
 $P_{\text{погл}}$ — поглощаемая мощность
 $P_{\text{пред}}$ — предельная мощность
 $P_{\text{э}}$ — импульс электрона
 $P_{\text{изл}}$ — мощность излучения
 $P_{\text{ген}}$ — мощность, генерируемая внутри кристалла
 P_{λ} — мощность излучения для длины волны λ
 Π_D — плотность энергии электромагнитного поля
 Q — добротность
 $r_{\text{п}}$ — сопротивление потерь
 $r_{\text{д}}$ — сопротивление диода
 $R_{\text{т.с}}$ — темновое сопротивление
 R — красный свет
 S — площадь поверхности
 t — время
 $t_{\text{и}}$ — длительность импульса
 $U_{\text{п}}$ — напряжение источника питания
 $U_{\text{пр}}$ — напряжение прямого смещения
 $U_{\text{обр}}$ — напряжение обратного смещения
 $V_{\text{ф}}$ — фазовая скорость
 $V_{\text{г}}$ — групповая скорость
 $V_{\text{к}}$ — объем когерентности
 α — коэффициент поглощения, коэффициент затухания света
 β — коэффициент, учитывающий потери
 χ — толщина слоя
 η — внешний квантовый выход
 $\eta_{\text{опт}}$ — коэффициент вывода света
 $\eta_{\text{э}}$ — внутренний квантовый выход
 λ — длина волны
 ν — частота оптического излучения
 $\nu_{\text{ц}}$ — центральная частота излучения
 τ_j — время жизни на уровне φ
 $\tau_{\text{к}}$ — время когерентности
 $\tau_{\text{ф}}$ — время излучения фотона
 Θ — угол излучения, характеристическая температура Дебая
 $\Theta_{\text{р}}$ — расходимость излучения
 Ω — телесный угол

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Селиванов, Л. В.* Основы оптики. — Новосибирск : СибГАТИ, 1997. — Ч. V. — 56 с.
2. *Селиванов, Л. В.* Основы оптики. — Новосибирск : СибГАТИ, 1997. — Ч. IV. — 63 с.
3. *Goss, F.* Ann. Phys. Ser. 6, I / F. Goss, H. Nanchen. — Leipzig, 1947. — 333 с.
4. *Хансперджер, Р.* Интегральная оптика / пер. с англ. — М. : Мир, 1985. — 380 с.
5. *Мальке, Г.* Волоконно-оптические кабели / пер. с англ. / Г. Мальке, П. Гессинг. — Новосибирск : Издатель, 1997. — 264 с.
6. *Чео, П. К.* Волоконная оптика / пер. с англ. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 279 с.
7. *Гауэр, Д.* Оптические системы связи / пер. с англ. — М. : Радио и связь, 1989. — 500 с.
8. *Убайдуллаев, Р. Р.* Волоконно-оптические сети — М. : Эко-Трендз, 2001. — 267 с.
9. *Смирнов, А. Г.* Квантовая электроника и оптоэлектроника. — Минск : Выш. шк., 1987. — 196 с.
10. *Ландсберг, Г. С.* Оптика. — М. : Наука, 1976. — 926 с.
11. Физические величины : справочник / под ред. И. С. Григорьевой, Е. З. Мейлихова. — М. : Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.
12. *Иванов, В. И.* Полупроводниковые оптоэлектронные приборы / В. И. Иванов, А. И. Аксенов, А. М. Юшин. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 448 с.
13. *Быстров, Ю. А.* Оптоэлектронные приборы и устройства. — М. : Радио Софт, 2001. — 256 с.
14. *Гонда, С.* Оптоэлектроника в вопросах и ответах / С. Гонда, Д. Сэко. — Л. : Энергоатомиздат, 1989. — 184 с.
15. *Пихтин, А. Н.* Оптическая и квантовая электроника. — М. : Выш. шк., 2001. — 573 с.
16. *Тугов, Н. М.* Полупроводниковые приборы / Н. М. Тугов, Б. А. Глебов, Н. А. Чарыков. — М. : Энергоатомиздат, 1990. — 576 с.
17. *Шарупич, Л. С.* Оптоэлектроника / Л. С. Шарупич, Н. М. Тугов. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 256 с.

18. *Ярив, А.* Введение в оптическую электронику. — М. : Высш. шк., 1983. — 398 с.
19. *Гроднев, И. И.* Волоконно-оптические линии связи. — М. : Радио и связь, 1990. — 223 с.
20. Справочник по лазерной технике / пер. с нем. / под ред. А. П. Напартович. — М. : Энергоатомиздат, 1991. — 544 с.
21. *Васильев, А. М.* Оптическая электроника / А. М. Васильев, М. А. Кропоткин, В. В. Тихонов. — Л. : Энергоатомиздат, 1990. — 176 с.
22. *Верещагин, И. К.* Введение в оптоэлектронику / И. К. Верещагин, Л. А. Косяченко, С. М. Кокин. — М. : Высш. шк., 1991. — 191 с.
23. *Бутусов, М. М.* Волоконная оптика и приборостроение / М. М. Бутусов, С. Л. Галкин, С. П. Оробинский [и др.] / под общ. ред. М. М. Бутусова. — Л. : Машиностроение, 1987. — 327 с.
24. *Гейг, С.* Применение оптоэлектронных приборов / пер. с англ. / С. Гейг, Д. Эвайс, М. Ходапп, Х. Соренсон. — М. : Радио и связь, 1981. — 344 с.
25. *Пихтин, А. Н.* Оптическая и квантовая электроника. — М. : Высш. шк., 2001. — 573 с.
26. *Унгер, Г. Г.* Оптическая связь. — М. : Связь, 1979. — 264 с.
27. Применение интегральных схем / пер. с англ. / под ред. А. Уильямса. — М. : Мир, 1987. — Кн. 2. — 413 с.
28. *Усов, Н. Н.* Полупроводниковая некогерентная оптоэлектроника // Электронная промышленность. — 2003. — № 1. — С. 103–111.
29. *Литвак, И.* Повышение яркостного контраста электронных видеопреобразователей / И. Литвак, Е. Наумов // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. — 2002. — № 2. — С. 67–71.
30. *Карabanов, С. М.* Фотоэлектричество. Современное состояние и перспективы развития // Электронная промышленность. — 2003. — № 4. — С. 75–81.
31. *Ивлюшкин, А. Н.* Развитие плазменных панелей и устройств на их основе / А. Н. Ивлюшкин, В. Г. Самородов // Электронная промышленность. — 2003. — № 1. — С. 100–102.
32. *Дианов, Е. М.* Волоконные лазеры — новый прорыв в лазерной физике / Е. М. Дианов, И. А. Буфетов // Lightwave Russian edition. — 2004. — № 4. — С. 45–49.
33. *Буфетов, И. А.* Оптический разряд в волоконных световодах / И. А. Буфетов, Е. М. Дианов // Lightwave Russian edition. — 2004. — № 4. — С. 50–51.
34. *Дианов, Е. М.* Достижения в области создания фотонно-кристаллических волокон и сверхширокополосных усилителей // Lightwave Russian edition. — 2004. — № 1. — С. 8–11.
35. *Наний, О. Е.* Волоконно-оптическая связь: Экономическая реальность и технологические перспективы // Lightwave Russian edition. — 2004. — № 1. — С. 18–21.
36. *Наний, О. Е.* Приемники цифровых волоконно-оптических систем связи // Lightwave Russian edition. — 2004. — № 1. — С. 50–51.
37. *Бонсек, Р.* Обеспечение высокой пропускной способности городских сетей при использовании экономичной инфраструктуры / Р. Бонсек, П. Дикинсон, С. Дас // Lightwave Russian edition. — 2004. — № 3. — С. 18–20.

38. *Наний, О. Е.* Фотонно-кристаллические волокна / О. Е. Наний, Е. Г. Павлова // *Lightwave Russian edition*. — 2004. — № 3. — С. 47–53.
39. *Елисеев, П. Г.* Полупроводниковые лазеры от гомопереходов до квантовых точек // *Квантовая электроника*. — 2002. — № 12. — С. 1085–1098.
40. *Слепов, Н.* Фотонно-кристаллическое волокно — реальность // *Электроника. Наука. Технология. Бизнес*. — 2004. — № 5. — С. 80–84.
41. *Кацапов, Ф. М.* Перспективные материалы для элементной базы оптоэлектроники / Ф. М. Кацапов, В. И. Сергеев // *Электронная промышленность*. — 2004. — № 1. — С. 52–56.
42. *Игнатов, А. Н.* Оптоэлектронные приборы и устройства. — М. : ЭкоТрендз, 2006. — 272 с.
43. *Валенко, В. С.* Полупроводниковые приборы и основы схемотехники электронных устройств / А. Н. Игнатов, В. С. Валенко. — М. : Додэка XXI. — 2001. — 368 с.
44. *Ибрагим, К. Ф.* Основы электронной техники. — М. : Мир, 2001. — 398 с.
45. *Васерин, Н. Н.* Применение ПП-индикаторов / Н. Н. Васерин [и др.] — М. : Энергоатомиздат, 1991. — 200 с.
46. *Шур, М.* Физика полупроводниковых приборов / пер. с англ. — М. : Мир, 1992. — 295 с.
47. *Аксененко, М. Д.* Микроэлектронные фотоприемные устройства / М. Д. Аксененко, М. Л. Баранчиков, О. В. Смолин. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 209 с.
48. *Парамонов, В. М.* Двухчастотный волоконный ВКР-лазер / В. М. Парамонов, А. С. Курков, О. И. Медведков, Д. А. Грux [и др.] // *Квантовая электроника*. — 2004. — № 3. — С. 213–215.
49. *Бонсек, Р.* Обеспечение высокой пропускной способности городских сетей при использовании экономической инфраструктуры / Р. Бонсек, П. Дикинсон, Д. Сантану // *Lightwave Russian edition*. — 2004. — № 3. — С. 18–20.
50. *Kiiveri, P.* Новое поколение активных волоконных световодов / P. Kiiveri, M. Hotoleanu, P. Kykkanen, P. Stenius, L. Oy // *Lightwave Russian edition*. — 2004. — № 1. — С. 46–47.
51. *Мюллер, С.* Модернизация и ремонт персональных компьютеров / пер. с англ. — М. : Восточная книжная компания, 1996. — 896 с.
52. *Куликов, Г. В.* Бытовая аудиотехника. Устройство и ремонт / Г. В. Куликов. — М. : ПрофОбрИздат., 2001. — С. 73–84.
53. *Трофимов, Ю.* Полупроводниковые светодиоды — новые сферы применения и тенденции развития рынка // *Электронные компоненты*. — 2003. — № 3. — С. 31–35.
54. *Шептинский, Э.* Яркие световоды производятся и в России / Э. Шептинский, С. Карнов // *Электронные компоненты*. — 2003. — № 3. — С. 35–41.
55. *Жданкин, В.* Электролюминесцентные плоскочелые дисплеи // *Электронные компоненты*. — 2003. — № 7. — С. 97–100.
56. *Давиденко, Ю.* Светодиодные источники белого света // *Схемотехника*. — 2004. — № 5. — С. 11–13.
57. *Петраков, О.* Управление оптронами // *Схемотехника*. — 2004. — № 5. — С. 27–29.

58. *Игнатов, А. Н.* Основы оптоэлектроники. — Новосибирск : СибГУТИ, 2005. — 291 с.
59. *Майская, В.* Органические светодиоды // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. — 2007. — № 5. — С. 39–46.
60. *Самарин, А.* ЖК-микродисплей, использующие LCOS-технологии // Электронные компоненты. — 2005. — № 4. — С. 6–11.
61. *Игнатов, А. Н.* Состояние и перспективы развития наноэлектроники. — Новосибирск : СибГУТИ, 2009. — 368 с.
62. Нанофотоника вместо электроники // Нанотехнологии. — 2008. — № 3. — С. 48.
63. Микродисплеи удалось внедрить в контактные линзы // Нанотехнологии. — 2008. — № 2. — С. 80.
64. *Суздальев, И. П.* Физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. — М. : Ком Книга, 2006. — 592 с.
65. *Пул, Ч.* Нанотехнологии / пер. с англ. / Ч. Пул, Ф. Оуэнс. — М. : Техносфера, 2004. — 328 с.
66. *Гусев, А. И.* Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. — М. : Физматлит, 2005. — 328 с.
67. *Мартинес-Дуарт, Дж.* Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники / Дж. Мартинес-Дуарт, Р. Мартин-Палма Дж., Ф. Агулло-Рueda. — М. : Техносфера, 2007 г. — 368 с.
68. *Кондрашин, А. А.* Формирование цветного изображения органическими светодиодами / А. А. Кондрашин, В. В. Слепцов, А. Н. Лямин // Нано- и микросистемная техника. — 2009. — № 11. — С. 27–31.
69. *Гаскевич, Е.* Первая миля по волокну: проблемы и решения / Е. Гаскевич, Р. Убайдуллаев // Фотоника. — 2007. — № 2. — С. 32–39.
70. *Никитин, В.* Смартлинки — умные соединения / В. Никитин, Э. Семенов, А. Ломанов, А. Гусаров // Фотоника, 2009. — № 1. — С. 32–37.
71. *Абанышин, Н.* Дисплеи с наноразмерными структурами / Н. Абанышин, Н. Жуков, А. Кузнецихин // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. — 2007. — № 5. — С. 32.
72. *Лейченко, А. С.* Применение наноструктурированных углеродных материалов в перспективных источниках света / А. С. Лейченко, Н. В. Лупарев, П. А. Стариков, Н. Н. Чадаев [и др.] // Нано- и микросистемная техника. — 2007. — № 9. — С. 15–19.
73. *Брежнев, В.* Пассивно-матричные жидкокристаллические дисплеи / В. Брежнев, Н. Жуков, С. Студенцов // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. — 2007. — № 5. — С. 26–31.
74. Лазерный проектор со спиральной разверткой для мобильных устройств // Электронные компоненты. — 2009. — № 11. — С. 42–43.
75. *Игнатов, А. Н.* Классическая электроника и наноэлектроника / А. Н. Игнатов, Н. Е. Фадеева, В. Л. Савиных. — М. : Флинта : Наука, 2009. — 728 с.
76. Нанотехнология в полупроводниковой электронике / под ред. А. Л. Асеева. — Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2004.
77. *Игнатов, А. Н.* Микросхемотехника и наноэлектроника / А. Н. Игнатов, С. В. Калинин, Н. Е. Фадеева. — Новосибирск, 2007. — 244 с.
78. *Валиев, К. А.* Квантовые компьютеры: надежды и реальность / К. А. Валиев, А. А. Конин. — М.; Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотичная динамика», 2002. — 320 с.

79. *Берман, Г. П.* Введение в квантовые компьютеры / Г. П. Берман, Г. Д. Дулен, Р. Майньери [и др.]. — М.; Ижевск, 2004. — 188 с.
80. *Бочаров, Л. Ю.* Основные направления и перспектива развития квантовых информационных технологий за рубежом / Л. Ю. Бочаров, П. П. Мальцев // Нано- и микросистемная техника. — 2007. — № 5. — С. 2–10.
81. *Пахомов, С.* Квантовый компьютер // Компьютер-пресс. — 2007. — № 5. — С. 134–138.
82. *Головин, Ю. И.* Введение в нанотехнику. — М.: Машиностроение, 2007. — С. 496.
83. Canon, Toshiba Bring SED Panels to reality. — Display Devices Fall, 2004. — P. 35.
84. *Безверхний, И.* LCD-панели широкого применения от LG, Philips LCD // Современная электроника. — 2007. — № 7. — С. 32–37.
85. *Самарин, А.* Перспективные дисплейные технологии // Электронные компоненты. — 2009. — № 11. — С. 44–45.
86. <http://ru.wikipedia.org/wiki>
87. *Самарин, А.* Современные технологии. Multi-touch сенсорных экранов // Компоненты и технологии. — 2008. — № 1. — С. 134–140.
88. *Никитин, В.* Разделение оптических сигналов для смартлинков / В. Никитин, Э. Семенов, А. Ломанов, А. Гусаров, С. Чайка // Наноиндустрия. — 2010. — № 2. — С. 54–56.
89. *Самарин, А.* Современные технологии Multi-touch сенсорных экранов // Компоненты и Атехнологии. — 2008. — № 2. — С. 99–106.
90. *Самарин, А.* Технология интегрированного экрана TFT ЖК-дисплеев // Электронные компоненты. — 2004. — № 11. — С. 125–127.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Введение	6

Глава 1

Введение в оптоэлектронику	7
1.1. Введение в волоконную оптику	7
1.2. Особенности оптической электроники	9
1.3. История развития оптоэлектроники	12
1.4. Современное состояние оптоэлектронной элементной базы	17
1.5. Система обозначений оптоэлектронных приборов индикации	19
1.6. Система обозначений фотоприемных приборов и оптронов	20
<i>Тестовые вопросы к главе 1</i> «Введение в оптоэлектронику»	21

Глава 2

Физические основы оптоэлектроники	22
2.1. Различие фотометрических и энергетических характеристик	22
2.2. Фотометрические характеристики оптического излучения	23
2.2.1. Функция видности и ее зависимость от длины электромагнитной волны	23
2.2.2. Телесный угол, световой поток и механический эквивалент света	24
2.2.3. Сила света (I_V)	25
2.2.4. Освещенность поверхности (E)	26
2.2.5. Закон освещенности	26
2.2.6. Светимость излучающей поверхности (M)	26
2.2.7. Яркость светящейся поверхности (L)	27
2.2.8. Закон Ламберта	27
2.2.9. Световая экспозиция (H_V)	28
2.3. Энергетические характеристики оптического излучения	28
2.3.1. Энергетическая экспозиция (H_e)	28
2.3.2. Поток излучения (Φ_e)	28

2.3.3. Энергетическая светимость (интегральная излучательная способность M_e)	29
2.3.4. Облученность поверхности (E_e)	29
2.4. Энергетические и световые параметры	29
2.5. Колориметрические параметры	30
2.6. Когерентность оптического излучения	33
2.6.1. Монохроматическая электромагнитная волна	33
2.6.2. Особенности излучения электромагнитных волн в ультрафиолетовом (УФ), видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах	34
2.6.3. Взаимосвязь τ_k и l_k с реальными параметрами оптического излучения	36
2.7. Квантовые переходы и вероятности излучательных переходов	36
2.7.1. Энергетические уровни и квантовые переходы	36
2.7.2. Спонтанные переходы	38
2.7.3. Вынужденные переходы	39
2.7.4. Соотношения между коэффициентами Эйнштейна	41
2.7.5. Релаксационные переходы	42
2.8. Ширина спектральной линии	43
2.9. Использование вынужденных переходов для усиления электромагнитного поля	46
2.10. Механизм генерации излучения в полупроводниках	50
2.11. Прямозонные и непрямоzonные полупроводники	54
2.12. Внешний квантовый выход и потери излучения	58
2.13. Излучатели на основе гетероструктур	61
2.14. Поглощение света в твердых телах	63
2.15. Типы переходов и характеристики излучающих полупроводниковых структур	67
2.16. Параметры оптического излучения	71
<i>Тестовые вопросы к главе 2</i>	
«Физические основы оптоэлектроники»	73

Глава 3

Оптические волноводы	74
3.1. Абсолютный показатель преломления	74
3.2. Законы отражения и преломления света	74
3.2.1. Общие положения	74
3.2.2. Условие полного внутреннего отражения света от границы раздела двух сред	75
3.3. Конструкция планарного симметричного оптического волновода	76
3.4. Эффект Гуса–Хенхена	76
3.5. Условие поперечного резонанса для планарного волновода	78
3.6. Мода оптического излучения	79
3.7. Конструкция цилиндрического диэлектрического волновода — стекловолокна (СВ)	79
3.8. Номинальная числовая апертура стекловолокна	80
3.9. Квантование углов ϕ и γ в стекловолокне	81
3.10. Уширение импульсных сигналов в стекловолокне	82

3.10.1. Уширение импульсного оптического сигнала, обусловленное расходимостью светового пучка	82
3.10.2. Уширение импульсного оптического сигнала, обусловленное материальной дисперсией	83
3.11. Свойства градиентных световолокон	85
3.11.1. Рефракция света в световолокне	85
3.11.2. Градиентные световолокна как способ понижения межмодовой дисперсии	85
3.12. Стационарное волновое уравнение электрической компоненты поля \vec{E} световой волны и его решение	88
3.13. Предельное число мод, способных распространяться по световолокнам	89
3.14. Виды потерь оптических сигналов в световолокнах	90
3.14.1. Потери, обусловленные материальной дисперсией	90
3.14.2. Потери, связанные с рэлеевским рассеянием света в световолокне	92
3.14.3. Потери, обусловленные наличием гидроксильных групп ОН в световолокнах	92
3.14.4. Потери за счет комбинационного рассеяния света	93
3.14.5. Потери, связанные с изгибом световолокон	96
3.14.6. Термомеханические потери	96
3.14.7. Дифракционные потери	96
3.14.8. Оценка полных потерь оптического излучения в световолокнах	97
3.15. Влияние оптического волокна на характеристики сетей связи	100
3.16. Фотонно-кристаллическое волокно	102
3.17. Сравнительная характеристика коаксиальных медных кабелей и световолокон	104
3.18. Разрушение волоконных световодов под действием лазерного излучения	105
<i>Тестовые вопросы к главе 3</i>	
«Оптические волноводы»	106

Глава 4

Приборы некогерентного излучения	107
4.1. Источники искусственного света	107
4.2. Основные характеристики и параметры светодиодов	108
4.2.1. Параметры светодиодов	108
4.2.2. Характеристики светодиодов	113
4.2.3. Определение и оценка параметров светодиодов	114
4.2.4. Схемы возбуждения, обеспечивающие высокую световую эффективность светодиодов	117
4.2.5. Влияние температуры на параметры СИД	118
4.2.6. Срок службы СИД	118
4.2.7. Ограничение тока СИД	119
4.2.8. Достоинства твердотельных излучателей	120
4.3. Конструкции светодиодов	120
4.4. Основные схемы возбуждения светодиодов	121
4.5. Выбор типа светодиода	123

4.5.1. Основы выбора типа светодиода	123
4.5.2. Памятка разработчику электронной аппаратуры с использованием СИД	125
4.6. Электрическая модель светодиода	126
4.7. Светодиоды инфракрасного излучения	128
4.8. Светодиодные источники повышенной яркости и белого света	129
<i>Тестовые вопросы к главе 4</i>	
«Приборы некогерентного излучения»	135
 <i>Глава 5</i>	
Приборы когерентного излучения	137
5.1. Физические основы усиления и генерации лазерного излучения	137
5.2. Структурная схема лазера	140
5.3. Лазеры на основе кристаллических диэлектриков	145
5.4. Жидкостные лазеры	147
5.5. Газовые лазеры	150
5.6. Устройство и принцип действия полупроводникового инжекционного монолазера	152
5.7. Устройство и принцип действия полупроводниковых лазеров с гетероструктурами	154
5.8. Волоконно-оптические усилители и лазеры	159
5.8.1. Волоконные усилители	159
5.8.2. Волоконные лазеры	160
5.8.3. Волоконные лазеры на основе вынужденного комбинационного рассеяния	161
5.9. Светоизлучающие диоды для волоконно-оптических систем	164
5.10. Сравнительная характеристика лазеров и светодиодов	169
<i>Тестовые вопросы к главе 5</i>	
«Приборы когерентного излучения»	171
 <i>Глава 6</i>	
Полупроводниковые фотоприемные приборы	173
6.1. Принцип работы фотоприемных приборов	173
6.2. Характеристики, параметры и модели фотоприемников	176
6.2.1. Характеристики фотоприемников	176
6.2.2. Параметры фотоприемников	177
6.2.3. Параметры фотоприемника как элемента оптопары	178
6.2.4. Глаз как фотоприемник с уникальными свойствами	179
6.2.5. Шумовые параметры фотоприемников	180
6.2.6. Электрические модели фотоприемников	183
6.2.7. Шумовые модели фотоприемников	185
6.3. Фотодиоды на основе $p-n$ -перехода	188
6.4. Фотодиоды с $p-i-n$ -структурой	191
6.5. Фотодиоды Шоттки	193
6.6. Фотодиоды с гетероструктурой	196
6.7. Лавинные фотодиоды	197
6.8. Фототранзисторы	199

6.9. Фототиристоры	202
6.10. Фоторезисторы	203
6.11. Основные характеристики и параметры фоторезистора	206
6.12. ПЗС-приемные фотоприборы	208
6.13. Фотодиодные СБИС на основе МОП-транзисторов	210
6.14. Пиротехнические фотоприемники	214
<i>Тестовые вопросы к главе 6</i>	
«Полупроводниковые фотоприемные приборы»	217

Глава 7

Оптроны	219
7.1. Устройство и принцип действия оптронов	219
7.2. Структурная схема оптрона	222
7.3. Классификация и параметры оптронов	224
7.4. Электрическая модель оптрона	227
7.5. Резисторные оптопары	229
7.6. Диодные оптопары	231
7.7. Транзисторные оптопары	232
7.8. Тиристорные оптопары	234
<i>Тестовые вопросы к главе 7</i>	
«Оптроны»	236

Глава 8

Индикаторные приборы	238
8.1. Жидкокристаллические индикаторы	238
8.1.1. Общие сведения	238
8.1.2. Ячейки на основе эффекта динамического рассеяния (ДР-ячейки)	241
8.1.3. Ячейки на основе твист-эффекта	242
8.1.4. Основные типы и параметры ЖКИ	244
8.1.5. Схемы включения ЖКИ	249
8.1.6. Схемы управления многоразрядными индикаторами	252
8.2. Электролюминесцентные индикаторы (ЭЛИ)	255
8.2.1. Устройство и принцип действия ЭЛИ	255
8.2.2. Типы и параметры ЭЛИ	256
8.2.3. Схемы включения ЭЛИ	257
8.3. Плазменные панели и устройства на их основе	259
8.4. Электрохромные индикаторы	263
8.5. Отображение информации индикаторными приборами	265
<i>Тестовые вопросы к главе 8</i>	
«Индикаторные приборы»	268

Глава 9

Применение оптоэлектронных приборов	270
9.1. Устройство и принцип действия оптоэлектронных генераторов	270
9.1.1. Блокинг-генератор	270
9.1.2. Генератор линейно изменяющегося напряжения	272
9.1.3. Генератор с мостом Вина	273

9.2. Применение оптоэлектронных приборов в аналоговых ключах и регуляторах	274
9.3. Применение оптронов для выполнения логических функций	276
9.4. Применение оптронов как аналогов электрорадиокомпонентов	278
9.5. Устройство и принцип действия оптоэлектронных усилителей	280
9.6. Устройство и принцип действия оптоэлектронных цифровых ключей	281
9.7. Применение оптоэлектронных приборов для измерения высоких напряжений и управления устройствами большой мощности	284
9.8. Принцип действия оптических устройств записи информации	286
9.9. Принцип лазерно-оптического считывания информации	289
9.10. Принципы цифровой оптической записи и воспроизведения информации с компакт-дисков	291
9.10.1. Устройство компакт-диска	291
9.10.2. Запись на компакт-диски	292
9.10.3. Отличие дисков CD-R/CD-RW от штампованных	294
9.10.4. Маркировка дисков	295
9.10.5. Надежность дисков CD-R/RW в сравнении со штампованными	296
9.10.6. Изготовление и тиражирование компакт-дисков	297
9.10.7. Воспроизведение компакт-диска	299
9.10.8. Устройство накопителей на CD-ROM	301
9.10.9. Представление и параметры звукового сигнала на CD	303
9.10.10. Джиттер	306
9.11. Оптоэлектронные сенсорные системы взаимодействия человека с электронной техникой	307
<i>Тестовые вопросы к главе 9</i>	
«Применение оптоэлектронных приборов»	317

Глава 10

Волоконно-оптические системы связи	319
10.1. Общие сведения	319
10.2. Волоконно-оптические системы распределения	320
10.2.1. Классификация волоконно-оптических систем распределения	320
10.2.2. Схемы волоконно-оптических систем распределения	321
10.3. Оптические передатчики	323
10.4. Приемники волоконно-оптических систем связи	327
10.4.1. Приемники оптического излучения	327
10.4.2. Приемные оптоэлектронные модули	332
10.5. Цифровые волоконно-оптические системы связи	334
10.6. Аналоговые волоконно-оптические системы связи	347
10.7. «Умные» соединители на основе смартлинков	348

10.7.1. Технические решения смартлинков	348
10.7.2. Самоформирующиеся компьютеры	356
10.7.3. Оптоволоконные нейроинтерфейсы	357
10.8. Волоконно-оптические технологии для сетей доступа	359
10.8.1. Общие сведения	359
10.8.2. Тенденции мирового развития сетей доступа	360
10.8.3. Технологии оптических сетей доступа	362
10.8.4. Категории оптических сетей доступа	365
10.8.5. Волокно до бизнеса — FTTBusiness	367
10.8.6. Волокно до дома — FTTH	367
10.8.7. Волокно до многоквартирного дома — FTTB	372
10.8.8. Волокно до сельского района	375
<i>Тестовые вопросы к главе 10</i>	
«Волоконно-оптические системы связи»	376

Глава 11

Физические основы нанофотоники	377
11.1. Введение в нанофотонику	377
11.2. Классификация низкоразмерных объектов	382
11.3. Квантовые эффекты в полупроводниках	383
11.4. Оптические свойства наноматериалов	386
11.4.1. Общие сведения	386
11.4.2. Оптические свойства металлических нанокластеров	391
11.4.3. Оптические свойства полупроводниковых нанокластеров	393
11.4.4. Фотонные нанокристаллы	396
11.4.5. Оптические свойства квантовых ям	398
11.4.6. Оптические свойства квантовых точек	401
11.5. Использование квантово-размерных эффектов для разработок лазеров	404
<i>Тестовые вопросы к главе 11</i>	
«Физические основы нанофотоники»	407

Глава 12

Нанофотонные приборы, устройства и системы	408
12.1. Общие сведения	408
12.2. Наноэлектронные лазеры	409
12.2.1. Наноэлектронные лазеры с горизонтальными резонаторами	409
12.2.2. Наноэлектронные лазеры с вертикальными резонаторами	411
12.2.3. Оптические модуляторы	417
12.3. Наноэлектронные устройства и системы на основе жидких кристаллов	419
12.3.1. Общие сведения	419
12.3.2. Электрооптический модулятор	423
12.3.3. Светоклапанные модуляторы	425
12.3.4. Плоские телевизоры, дисплеи и светоклапанные модуляторы видеопроекторов	425

12.3.5. Жидкокристаллические дисплеи широкого применения	429
12.4. Излучающие приборы на основе органических наноматериалов	432
12.4.1. Общие сведения	432
12.4.2. Органические светодиоды	433
12.4.3. Технологии получения органических светодиодов	439
12.4.4. Получение цветного изображения в OLED-дисплеях	442
12.4.5. Использование MEMS-ключей вместо транзисторов в AMOLED	444
12.4.6. Состояние разработок устройств и систем на основе органических светодиодов	446
12.5. Источники света на основе эффекта автоэмиссии углеродных волокон	450
12.5.1. Общие сведения	450
12.5.2. Катодолуминесцентные дисплеи с автоэлектронными эмиттерами	454
12.6. Фотоприемные нанoeлектронные приборы	459
12.6.1. Фотоприемники на квантовых ямах	459
12.6.2. Фотоприемники на основе квантовых точек	462
12.7. Фотоматрицы широкого применения	467
12.7.1. Общие сведения	467
12.7.2. Характеристики матриц	468
12.7.3. Типы матриц по применяемой технологии	471
12.7.4. Методы получения цветного изображения в фотоматрицах	471
12.8. Лазерный микропроектор со спиральной разверткой для мобильных устройств	473
12.9. Квантовая нанотехнология и ее продукция	474
12.9.1. Общие сведения	474
12.9.2. Разработки квантовых компьютеров	476
12.9.3. Разработки в квантовой криптографии	483
<i>Тестовые вопросы к главе 12</i> «Нанофотонные приборы, устройства и системы»	486
Ответы на тестовые вопросы	487
Приложения	489
Список использованной литературы	526

Александр Николаевич ИГНАТОВ

**ОПТОЭЛЕКТРОНИКА
И НАНОФОТОНИКА**

Учебное пособие

Зав. редакцией
физико-математической литературы *А. П. Погода*
Художественный редактор *С. Ю. Малахов*
Редактор *М. С. Коляткевич*
Технический редактор *Е. Е. Егорова*
Корректоры *Т. А. Кошелева, В. О. Логунова*
Подготовка иллюстраций *Е. М. Николаева*
Выпускающие *В. А. Медведевских, Ю. Г. Бакишанова*

ЛР № 065466 от 21.10.97
Гигиенический сертификат 78.01.07.953.П.007216.04.10
от 21.04.2010 г., выдан ЦГСЭН в СПб

Издательство «ЛАНЬ»
lan@lanbook.ru; www.lanbook.com
192029, Санкт-Петербург, Общественный пер., 5.
Тел./факс: (812)412-29-35, 412-05-97, 412-92-72.
Бесплатный звонок по России: 8-800-700-40-71

Подписано в печать 18.02.11.
Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Формат 60×90^{1/16}.
Печать офсетная. Усл. п. л. 34,00. Тираж 1000 экз.

Заказ № .

Отпечатано в полном соответствии
с качеством предоставленных диапозитивов
в ОАО «Издательско-полиграфическое предприятие «Правда Севера».
163002, г. Архангельск, пр. Новгородский, д. 32.
Тел./факс (8182) 64-14-54; www.ippps.ru