



# МИР Физики и техники

Методы и устройства  
оптико-голографических  
систем архивной памяти

Под ред. д.т.н., проф.  
С.Б. Одинокова

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2018

УДК 004.072.3 + 535.512(075.8)

ББК 22.243.4

М54

*Рецензенты:*

*Венедиктов В.Ю.* – д.ф.-м.н., профессор кафедры лазерных измерительных и навигационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).

*Вишняков Г.Н.* – д.т.н., профессор, начальник лаборатории ФГУП «ВНИИ оптико-физических измерений».

**М54 Методы и устройства оптико-голографических систем архивной памяти**

/ Под ред. С.Б. Одинокова / [Авторы: С.Б. Одинокоев, А.Ю. Бетин, В.И. Бобринев, Н.М. Вереникина, С.С. Донченко, Е.Ю. Злоказов, Д.С. Лушников, В.В. Маркин]

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 236 с. ISBN 978-5-94836-507-7

Рассмотрены основные типы систем памяти цифровой информации на оптических дисках и голографических носителях, приведены требования и определены основные характеристики и параметры оптико-голографических систем архивной памяти.

Проанализированы методы мультиплексирования микроголограмм Фурье на голографический носитель. Рассмотрены основные оптические схемы регистрации цифровой информации в виде одиночных и наложенных микроголограмм оптико-голографических систем архивной памяти, приведены требования к их узлам и блокам. Приведен метод компьютерного синтеза одномерных и двухмерных микроголограмм Фурье и проанализированы оптические схемы для их считывания и записи на голографический носитель.

Книга открывает перспективы для дальнейших исследований, разработок и проектирования конкретных оптико-голографических устройств и систем архивной памяти с записью цифровой или аналоговой информации.

Издание будет полезно как для ученых и специалистов, работающих в области голографических технологий, оптико-электронных голографических корреляционных систем распознавания изображений, голографической микроскопии, так и для студентов и молодых специалистов, обучающихся и желающих работать в данной области науки и техники.

УДК 004.072.3 + 535.512(075.8)

ББК 22.243.4

© 2018, С.Б. Одинокоев

© 2018, АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-507-7

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение . . . . .	8
<b>Глава 1. Оптические дисковые системы памяти с побитовой записью и считыванием цифровой информации. — Н.М. Вереникина, Д.С. Лушников, В.В. Маркин, С.Б. Одинокоев. . . . .</b>	<b>15</b>
1.1. Однослойные оптические дисковые системы памяти типа 2D с побитовой записью в одном тонком слое регистрирующей среды. . . . .	15
1.2. Многослойные оптические дисковые системы памяти типа 3D с фокусировкой лазерного излучения и побитовой записью в каждом отдельном слое . . . . .	21
1.3. Оптические дисковые системы памяти типа 3D с фокусировкой лазерного излучения и побитовой записью в каждой отдельной плоскости внутри толстой регистрирующей среды. . . . .	26
Литература. . . . .	33
<b>Глава 2. Голографические системы архивной памяти типа 3D с записью в объеме регистрирующей среды. — Н.М. Вереникина, Д.С. Лушников, В.В. Маркин, С.Б. Одинокоев . . . . .</b>	<b>37</b>
2.1. Принципы построения систем оптико-голографической системы архивной памяти со страничной записью и считыванием информации . . . . .	37
2.1.1. Страничное представление и кодирование цифровой информации для систем голографической памяти . . . . .	43
2.2. Оптические схемы записи страничной цифровой информации в виде одиночных микроголограмм Фурье . . . . .	46
2.2.1. Безлинзовая оптическая схема записи микроголограмм Фурье без диффузора . . . . .	48
2.2.2. Безлинзовая оптическая схема записи микроголограмм Фурье с диффузором . . . . .	53
2.2.3. Оптическая схема записи голограмм Фурье с объективами . . . . .	58
2.3. Методы борьбы с переэкспозицией фоточувствительной среды при записи голограмм Фурье . . . . .	66

2.3.1. Метод смещения плоскости регистрации . . . . .	66
2.3.2. Метод фазового кодирования объектного пучка с помощью фазовых диффузоров . . . . .	68
2.4. Методы и схемы мультиплексирования микроголограмм Фурье при записи на фоточувствительные регистрирующие среды. . . . .	84
2.4.1. Метод углового мультиплексирования и оптические схемы записи и считывания информации с микроголограмм Фурье на основе многоканальных оптических головок . . . . .	93
2.5. Современное состояние в области разработки систем оптико-голографической мультигигабайтной памяти . . . . .	104
2.5.1. Разработки оптико-голографической системы памяти компаний InPhase, Akonia . . . . .	107
2.5.2. Разработка оптико-голографической системы памяти компании Optware . . . . .	111
2.5.3. Оптико-голографическая система памяти Института автоматики и электрометрии СО РАН на основе метода многослойной записи/считывания брэгговских решеток в объемных фоточувстви- тельных средах с многофотонным поглощением . . . . .	114
Литература . . . . .	120
<b>Глава 3. Типы фоточувствительных материалов и регистрирующих сред для оптико-голографических систем архивной памяти. — Н.М.Вереникина, Д.С. Лушников, В.В. Маркин, С.Б.Одинокоев . . . . .</b>	
3.1. Требования к параметрам фоточувствительных материалов для систем архивной голографической памяти	124
3.2. Галогенидосеребряные фоточувствительные материалы . . . . .	129
3.2.1. Фоточувствительные галогенидосеребряные материалы АО «Компания «Славич» . . . . .	129
3.3. Фотополимерные материалы . . . . .	131
3.3.1. Фотополимеры фирмы DuPont . . . . .	133
3.3.2. Фотополимеры фирмы InPhase Technologies . . . . .	139
3.3.3. Фотополимерные материалы Института органической химии СО РАН. . . . .	140
3.3.3.1. Композиции на основе фоточувствительных материалов и стекол типа золь-гель-стекла . . . . .	140

3.3.4. Фотополимерные материалы «Диффен» Санкт-Петербургского НИУ ИТМО . . . . .	143
3.3.5. Сравнительная характеристика коммерческих фотополимерных материалов . . . . .	145
3.4. Фоточувствительные материалы на основе бихромированной желатины . . . . .	146
3.5. Фототерморефрактивные стекла Санкт-Петербургского НИУ ИТМО . . . . .	147
Литература . . . . .	151

<b>Глава 4. Методы и принципы построения оптико-голографической системы архивной памяти на основе компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье. — А.Ю. Бетин, В.И. Бобринев, С.С. Донченко, Е.Ю. Злоказов, С.Б. Одинокоев . . . . .</b>	<b>154</b>
---	------------

4.1. Теоретическое исследование метода получения компьютерно-синтезированных голограмм . . . . .	154
4.1.1. Математические основы компьютерного синтеза голограмм и формирования восстановленных изображений . . . . .	155
4.1.2. Компьютерный синтез голограммы Френеля . . . . .	159
4.1.3. Компьютерный синтез голограммы Фурье . . . . .	163
4.1.3.1. Эквивалентная оптическая схема синтеза голограммы Фурье . . . . .	163
4.1.3.2. Эквивалентная оптическая схема восстановления синтезированной голограммы Фурье . . . . .	165
4.2. Свойства компьютерно-синтезированных голограмм Фурье, используемых при записи страниц бинарных данных . . . . .	166
4.2.1. Ограничение динамического диапазона градаций амплитудного пропускания компьютерно- синтезированных голограмм Фурье . . . . .	167
4.2.2. Особенности фазового кодирования страницы бинарных данных при записи компьютерно-синтезированных голограмм Фурье . . . . .	168
4.2.3. Ограничение плотности записи цифровой информации на компьютерно-синтезированную голограмму Фурье . . . . .	173

4.3. Проекционный метод и одноканальная оптическая система записи двумерных микроголограмм Фурье на фоточувствительный материал . . . . .	177
4.3.1. Теоретическое моделирование оптической системы получения компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье . . . . .	179
4.3.2. Варианты построения проекционной оптической системы записи компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье на фоточувствительный материал . . . . .	183
4.3.2.1. Источники излучения для проекционной оптической системы записи КСГФ . . . . .	184
4.3.2.2. Особенности использования современных пространственных модуляторов света в проекционной оптической системе записи микроголограмм Фурье . . . . .	185
4.3.2.3. Особенности использования современных OLED-микродисплеев в проекционной оптической системе записи микроголограмм Фурье . . . . .	190
4.3.2.4. Экспериментальное макетирование устройства записи КСГФ на основе ЖК ПМС, ЖККП ПМС и OLED-дисплея в проекционной оптической системе . . . . .	191
Литература . . . . .	194
<b>Глава 5. Оптико-электронные устройства для записи и считывания цифровой информации с мультиплексированных одномерных компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье. — А.Ю. Бетин, В.И. Бобринев, Н.М. Вереникина, С.С. Донченко, Е.Ю. Злоказов, С.Б. Одинокоев</b>	<b>196</b>
5.1. Метод мультиплексирования при получении одномерных микроголограмм Фурье и оптический эквивалент системы записи . . . . .	196
5.1.1. Проблемы мультиплексной записи и считывания цифровой информации при получении двумерных микроголограмм Фурье . . . . .	197
5.1.2. Метод и алгоритм расчета одномерных микроголограмм Фурье . . . . .	198

5.1.3. Эквивалентная схема восстановления изображений, закодированных на одномерных КСГФ . . . . .	199
5.1.4. Эквивалентная схема восстановления изображений, закодированных на одномерных КСГФ . . . . .	200
5.2. Принципы построения оптических систем устройств записи мультиплексированных одномерных компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье и считывания с них цифровой информации . . . . .	202
5.2.1. Проекционная оптическая схема записи одномерных 1D-микроголограмм Фурье с мультиплексированием типа «угловой поворот» . . . . .	202
5.2.2. Исследование режимов экспонирования и химической обработки фотопластин ВРП для определения их линейного участка и динамического диапазона . . . . .	207
5.2.3. Варианты построения системы считывания мультиплексных одномерных микроголограмм Фурье .	210
5.2.3.1. Оптическая система с постраничным считыванием мультиплексных одномерных микроголограмм Фурье . . . . .	210
5.2.3.2. Оптическая система с построчным считыванием мультиплексированных одномерных микроголограмм Фурье . . . . .	212
5.2.4. Синтез оптической системы с постраничным считыванием мультиплексированных одномерных микроголограмм Фурье . . . . .	215
5.2.4.1. Наведение оптической системы на мультиплексированные одномерные голограммы при считывании. . . . .	217
5.3. Декодирование цифровой информации с восстановленных изображений страниц данных . . . . .	219
Литература . . . . .	230
Заключение . . . . .	232

## ВВЕДЕНИЕ

В комплексе проблем, связанных с обработкой информации, одной из актуальных является задача хранения больших объемов архивной цифровой информации. Актуальность задачи обусловлена колоссальным объемом и лавинным ростом хранимой информации. Так, в 2000 г. был записан 1 экзабайт ( $10^{18}$  байт) информации, в 2006 г. — 2 экзабайта, в 2016 г. — уже 20 экзабайтов, т.е. в 10 раз больше, и эта тенденция сохраняется. Поэтому ежегодно требования к емкости систем хранения и памяти информации растут, по оценкам специалистов, примерно на 60% в год [3D лазерные технологии / Отв. редактор П.Е. Твердохлеб, 2003, Офсет, Новосибирск, 550 с.].

Наибольшее количество информации, требуемой для последующего архивного хранения в течение многих лет (до 25—50 лет), появляется при решении следующих прикладных задач:

- 1) хранение аэрокосмических снимков и изображений, получаемых с орбитальных спутников, предназначенных для экологического мониторинга поверхности земли, при разведке полезных ископаемых, обнаружении объектов в военных целях и др.; оценки показывают, что только с одного спутника в сутки поступает на землю до 1 ГБ информации в цифровом виде, а количество спутников для мониторинга на сегодня исчисляется сотнями, т.е. количество информации просто колоссально;
- 2) хранение медицинских изображений персонально для физических лиц; в развитых странах ставится задача персонального сохранения в цифровом виде рентгеновских и томографических снимков каждого человека, начиная от рождения и до преклонного возраста; так, только в Европе оценка количества снимков составляет до 200 снимков/чел  $\times$  500 млн человек =  $10^{11}$  снимков или в цифровом виде до 5000 ТБ информации;
- 3) хранение персональных данных физических лиц в виде их паспортов, пластиковых банковских карточек, дипломов об образовании, сведений о месте проживания и др.; так, при пересечении границ стран с последующим паспортным контролем требуется хранить данные о сотнях миллионов паспортов физических лиц, что особенно важно при борьбе с международным

терроризмом и в глобальном масштабе представляет пока нерешенную задачу;

- 4) есть целый ряд более простых, но не менее важных задач, например по архивному хранению строительной документации; так, в Москве с 1947 г. и по настоящее время в подразделениях МЧС в обязательном порядке хранятся все поэтажные планировки и чертежи всех возведенных и возводимых зданий, что также оценивается до 5000—10000 ТБ цифровой информации.

Таким образом, архивное хранение такого количества информации является даже более важной задачей, чем оперативное хранение на короткое время (обычно до 2—3 лет).

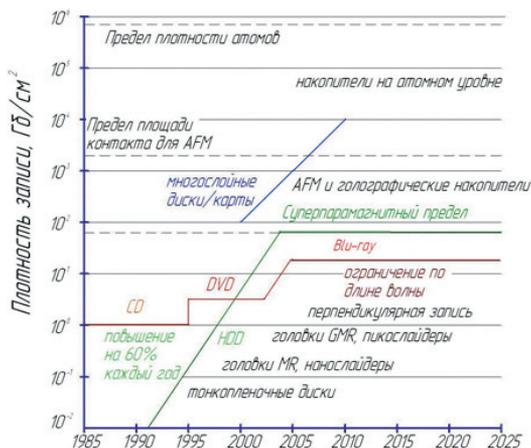
В то время как потребности хранения информации требуют увеличения емкости и быстродействия устройств массовой памяти, усовершенствование технологий современных электронных и магнитных систем хранения данных достигло своих физических пределов, которые ограничивают теоретически достижимые плотности записи информации, как это представлено на рис. 1. Кроме того, они имеют существенные недостатки:

- в магнитных системах до сих пор выполняется контактное считывание информации головкой с магнитного диска (часто называемых винчестерами), что приводит к полному осыпанию магнитного слоя через 2—3 года и необходимости замены всей дорогостоящей системы;
- в электронных носителях, называемых флешками, SSD-дисками и др., до сих пор не решена проблема защиты от стирания информации под воздействием импульсных электромагнитных полей, количество которых с каждым годом только увеличивается и может привести к катастрофическим последствиям.

Поэтому одним из эффективных путей решения указанной задачи архивного хранения цифровой информации до настоящего времени являются две оптические технологии:

- 1) запись, хранение и считывание информации с оптических CD/DVD-дисков и BD-дисков (Blu-Ray Disc);
- 2) запись, хранение и считывание информации с оптических голографических дисков.

Наиболее распространенные в настоящее время системы дисковой памяти с записью данных на поверхности оптического но-

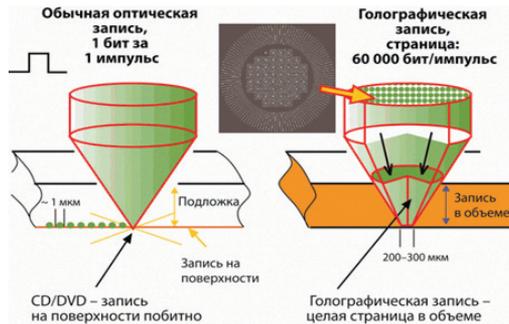


**Рис. 1.** История и перспективы развития характеристик систем памяти

сителя подошли к пределу плотности записи, обусловленному как техническими и технологическими причинами, так и фундаментальными. Дальнейшее развитие технологии оптической памяти возможно за счет использования толстых регистрирующих сред. Это направление реализуется путем многослойной записи информации, а также путем наложенной записи объемных голограмм в толстых фоточувствительных материалах. Технология наложенной голографической записи страниц информации достигла значительных успехов и близка к выходу на потребительский рынок. Однако для эффективного использования при этом страничного формата данных необходимо разрабатывать новые параллельные системы связи с компьютером.

На рис. 2 представлены схемы записи информации для обычного оптического диска и для трехмерной оптико-голографической памяти (ОГП), в которой теоретически возможная плотность записи данных может составлять  $\sim 1,0$  ТБ/см<sup>3</sup> и скорость передачи данных — сотни мегабайт в секунду. Это возможно благодаря:

- 1) переходу от последовательной записи/считывания битов информации к двумерному (параллельному) вводу/воспроизведению одновременно страниц данных, содержащей несколько мегабит цифровых данных;



**Рис. 2.** Побитовая и постраничная организация оптической памяти

2) организации наложенной (мультиплексной) голографической записи многих голограмм с последующим селективным восстановлением каждой голограммы, что позволяет использовать «информационный» ресурс объемного регистрирующего материала. Устройства ОГП обеспечивают высокую защищенность и длительность хранения информации, а также высокую надежность и помехоустойчивость хранения информации благодаря большой избыточности записи. Каждая из единиц информации записывается в голограмме в виде интерференционной картины, распределенной по всему объему регистрирующей среды. В этом случае неконтролируемая потеря в среде части такой картины не влечет за собой потерю всей информации. Все эти достоинства ОГП реализуются особенно при записи цифровой информации (а в настоящее время не только цифровая информация, но и аналоговая — фотографии, кинофильмы и др., используют цифровое кодирование).

Таким образом, голографическая технология хранения информации является перспективной и на ее разработку направлены усилия многих научно-исследовательских коллективов во всем мире. Однако основной проблемой ОГП является обеспечение исследований в этой области фоточувствительными и регистрирующими материалами с высокой энергетической чувствительностью и разрешающей способностью, обеспечивающими длительное хранение и неdestructивное считывание голограмм. Кроме того, классические ОГП характеризуются сложной оптической систе-

мой, необходимостью применения дорогих лазеров, пространственных модуляторов света с высокой частотой смены кадров и высокими оптическими характеристиками, а также дорогостоящими высокопроизводительными фотоприемными устройствами.

В соответствии с вышеизложенным в настоящей книге приводятся материалы, посвященные разработке архивной оптико-голографической памяти (ОГП), например, для записи/считывания на голографический накопитель видеосигналов цифрового потока со скоростью до 25 Мб/с и с разрешением не менее  $720 \times 576$  пикселей. При этом должна обеспечиваться непрерывная запись видеoinформации в течение не менее 1 часа, т.е. непрерывная запись  $25 \text{ Мб/с} \times 3600 \text{ с} = 90 \text{ Гб}$  или 11,25 Гб часового потока цифровой информации. Последние достижения в области разработки ОГП показывают возможность записи до 500 Гб информации на голографический диск с размерами обычного ВD-диска 120 мм, на котором можно записывать не более 25 Гб на одну сторону.

В первой главе проанализированы основные типы оптических систем памяти цифровой информации на оптических однослойных CD/DVD/BD-дисках (называемых также двухмерными 2D-дисками), а также многослойные диски (называемые часто трехмерными 3D-дисками) с побитовой записью и считыванием. Также рассмотрены принципы создания терабайтных оптических систем архивной памяти типа 3D с побитовой записью и считыванием цифровой информации в объеме регистрирующей среды.

Во второй главе рассматриваются методы и устройства оптико-голографических систем архивной памяти типа 3D с записью в объеме регистрирующей среды. Также рассматривается страничное представление и кодирование цифровой информации для систем голографической памяти, методы фазового кодирования объектного пучка с помощью фазовых масок и диффузоров, методы мультиплексирования микроголограмм Фурье при записи на фоточувствительные материалы и регистрирующие среды.

В третьей главе приводится обзор основных типов фоточувствительных материалов и регистрирующих сред, используемых при записи мультиплексных микроголограмм Фурье. Кратко анализируются параметры и возможности новых фототерморефрактивных стекол для многослойной записи микроголограмм Фурье.

В четвертой главе рассматриваются новые методы и принципы построения ОГП на основе компьютерно-синтезированных мик-

роголограмм Фурье. В качестве альтернативы классическому двух-лучевому методу записи голограмм предлагается использование методов их компьютерного синтеза. В этом случае цифровая страница информации с помощью численных расчетов кодируется, формируется в виде компьютерно-синтезированной голограммы Фурье (или Френеля), а затем выводится в оптическую систему на пространственный модулятор света (ПМС). Далее с помощью проекционного метода фотолитографии голограмма Фурье с ПМС уменьшается до требуемых размеров (например до  $0,3 \times 0,3$  мм) и перезаписывается на фоточувствительный материал, который после соответствующей фотохимической обработки преобразуется в микроголограмму Фурье на голографическом диске. Показывается, что использование компьютерно-синтезированных голограмм и проекционной оптической системы (фотолитографии) приводит к резкому снижению массогабаритных параметров оптических систем и увеличению скорости записи информации.

В пятой главе рассматривается оригинальный метод и оптико-электронные устройства для записи и считывания цифровой информации с мультиплексированных одномерных компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье как с построчным, так и с постраничным считыванием информации. Рассматриваются параметры и особенности применения ПМС на основе жидких кристаллов для ввода в оптический канал компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье.

Основное содержание книги составляют оригинальные научно-технические результаты, полученные авторами в рамках выполнения конкретных прикладных НИР и ОКР, проводимых в рамках целевых программ Министерства образования и науки РФ, а также по заданиям государственных и коммерческих организаций, занимающихся проблемой архивного долговременного хранения информации. В частности, это относится к результатам, содержащимся в четвертой и пятой главах книги.

Общее редактирование книги проведено д.т.н., профессором С. Б. Одиноквым. Главы 1—3 написаны к.т.н., доц. Н. М. Вереникиной, Д. С. Лушниковым, В. В. Маркиным, д.т.н., проф. С. Б. Одиноквым, глава 4 — А. Ю. Бетиним, к.ф.-м.н., с.н.с. В. И. Бобриневым, С. С. Донченко, к.ф.-м.н., с.н.с. Е. Ю. Злоказовым, д.т.н., проф. С. Б. Одиноквым, глава 5 — А. Ю. Бетиним, к.ф.-м.н., с.н.с. В. И. Бобриневым, к.т.н., доц. Н. М. Вереники-

ной, С. С. Донченко, к.ф.-м.н., с.н.с. Е. Ю. Злоказовым, д.т.н., проф. С. Б. Одиноквым.

Авторы выражают большую благодарность за проявленный интерес к работе и ее поддержку от АО «Научно-производственное объединение «Криптен»» (г. Дубна, Россия), ФГУП «НТЦ «АТЛАС», благодарность за помощь в компьютерном моделировании Талалаеву В. Е. и в экспериментах Ханевичу П. А., за плодотворное обсуждение результатов работы Жердеву А. Ю., Цыганову И. К., а также Найден Л. А. за помощь при оформлении и редактировании материалов книги.

Авторы выражают глубокую признательность рецензентам — д.ф.-м.н., профессору Венедиктову В. Ю. и д.т.н., профессору Вишнякову Г. Н. за титанический труд по прочтению и обсуждению материалов и результатов работы, представленных в данной книге.

По мнению авторов, данная книга открывает перспективы для дальнейших исследований в области создания ОГП с повышенной емкостью и малыми массогабаритными параметрами, будет полезна как для ученых и специалистов, работающих в сфере хранения больших массивов информации, так и для студентов и молодых специалистов, обучающихся и желающих работать в данной области науки и техники.

## **ГЛАВА I**

# **ОПТИЧЕСКИЕ ДИСКОВЫЕ СИСТЕМЫ ПАМЯТИ С ПОБИТОВОЙ ЗАПИСЬЮ И СЧИТЫВАНИЕМ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ**

В настоящее время существует несколько вариантов оптической дисковой памяти с побитовой записью и считыванием цифровой информации:

- 1) однослойные оптические дисковые системы памяти типа 2D с побитовой записью в одном тонком слое регистрирующей среды [1];
- 2) многослойные оптические дисковые системы памяти типа 3D с фокусировкой лазерного излучения и побитовой записью в каждом отдельном слое, объединенные затем в многослойную структуру [1];
- 3) оптические дисковые системы памяти типа 3D с фокусировкой лазерного излучения и побитовой записью в каждой отдельной плоскости внутри толстой регистрирующей среды [2].

### **1.1. Однослойные оптические дисковые системы памяти типа 2D с побитовой записью в одном тонком слое регистрирующей среды**

Было разработано и существует несколько вариантов однослойных оптических дисковых систем памяти типа 2D с побитовой записью в одном тонком слое (поверхностном слое) регистрирующей среды, называемых в ранней литературе двухмерными оптическими дисковыми системами записи и воспроизведения информации [1].

Массовое внедрение систем побитовой оптической памяти началось с принятия в 1982 г. международного стандарта на аудиокомпакт-диск — CD (Compact Disc), где запись/воспроизведение данных проводится с помощью сфокусированного лазерного пучка на диске диаметром 120 мм. Оптический диск представляет собой плоский металлизированный диск с цифровой информацией, закодированной в виде ряда информационно-несущих углублений (pits — питов), расположенных вдоль дорожек по спирали, распространяющейся от центра к периферии [2]. Отражающие информационные питы соответствующей глубины предназначены для создания модуляции интенсивности отраженного лазерного излучения.

В дальнейшем технология CD была распространена также для записи, хранения и воспроизведения видеoinформации, а также для хранения software, например, для персональных компьютеров.

Информационный носитель CD-ROM (только для чтения) устроен так, что пользователь не может записывать на нем свою информацию. Она записывается и тиражируется только производителем оптических дисков и не может быть стерта для повторной записи [2—4]. На дисках CD-ROM стало возможным размещать 650 МБ, а затем и 1 ГБ двоичных данных. В лазерных накопителях использовались полупроводниковые лазеры с длиной волны 0,78 мкм, числовая апертура выходного фокусирующего микрообъектива составляла 0,45, расстояние между дорожками — 1,6 мкм, а минимальный размер информационного «следа» при записи — 0,83 мкм.

Кроме оптических дисков типа CD-ROM были разработаны оптические диски памяти типа CD-WORM (write-once, read many) с возможностью однократной записи и многократного считывания, а также перезаписываемые оптические диски типа CD-RW (ReWritable).

В информационных носителях типа CD-WORM в качестве фоточувствительной среды обычно используются материалы, содержащие в своем составе органические вещества из класса цианиновых или фталоцианиновых красителей, изменяющих свои поглощательные свойства при записи информации [5].

В основе работы переписываемой оптической памяти типа CD-RW лежит обратимый магнитооптический эффект [6], основанный на эффекте локального лазерного разогрева и переориентации магнитных доменов при наличии внешнего магнитного

поля [1], или фазовый переход «аморфная — поликристаллическая» структуры в халькогенидных полимерных средах [7—9].

В 1997 г. был реализован один из вариантов оптической дисковой памяти типа DVD (аббревиатура Digital Versatile Disc — «цифровой универсальный диск», а для видео — Digital Video Disc — «цифровой видеодиск»). В этом случае использовались полупроводниковые лазеры с длиной волны 0,65 мкм, числовая апертура выходного фокусирующего микрообъектива составляла 0,6, расстояние между дорожками — 0,74 мкм, а минимальный размер информационного «следа» при записи — 0,4 мкм, что представлено на рис. 1.1.



Рис. 1.1. Структура оптического диска типа DVD [50—51]

Таким образом, можно констатировать следующую классификацию:

- *CD/DVD-ROM* — информация хранится в отражающих питах и считывается при сканировании поверхности диска сфокусированным лазерным лучом; их достоинством является легкость массового тиражирования с помощью мастер-диска;
- *CD/DVD-WORM* — отражательныепиты формируются путем термического нагрева слоя сфокусированным лазерным лучом; плотность записи обычно ниже, чем у ROM-дисков, а для ее повышения используются красные или голубые лазеры;
- *магнитооптические RW-диски* — информационный пит формируется при одновременном воздействии сфокусированного лазерного луча и внешнего магнитного поля, причем в областях слоя, температура которых превышает температуру Кюри, локальная ориентация магнитных доменов определяется ориентацией внешнего магнитного поля; это проявляется в небольших (порядка долей градуса) изменениях вектора поляризации считывающего излучения в соответствии с магнитооптическим эффектом Фарадея [6].

В дисках типа CD-RW вследствие малой величины изменения поляризационных характеристик считывающего пучка эффективность использования интенсивности этого излучения при считывании не превышает долей процента. Вместе с тем, используя ультракороткие записывающие импульсы и учитывая гауссово пространственное распределение интенсивности в них, с помощью этого метода можно получать информационныепиты размером порядка 200—300 нм [10].

К сожалению, как CD-, DVD-, так и магнитная память хранит информацию на поверхности регистрирующей среды, что ограничивает ее предельную информационную емкость в пределах до 1 Гб.

В настоящее время основные усилия разработчиков средств оптической памяти направлены на:

- увеличение плотности и объема записываемой (хранимой) информации;
- повышение скорости ее записи (для записываемых и/или перезаписываемых носителей) и считывания;
- повышение длительности хранения (временной устойчивости) записанной информации.

Стабильность эксплуатационных свойств носителей в процессе длительного хранения в основном зависит только от конструкции и компонентного состава отдельных их элементов.

Первые две задачи до настоящего времени решались тремя основными способами. Прежде всего путем уменьшения геометрических размеров элементарного носителя информации (пита) и расстояний между соседними дорожками (треками) на информационно-несущем слое. Это возможно как с уменьшением длины волны источников излучения, используемых для записи и считывания информации, так и (или) с увеличением числовой апертуры NA оптической системы (как это сделано в стандартах DVD, Blu-Ray и т.д.).

Это было сделано в оптических дисках типа Blu-Ray (BD-диски). Минимальная длина метки записи в BD-дисках уменьшена до 0,16 мкм. Это позволило увеличить плотность записи более чем в 4 раза, доведя емкость однослойного диска до 25 Гб. Однако увеличение числовой апертуры, уменьшение толщины защитного слоя до 0,1 мм не позволяет использовать головки DVD, а оснащение приводов второй головкой и дорогим синим лазером приводит к увеличению стоимости записывающей оптической головки.

Как видно из табл. 1.1 и рис. 1.1–1.2, все эти стандарты объединяет только единство геометрического размера самих дисков (120 мм), используемые лазеры и микрообъективы различны. Вместе с тем хорошо известно, что в соответствии с критерием Рэля минимально допустимый размер  $D_{\min}$  сфокусированного пятна ограничивается дифракционным пределом, определяемым соотношением между длиной волны  $\lambda$  записывающего (считывающего) оптического излучения и числовой апертурой NA используемой оптической системы:

$$D_{\min} = 0,81 \lambda/NA. \quad (1)$$

Следовательно, площадь сфокусированного светового пятна может быть пропорциональна  $(\lambda/NA)^2$ . Таким образом, при традиционных оптических устройствах записи (считывания) информации для повышения информационной плотности и, соответственно, емкости оптических дисков стандартных размеров (диаметром 120 мм) необходимо уменьшать длину волны считывающего излучения и/или повышать величину числовой апертуры, как это сделано в BD-дисках (рис. 1.2).

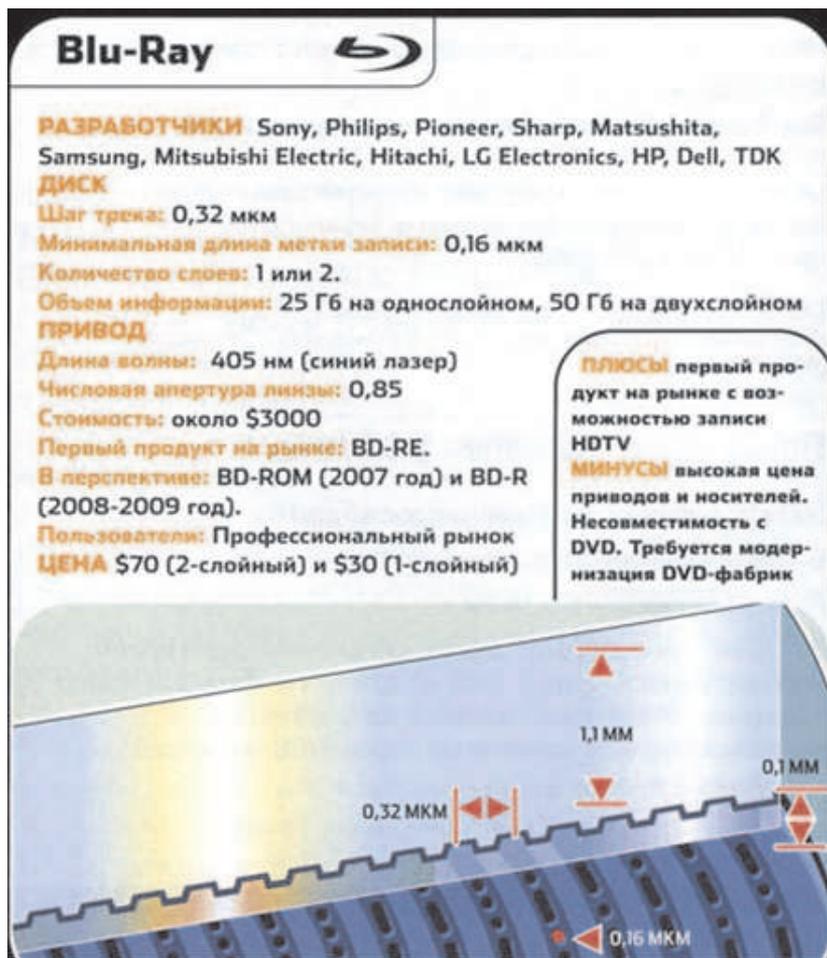


Рис. 1.2. Структура диска типа BD [50—51]

Однако использование высокоапертурных объективов повышает абберационные искажения (пропорционально  $\lambda/(NA)^4$ ), снижает надежность работы записывающей (считывающей) аппаратуры и в разы увеличивает их стоимость.

Для устранения отрицательного влияния этих искажений в системах однослойной оптической памяти с однолинзовыми объек-

тивами вводятся специальные статические или динамические (например, на основе жидкокристаллических пространственных модуляторов) корректоры.

Таким образом, поскольку вышеописанные типы оптических дисков регистрируют информацию на поверхности, предельная плотность записываемой информации ограничивается физическим дифракционным пределом и составляет приблизительно  $1 \text{ Гб/см}^2$ . В настоящее время наибольшее распространение получили BD-диски для видеосистем.

## **1.2. Многослойные оптические дисковые системы памяти типа 3D с фокусировкой лазерного излучения и побитовой записью в каждом отдельном слое**

Другим путем повышения информационной емкости оптических носителей побитовой записи и считывания информации является использование многослойных регистрирующих структур. Слои разделены воздушными промежутками и совмещаются путем склеивания. В этих системах запись и считывание информации осуществляется путем перефокусировки лазерного пучка на внутренние информационные слои, при этом ближний к пучку слой является полупрозрачным [12—13]. Разработаны следующие типы многослойных дисков.

### **1) Многослойные DVD-диски**

Имеются следующие варианты изготовления многослойных DVD-дисков:

- 1) односторонние однослойные с емкостью 4,7 ГБ;
- 2) односторонние двухслойные с емкостью 9,4 ГБ;
- 3) двухсторонние однослойные с емкостью 9,4 ГБ;
- 4) двухсторонние двухслойные с емкостью 17 ГБ.

Как видим, в традиционных (отражательных) системах, например ROM-типа, число таких информационно-несущих слоев очень ограничено. Это связано с тем, что интенсивность оптического пучка, считывающего некоторый  $i$ -й информационный

слой, уменьшается вследствие частичного поглощения и отражения в слоях, находящихся между этим слоем и источником считывающего излучения. Кроме того, имеющиеся локальные изменения показателя преломления в области расположения информационных пит и вне ее искажают волновой фронт когерентного лазерного считывающего излучения за счет случайных дифракционных и светорассеивающих эффектов. Это сказывается на точности его фокусировки в плоскости считываемого слоя. По этой причине современные традиционные носители информации имеют, как правило, не более четырех информационно-несущих слоев (по два на каждой из сторон).

При использовании алгоритма компрессии/декомпрессии данных MPEG-4 (Moving Picture Experts Group) на двухслойном одностороннем диске может быть записан более чем 4-часовой видеofilm самого высокого качества — 60 кадров/с, разрешение  $720 \times 480$  пикселей.

## 2) Многослойные флуоресцентные FMD-диски (рис. 1.3)

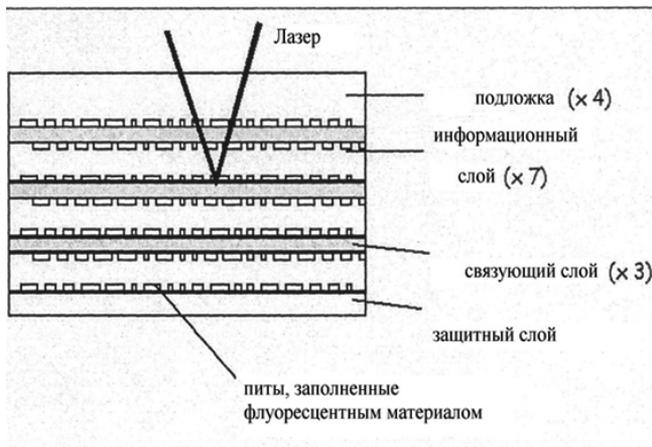


Рис. 1.3. Принципы записи на многослойные флуоресцентные FMD-диски [50—51]

Более всего идее практической реализации формирования и использования многослойных носителей информации отвечают так называемые флуоресцентные (люминесцентные) диски

(FMD — Fluorescent Multilayer Disk), в которых для записи и считывания информации также используются традиционные лазерные источники излучения или лазерные диоды.

Детектирующие элементы в устройстве считывания регистрируют интенсивность некогерентного вторичного (флуоресцентного) излучения, возбуждаемого считывающим лазером в области расположения информационно-несущих пит. Вследствие некогерентного характера вторичного излучения значительно снижается влияние искажающих вышеописанных факторов при его распространении в такой многослойной регистрирующей среде. По расчетам C3D Inc., общее число информационных слоев в ней теоретически может достигать 100 и более [1, 14–16]. Однако с учетом значительного усложнения конструкции записывающего (считывающего) устройства с ростом числа слоев реальное их число в настоящее время не превышает 10.

В общем случае флуоресцентный многослойный носитель информации может быть реализован как оптический диск, карта или лента. Структура такого диска информации ROM-типа описана в [17]. Информация в каждом из таких слоев формируется, например, как последовательность флуоресцирующих и нефлуоресцирующих микрообластей (ячеек). Флуоресцирующие ячейки (питы) толщиной от 0,3 до 0,8 мкм выполнены в виде полимерной матрицы с изотропно растворенными в нем органическими молекулами люминофора. Информационные слои (как представлено на рис. 1.3) разделены между собой прозрачными на длинах волн считывающего (лазерного) и считываемого (некогерентного, люминесцентного) излучений слоями толщиной от 10 до 100 мкм.

Когда флуоресцирующая ячейка (информационный пит), находящаяся в некотором  $i$ -м информационном слое, освещается сфокусированным считывающим излучением, молекулы люминофора генерируют флуоресцентное излучение, являющееся оптическим сигналом, считываемым детектирующим устройством. Детектирующее устройство, в свою очередь, содержит дополнительные элементы, препятствующие попаданию на фотоприемник паразитного флуоресцентного излучения от других (несчитываемых) информационных слоев. Например, таким элементом может быть конфокальная точечная диафрагма (a confocal pinhole), расположенная перед фотоприемником и пространственно блокирующая флуоресцентные сигналы от других слоев, находящихся вне фокуса.

При этом для достижения высокой скорости считывания информации необходима максимально возможная мощность информационно-несущего флуоресцентного сигнала. Однако, хотя разрабатываемые в настоящее время многослойные флуоресцентные носители ROM-типа позволяют существенно повысить информационную емкость оптической памяти, они имеют ряд существенных недостатков.

Прежде всего это связано с низким коэффициентом полезного использования интенсивности считывающего излучения. В традиционных оптических дисках пространственная геометрия отраженного от диска считываемого излучения практически тождественна пространственной геометрии падающего на диск считывающего излучения. Во флуоресцентных дисках геометрическая характеристика считываемого (флуоресцентного) излучения отлична от таковой характеристики сфокусированного считывающего (возбуждающего) излучения. Возбуждаемое (флуоресцентное) излучение распространяется практически изотропно во всех направлениях от возбужденного пита (ячейки). Следовательно, собираемое объективом флуоресцентное излучение составляет только небольшую часть всего флуоресцентного излучения. Более того, даже интегральная интенсивность флуоресцентного сигнала, как правило, существенно ниже интенсивности возбуждающего (считывающего) излучения. Это связано с тем, что квантовый выход люминесценции молекул люминофора, как правило, значительно ниже единицы, поскольку часть этого излучения теряется в результате безызлучательного переноса энергии возбуждающих квантов света. В случае изотропного пространственного распределения флуоресцирующих молекул в полимерной матрице информационного пита при считывании информации поглощать (и, следовательно, переизлучать) будут молекулы, преимущественно ориентированные параллельно вектору поляризации считывающего излучения, т.е. приблизительно третья часть от всего количества флуоресцентных молекул в пите. Таким образом, интенсивность считываемого флуоресцентного излучения будет приблизительно в три раза меньше максимально возможной.

Указанные недостатки приводят к значительному ослаблению интенсивности принимаемого информационно-несущего флуоресцентного сигнала, величина которого становится соизмеримой

с величиной «фонового» шумового сигнала от посторонних световых засветок и с величиной дробового шума приемного устройства, т.е. к снижению отношения сигнал/шум при считывании.

### 3) Многослойные VMD-диски (рис. 1.4)

К многослойным технологиям следует отнести также VMD-диск (Versatile Multilayer Disk — универсальный многослойный диск), впервые представленный на выставке СЕВИТ-2005, параметры которого показаны на рис. 1.4.



Рис. 1.4. Структура многослойного диска типа VMD [50—51]

Структура VMD полностью идентична структуре двухслойного DVD (совпадает даже шаг дорожек и размер меток записи), только за счет варьирования коэффициента отражения и пропускания

слоев количество слоев больше (например, продемонстрировано на выставке восемь). Это дает возможность выпускать их на том же оборудовании и при этом записывать на один диск информацию объемом до 100 Гб. Модернизация DVD-привода (добавление системы перефокусировки на более глубокие слои) позволяет их использовать в качестве VMD-привода.

В многослойных флуоресцентных носителях информации WORM-типа оптическое кодирование может осуществляться путем изменения локальной (попитовой) концентрации люминофора, или интенсивности, или энергии записывающего излучения, обеспечивающего возможность декодирования интенсивности флуоресцентных сигналов на стадии считывания.

Как отмечается исследователями, наиболее перспективным методом обеспечения оптического кодирования является поляризационное кодирование и декодирование информации с использованием так называемых фотоанизотропных материалов [18, 19].

### **1.3. Оптические дисковые системы памяти типа 3D с фокусировкой лазерного излучения и побитовой записью в каждой отдельной плоскости внутри толстой регистрирующей среды**

Увеличение плотности побитовой записи может быть достигнуто за счет использования всех трех пространственных измерений объема информационного слоя носителя. В настоящее время наибольший научный и практический интерес вызывает разработка оптических дисковых систем памяти типа 3D с фокусировкой лазерного излучения и побитовой записью в каждой отдельной плоскости внутри толстой регистрирующей среды [20, 21].

Здесь используются линейные однофотонные и нелинейные двухфотонные механизмы поглощения в специфических регистрирующих средах для записи/считывания информации, реализуемые в условиях нано-, пико- и фемтосекундного взаимодействия лазерного излучения с веществом.

При использовании метода двухфотонного поглощения, приводящего к фотоиндуцированному изменению свойств регистрирующей среды, механизмы которого представлены на рис. 1.5, возможна запись пита в виде дифракционной решетки (с числом полос до 6 штук) в очень ограниченном объеме среды толщиной  $\Delta z$  — области пересечения пучков: двух сфокусированных когерентных записывающих пучков  $I_2(\omega_2)$  и дополнительного также сфокусированного мощного пучка  $I_1(\omega_1)$ , как показано на рис. 1.6.

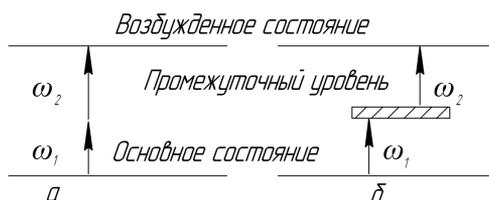


Рис. 1.5. Схема переходов при двухфотонном поглощении

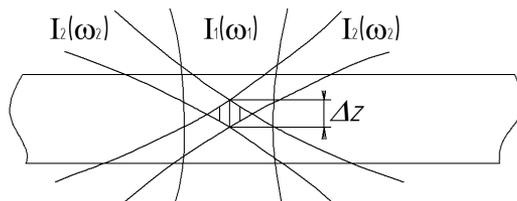


Рис. 1.6. Принцип формирования пита с помощью двух лазерных пучков при наличии двухфотонного поглощения регистрирующей среды

Вне этой области световые пучки распространяются без поглощения, поскольку среда для них прозрачна. Поэтому возможна запись очень большого количества слоев (от 10 до 100). Неразрушающее считывание необходимо проводить при пониженном уровне энергии, например при отключении пучка  $I_1(\omega_1)$ , либо по измерению интенсивности люминесцентного сигнала в информационном пите [22, 23].

Плотность записи информации поточечными методами ограничена размером элементов, несущих информацию. В силу приро-

ды света минимальный размер пятна фокусировки ограничен дифракционным пределом  $r = 0,61 \lambda/NA$  [24]. Теоретически показано, что пределом плотности при числовой апертуре  $NA = 1,4$  является величина порядка  $3,5 \text{ Тб/см}^3$  [25]. Поэтому особый интерес вызывают работы, демонстрирующие возможность преодоления дифракционного предела [26, 27]. Одним из достижений в этой области является технология двухлучевой оптической нанолитографии [27], позволившая с помощью записывающего и блокирующего лучей, а также специального полимерного материала записать элементы размером 9 нм и пространственным разрешением 52 нм.

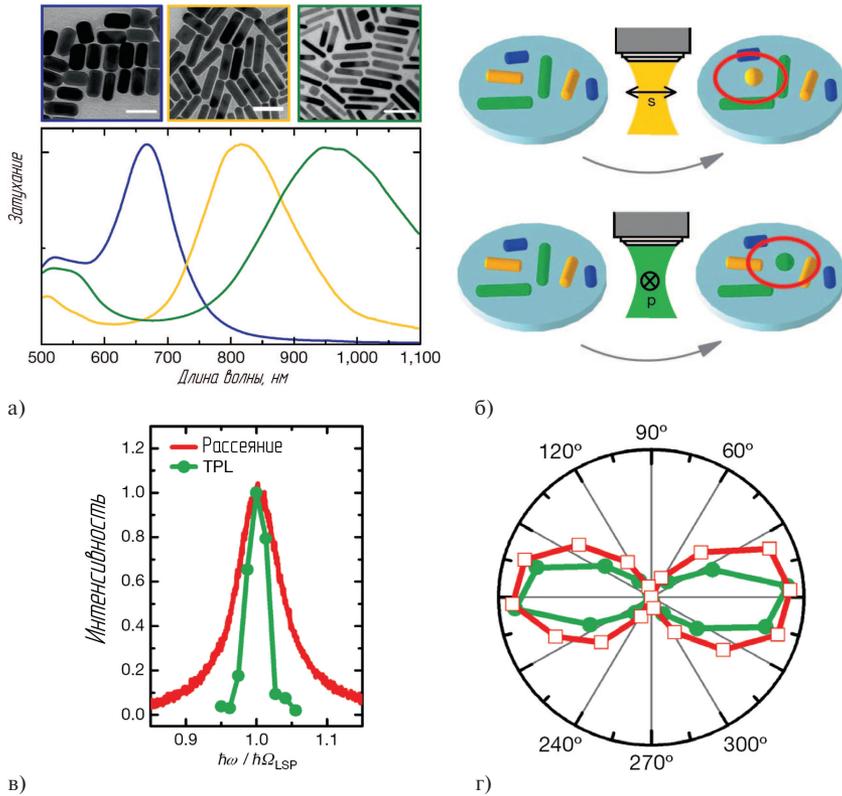
Наибольшую перспективу с процессами 2-, 3-, 4-фотонного поглощения для записи информации на оптические диски имеют так называемые фототерморефрактивные стекла, которые подробно рассматриваются в главе 3 данной книги. Для реализации подобных схем в настоящее время требуются габаритные, мощные и дорогостоящие лазеры с пико- и фемтосекундной длительностью импульсов.

Отметим также, что имеются регистрирующие среды на основе спектрального выжигания провалов (Spectral hole burning) [28—31]. Данные регистрирующие среды содержат в своем составе вещества с чрезвычайно селективным спектральным откликом. Для реализации такой памяти требуются лазеры с перестраиваемой частотой, которые, к сожалению, являются достаточно дорогостоящими и сложными по конструкции. Кроме того, для этих сред требуются криогенные температуры, что чрезвычайно усложняет конструкцию и повышает стоимость системы памяти на основе таких регистрирующих сред.

Системы оптической памяти, представленные ранее, основаны на принципе записи одного бита в каждый отдельный элемент поверхности или объема носителя информации. Эксплуатируя объем среды в трехмерном пространстве, достигают максимальной плотности побитовой записи. В настоящее время особый интерес вызывают возможности мультиплексирования и многоканальной записи информации в объеме вещества. Для осуществления многоканального мультиплексирования необходим материал, чувствительный не только к интенсивности записываемого пучка, но и к другим его параметрам, например к поляризации или длине волны. На настоящий момент показано, что такими материалами

могут быть многослойные среды на основе смеси структурированных металлических смесей [32–34]. В частности, установлено, что золотые наностержни с размерами порядка 10–100 нм обладают специфическим эффектом продольного поверхностного плазмонного резонанса (ППР), имеющего узкую резонансную полосу порядка 45–60 нм в ближнем ИК-диапазоне [32, 34–36]. Продемонстрировано, что в подобных наноструктурах максимально поглощают излучение те элементы, чьи пространственные ориентации совпадают с поляризацией записываемого пучка [34, 37], а форма соответствует сечению ППР, зависящего от длины волны [32, 34]. Так, в работе [34] представлен метод, объединяющий обе эти возможности (рис. 1.7). В частности, продемонстрирован оптический носитель, состоящий из многослойной структуры с информационными слоями из полимера толщиной порядка 1 мкм, разбавленного смесью золотых наностержней различного размера, расстояние между слоями заполнено прозрачным материалом шириной порядка 10 мкм. Разбавление наноструктурированной смеси в полимере происходит таким образом, чтобы в каждом слое исключить вращение стержней относительно плоскости слоя (все стержни должны находиться в плоскости, параллельной плоскости слоя), а также обеспечить равномерное распределение стержней по размерам и углам поворота в слоях для удовлетворения условия изотропии мультиплексирования. При записи данных лазерный луч определенной длины волны и поляризации фокусируется на выбранном элементе носителя (рис. 1.7, а, б). Если его мощность превышает пороговую (порядка 0,1 нДж), то происходит расплавление находящихся в этом элементе наностержней с соответствующей ориентацией и углом поворота, при котором они меняют форму, укорачиваются или становятся шаром.

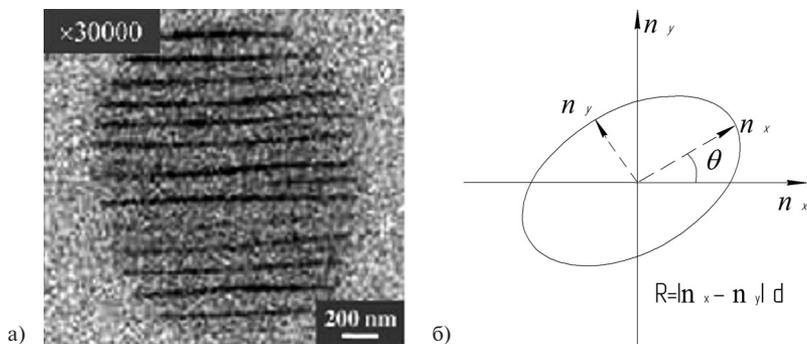
Для считывания информации могут быть использованы эффекты оптического рассеяния или поглощения. Однако для повышения селективности по длине волны и поляризации авторы использовали эффект двухфотонной люминесценции TPL (рис. 1.7, в, г). Для этого носитель с растром записанных элементов освещают пучками с той же длиной волны и поляризацией, что использовались при записи, а детектирование происходит в диапазоне длин волн вдвое короче, чем при записи. В работе продемонстрирована чувствительность метода к направлению поляризации записываемого и считываемого пучка в пределах 25 градусов. Экспериментально



**Рис. 1.7.** Принцип пятимерной оптической памяти на основе золотых нанопалочек: а) характеристика сечения ППР возбуждения для палочек размерами  $37 \times 19$  нм,  $50 \times 12$  нм и  $50 \times 8$  нм, соответствующих длинам волн 700 нм, 840 нм и 980 нм; б) при фокусировании лазерного пучка на элементе слоя носителя нагреваются и меняют форму только те наностержни, ориентация которых совпадает с поляризацией света, а размеры соответствуют сечению ППР; в) интенсивность рассеяния и двухфотонной люминесценции в зависимости от отстройки длины считывающей волны, нормированной на резонансную; г) интенсивность рассеяния и двухфотонной люминесценции в зависимости от направления поляризации считывающей волны

была продемонстрирована возможность мультиплексирования по трем длинам волн и двум взаимно-перпендикулярным состояниям поляризации. Приведенные оценки плотности записи демонстрируют возможность достижения плотности порядка 7,2 ТБ на носителе размером с DVD-диск.

Также рядом перспективных работ научных коллективов из Англии, Японии и России продемонстрирована возможность создания устройств пятимерной (5D) оптической памяти на основе стекла с использованием фемтосекундных лазерных импульсов высокой пиковой мощности [38–48]. Преимуществом в данном случае является дешевизна и одновременно высокая термо- и механическая стойкость материала носителя. В работе [38] впервые было показано, что в элементе объема кварцевого стекла при облучении серией сфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов ближнего ИК-диапазона с энергией каждого импульса порядка 1 мкДж образуются решетчатые структуры с периодом порядка 150 нм и размером порядка 1 мкм (рис. 1.8, а). Несмотря на то что на настоящий момент физика процесса до конца не ясна, показано, что образованные таким образом структуры вызывают появление эффекта анизотропного рассеяния лазерного излучения. В частности, уста-



**Рис. 1.8.** Принцип оптической 5D-памяти на основе кварцевого стекла: а) пример структуры, образующейся в кварцевом стекле при облучении серией порядка  $10^5$  лазерных фемтосекундных импульсов на длине волн 800 нм и энергией порядка 1 мкДж; б) кодирование информации по углу наклона медленной оси  $\theta$  и силе индуцированного двулучепреломления  $R$

новлено, что записанные структуры обладают двулучепреломляющим эффектом, сопоставимым по величине с эффектом двулучепреломления в кристаллическом кварце [43].

Два параметра предлагается использовать в качестве дополнительных измерений для кодирования информации: ориентацию медленной оси эллипса поляризации  $\theta$ , которая всегда перпендикулярна поляризации записывающего луча [43], и силу индуцированного фазового сдвига  $R$ , которая может изменяться путем варьирования интенсивности записывающего пучка [45]. Привлекательным преимуществом метода является возможность перезаписи информации путем переоблучения записанных элементов световым пучком с новым направлением поляризации [47]. Для считывания такой информации требуется использование специализированных устройств количественного анализа двулучепреломления, таких как, например, Abrio, CRi Inc. [49].

Разрабатываемые оптические дисковые системы памяти с побитовой записью и считыванием цифровой информации в объеме регистрирующей среды (3D, 4D, 5D и т.д.), в силу необходимости использования крайне сложной, габаритной и дорогостоящей аппаратуры, в настоящее время находятся в стадии разработки и представляют пока только чисто научный интерес.

В итоге можно представить (табл. 1.1) сравнительный анализ основных параметров оптических дисковых систем памяти 2D/3D с побитовой записью и считыванием цифровой информации.

**Таблица 1.1.** Сравнительные характеристики коммерческих оптических дисков

№ п/п	Параметр	CD	DVD	HD DVD	BD*
1	Емкость штампованного (ROM) однослойного диска, ГБ	0,68	4,7	15,00	23,30/25,00
2	Длина волны лазера, нм	780	650	405	405
3	Числовая апертура (NA)	0,45	0,60	0,65	0,85
4	Мощность луча при чтении, мВт	—	—	0,50	0,35

Таблица 1.1. (Окончание)

№ п/п	Параметр	CD	DVD	HD DVD	BD*
5	Минимальная длина пита (2 бита), нм	833—972	40—440	204 (15 ГБ)	160 (23,3 ГБ) 149 (25 ГБ) 138 (27 ГБ)
6	Расстояние между дорожками, нм	1600,0	740,0	400,0	320,0
7	Скорость передачи данных, Мб/с	1,47	11,08	36,50 (1X)	36,00 (1X) 72,00 (2X) 54,00 (video BD-ROM)

\* В настоящее время наибольшее распространение получили диски BD.

## Литература

1. Coufal H. and Burr G. W. Optical data storage, International Trends in Optics. — 2002.
2. G. Bouwhuis, J. Braat, A. Huijser, J. Pasman, G. van Rosmalen, and K. Schouhamer Immink, Philips Research Laboratories, Eindhoven, Adam Hilger Ltd., Bristol and Boston. — Оптические дисковые системы / Пер. В. Г. Цуканова, под ред. М. Ф. Стельмаха. — Москва: «Радио и связь». — 1991.
3. Ullman's Encyclopedia of industrial chemistry, sixth edition, Wiley-VCH, Reprint.
4. Taylor J. DVD Demystified, The Guidebook for DVD-Video and DVD-ROM, McGraw-Hill.
5. URL.: <http://www.ixbt.com/storage/cdr.shtml>.
6. Mansuripur M. The physical principles of Magneto-optical recording, Cambridge University Press. — 1995.
7. Nakai T. Effect of interface layers on phase-change recording material analyzed by X-ray photoelectron spectroscopy method / T. Nakai, M. Yoshiki, and N. Ohmachi // Jp. J. Appl. Phys., 46. — 2007. — 3968.
8. Lim S. K. Resolving nano scale recording bits on phase-change rewritable optical disk / S. K. Lim, P. Yang, I. C. Lin, H. W. Hsu, and D. P. Tsai // Jp. J. Appl. Phys., 45. — 2006. — 1431.
9. Ohta T., Yamamoto H. Phase-change optical disk and ultra short-pulse laser response for future advancement.

10. Kaneko M. Multilayered magneto-optical disks for magnetically induced super-resolution / M. Kaneko, K. Aratani, and M. Ohta // *Jp. J. Appl. Phys.*, 31. — 1992. — 568.
11. NSIC- OIDA Optical Disk Storage Roadmap. National Storage Industry Consortium and Optoelectronics Industry Development Association, San Diego. — 1997.
12. Snmioka J. A new data detection method for 35 Gbit/inch<sup>2</sup> multilevel recording using a blue laser and 0.85 numerical aperture optics / J. Snmioka, M. Yamamoto, Y. Miyaoka, K. Okamoto, and E. Fujii // *Jp. J. Appl. Phys.*, 45. — 2006. — 1050.
13. Shida N. Multilayer optical read-only memory disk applicable to blue-ray disc standard using a photopolymer sheet with a recording capacity of 100 GB / N. Shida, T. Higuchi, Y. Hosoda, H. Miyoschi, A. Naakano, and K. Tsuchiya // *Jp. J. Appl. Phys.*, 43. — 2004. — 4983.
14. Chen C.-W. Three-dimensional optical storage with photosensitive fluorescent material / C.-W. Chen, M. C. Li, W.-Y. Liao, and A. T. Hu // *Jp. J. Appl. Phys.*, 43. — 2004. — 4919.
15. Akselrod M. S. Multilayer recording and dynamic performance of volumetric two-photon — absorbing fluorescent Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> media // *Jp. J. Appl. Phys.*, 46. — 2007. — 3902.
16. Matsuyama T. and Kawata Y. Fabrication of fluorescent nanodot arrays on metal films for application in near-field optical media // *Jp. J. Appl. Phys.*, 45. — 2006. — 1438.
17. US 6,009,065, Optical pickup for 3-D data storage reading from the multilayer fluorescent optical disk / Glushko, Boris A., Levich, Eugene B. / G11B7/24; G11B7/004. — 12/28/1999.
18. Barada D. Polarization recording in photoinduced chiral material for optical storage / D. Barada, T. Fukuda, H. Simimura, J. Y. Kim, M. Itoh, and T. Yatagai // *Jp. J. Appl. Phys.*, 46. — 2007. — 3928.
19. Hagen R. and Bieringer T. *Adv. Mater.*, 13. — 2001. — 1805.
20. Рудаков И.Б. Метод послойной оптической записи информации / Рудаков И.Б., Штейнберг И.Ш., Щепеткин Ю.А. // *Автометрия*. — 1991. — № 3. — С. 76—80.
21. Штейнберг И.Ш., Щепеткин Ю.А. Особенности 3D оптической записи двоичной информации // *Автометрия*. — 1993. — № 3. — С. 89—95.
22. Shipway A. N. A new medium for two-photon volumetric data recording and playback / A. N. Shipway, M. Greenwald, N. Jaber, A. M. Litwak, and B. J. Reisman // *Jp. J. Appl. Phys.*, 45. — 2006. — 1229.
23. Shiono T. Design and fabrication of thin-film diarylethene recording layer and its reflective reproduction for super-multilayered optical memories / T. Shiono, T. Mihara, and Y. Kobayashi // *Jp. J. Appl. Phys.*, 45. — 3873.

24. Min Gu, *Advanced Optical Imaging Theory*, Springer Series in Optical Sciences. — 2000.
25. D. Day, and M. Gu, *Appl. Phys. Lett.*, 80. — 2002. — 2404.
26. Li, X., Cao, Y., Gu, M. Superresolution-focal-volume induced 3.0 Tbytes/disk capacity by focusing a radially polarized beam // *Opt. Lett.* 36 (13). — 2011. — 2510—2512, OSA.
27. Gan, Z., Cao, Y., Evans, R. a., Gu, M. Three-dimensional deep sub-diffraction optical beam lithography with 9 nm feature size // *Nat. Commun.* 4(May), 2061, Nature Publishing Group. — 2013.
28. Moerner W. E. Molecular electronics for frequency domain optical storage: persistent spectral hole-burning-a review // *J. of Molecular Electronics*, 1, 55. — 1985.
29. Moerner W. E. *Persistent spectral hole burning: Science and Applications*, Springer Verlag, New York. — 1988.
30. Mossberg T. W. Time-domain frequency-selective optical data storage, *Opt. Letters*, 7, 77. — 1982.
31. Maniloff E. S. Spectral data storage using rare-earth-doped crystals / E. S. Maniloff, A. E. Johnson, and T. W. Mossberg // *MRS Bulletin*, 46. — Sep. 1999.
32. Ditlbacher H., Lamprecht B., Leitner A., Aussenegg F. R. Spectrally coded optical data storage by metal nanoparticles // *Opt. Lett.* 25(8). — 2000. — P. 563—565. — OSA.
33. Royon A., Bourhis K., Bellec M., Papon G., Bousquet B., Deshayes Y., Cardinal T., Canioni L. Silver clusters embedded in glass as a perennial high capacity optical recording medium // *Adv. Mater.* 22(46). — 2010. — P. 5282— 5286, WILEY-VCH Verlag.
34. Zijlstra P., Chon J. W. M., Gu M. Five-dimensional optical recording mediated by surface plasmons in gold nanorods // *Nature* 459(7245). — 2009. — P. 410—413. — Nature Publishing Group.
35. Novo C. Contributions from radiation damping and surface scattering to the linewidth of the longitudinal plasmon band of gold nanorods: a single particle study // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 8. — 3540—3546 (2006).
36. Sönnichsen C. et al. Drastic reduction of plasmon damping in gold nanorods // *Phys. Rev. Lett.* 88. — 2002. — 077402.
37. Li X., Lan T.-H., Tien C.-H., Gu M. Three-dimensional orientation-unlimited polarization encryption by a single optically configured vectorial beam // *Nat. Commun.* 3, 998, Nature Publishing Group, a division of Macmillan Publishers Limited. All Rights Reserved. — 2012.
38. Shimotsuma Y; Kazansky PG; Qiu JR; Hirao K Self-organized nanogratings in glass irradiated by ultrashort light pulses // *Phys. Rev. Lett.* — 2003. — V. 91(24). — P. 247405.

39. Shimotsuma Y., Sakakura M., Kazansky P. G., Beresna M., Qiu J., Miura K., Hirao K. Ultrafast manipulation of self-assembled form birefringence in glass // *Adv. Mater.* 22. — 2010. — P. 4039—4043.
40. Zhang J., Gecevičius M., Beresna M., Kazansky P. G. Seemingly unlimited lifetime data storage in nanostructured glass // *Phys. Rev. Lett.* 112. — 2014.
41. Drevinskas R., Gecevičius M., Beresna M., Bellouard Y., Kazansky P. G. Tailored surface birefringence by femtosecond laser assisted wet etching // *Opt. Express* 23(2). — 2015. — 1428.
42. Lancry M., Poumellec B., Canning J., Cook K., Poulin J. C., Brisset F. Ultrafast nanoporous silica formation driven by femtosecond laser irradiation // *Laser Photonics Rev.* 7(6). — 2013. — P. 953—962.
43. Beresna M., Gecevičius M., Kazansky P. G. Polarization sensitive elements fabricated by femtosecond laser nanostructuring of glass [Invited] // *Opt. Mater. Express* 1 (4). — 2011. — P. 783—795, OSA.
44. Федотов С. С. Локальное двулучепреломление в стекле, наведенное фемтосекундным лазерным пучком / С. С. Федотов, С. В. Лотарев, А. С. Липатьев, П. Г. Казанский, В. Н. Сигаев // *Успехи в химии и химической технологии.* — Т. XXVIII. — 2014. — № 8.
45. Федотов С. С. Влияние параметров лазерного пучка на локальное двулучепреломление в кварцевом стекле / С. С. Федотов, С. В. Лотарев, А. С. Липатьев, И. С. Глебов, А. И. Курина, П. Г. Казанский, В. Н. Сигаев // *Успехи в химии и химической технологии.* — Т. XXIX. — 2015. — № 7.
46. Bricchi, E., Kazansky, P. G. Extraordinary stability of anisotropic femtosecond direct-written structures embedded in silica glass // *Appl. Phys. Lett.* 88 (11). — 2006. — 111113—111119, AIP.
47. Taylor R. S., Nnatovsky C., Simova E., Rajeev P. P., Rayner D. M., Corkum P. B. Femtosecond laser erasing and rewriting of self-organized planar nanocracks in fused silica glass // *Opt. Lett.* 32. — 2007. — 2888—2890.
48. Shiozawa M., Watanabe T., Tatsu E., Umeda M., Mine T., Shimotsuma Y., Sakakura M., Nakabayashi M., Miura K., et al. Simultaneous multi-bit recording in fused silica for permanent storage // *Jpn. J. Appl. Phys.* 52 (1). — 2013. — P. 1—4.
49. URL: <http://optics.org/products/P000001968>.
50. Лежнев А. В. HD по-русски: альтернатива дискам Blu-ray // *Популярная механика*, 2008, № 6. <https://www.popmech.ru>.
51. <http://www.fluorintec.ru>.

## **ГЛАВА 2**

# **ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ АРХИВНОЙ ПАМЯТИ ТИПА 3D С ЗАПИСЬЮ В ОБЪЕМЕ РЕГИСТРИРУЮЩЕЙ СРЕДЫ**

Системы ОГП в зависимости от типа голограмм (используемого объема регистрирующей среды) можно отнести в случае тонких голограмм к системам типа 2D, а в случае объемных голограмм — к системам типа 3D. Первые публикации, посвященные устройствам голографической памяти на плоском носителе, появились в 1967—1970 гг. Дальнейшее развитие ОГП основывалось на разработке и создании объемных голографических носителей.

В настоящее время за рубежом проводится комплекс теоретических и экспериментальных исследований по разработке сверхвысокоемкой трехмерной ОГП, реализуемой на новых физических принципах и наукоемких технологиях с применением новых поколений микро- и нанооптоэлектронных элементов и фотополимерных наноматериалов. Это приведет к созданию принципиально нового класса запоминающих оптико-электронных систем и приборных комплексов как гражданского, так и специального назначения.

### **2.1. Принципы построения систем оптико-голографической системы архивной памяти со страничной записью и считыванием информации**

Впервые идею возможности создания голографической (объемной) памяти в 1963 г. высказал Pieter van Heerden — сотрудник фирмы Polaroid [1]. Сигнальный пучок лазерного излучения, несущий

ший полезную информацию, представляет собой планарную решетку (страницу) пикселей, прозрачных или непрозрачных для падающего на них лазерного излучения. Сигнальный пучок в комбинации с опорным пучком формирует в объемной регистрирующей среде интерференционную картину. Главной особенностью такой трехмерной (3D) решетки является возможность восстановления записанной голографической информации при условии, что пучок считывающего (референтного) излучения по своей пространственной конфигурации тождествен опорному пучку, используемому при записи голограммы.

Для обычных объемных дифракционных решеток должно удовлетворяться условие Брэгга

$$\lambda = 2nT\sin\theta,$$

где  $\lambda$  — длина волны;  $n$  — показатель преломления среды;  $T$  — период решетки;  $\theta$  — угол между интерферирующими пучками при записи [2].

При соблюдении этого условия наблюдается максимальная интенсивность дифрагированного сигнала. Вследствие этого оказалось возможным в одном пространственно-локальном объеме (называемом книгой) фоточувствительной регистрирующей среды записать и независимо считать множество страниц информации. Действительно, небольшие (в пределах 0,007 град.) изменения ориентации считывающего излучения приводят к значительным искажениям или даже невозможности воспроизведения информационной страницы, записанной в объеме слоя. В то же время последнее обстоятельство позволяет записывать на одном участке голографического носителя несколько голограмм, используя разные углы падения опорного луча, что позволяет в принципе получать плотность записи информации на два порядка выше, чем, например, в DVD-системах [1].

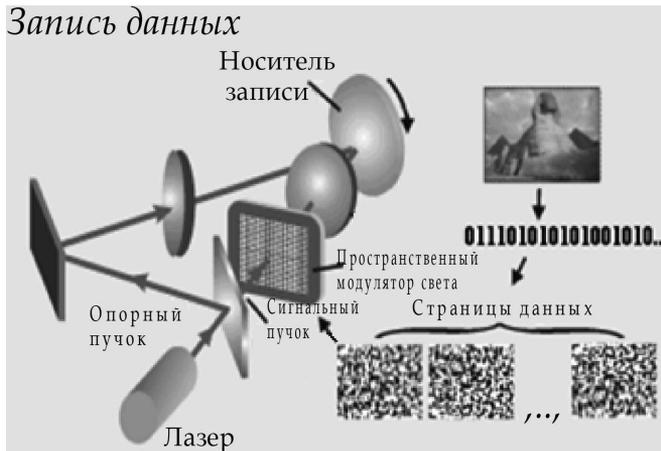
Оптико-голографическая память — это память, в которой биты закодированы с помощью лазера в фоточувствительном материале в виде трехмерной интерференционной картины, т.е. данные в носителе информации сохранены в виде голограммы. В отличие от CD и DVD, на которых данные записываются на поверхности носителя и считываются последовательно бит за битом, на голографических дисках с толстослойным светочувствительным носителем запись делается постранично с наложением

нескольких страниц данных на каждый участок носителя и восстановление производится в виде двухмерного изображения — страницы данных. При таком режиме возможно значительно увеличить объем хранимой информации и скорость ее выборки.

Большинство систем оптико-голографического хранения информации основано на одних и тех же концепциях. Системы ОГП состоят из двух подсистем, структуру которых можно рассматривать независимо друг от друга: подсистемы записи информации на носитель и подсистемы считывания информации с носителя. В их структуре можно выделить следующие основные компоненты:

- лазер, например аргоновый, генерирующий излучение в синезеленой области спектра;
- устройство для разделения (beam splitter) и совмещения лазерных пучков;
- зеркальные системы для их взаимной пространственной ориентации;
- ПМС (Spatial Light Modulator — SLM), например жидкокристаллический дисплей (Liquid Crystal Display — LCD);
- систему формирования лазерных пучков;
- фоточувствительные регистрирующие среды типа кристаллов ниобата лития или фотополимеров;
- матричный приемник излучения.

Оптическая схема устройства записи информации на голографический диск представлена на рис. 2.1 [2]. Лазерный пучок разделяется на два пучка: сигнальный, который несет полезную информацию, и опорный, выполняющий служебные функции, в частности, обеспечивающий формирование интерференционной структуры в месте расположения светочувствительного слоя. Кодирование данных в сигнальном пучке осуществляется с помощью ПМС, который преобразует данные из двоичного кода, состоящего из нулей и единиц, в оптическую матрицу светлых и темных пикселей, напоминающую шахматную доску. Данные объединены в массивы или страницы с объемом, приблизительно равным 1 млн бит, точное число которых определяется типом ПМС. В месте пересечения опорного и сигнального пучков формируется интерференционная картина, регистрируемая в фоточувствительном слое носителя информации: в соответствии с распределением интенсивности светового поля происходит фотохимическая или



**Рис. 2.1.** Функциональная оптическая схема устройства для записи цифровой информации на голограмму

фотофизическая реакция с изотропным или анизотропным изменением показателя преломления и (или) поглощения, в результате чего и осуществляется запись голограммы. Таким образом, в объемной фоточувствительной среде можно записать множество голограмм с различными, например, углами между сигнальными и опорными пучками.

Оптическая схема устройства считывания записанной информации показана на рис. 2.2. При освещении опорным пучком такого трехмерного голографического носителя информации с множеством зарегистрированных голограмм он дифрагирует на той интерференционной картине (голограмме), которая формировалась опорным пучком, совпадающим по своим характеристикам с пучком, используемым при считывании. В результате на выходе формируется реконструированный предметный пучок с ранее записанной информацией, которая проецируется на матрицу датчиков, преобразующих световые сигналы в серию электрических сигналов.

В использовании параллельной записи и считывания также кроется и секрет высокой скорости передачи данных.

Регистрирующая среда голографического оптического диска (или карты) представляет собой слой фоточувствительного мате-

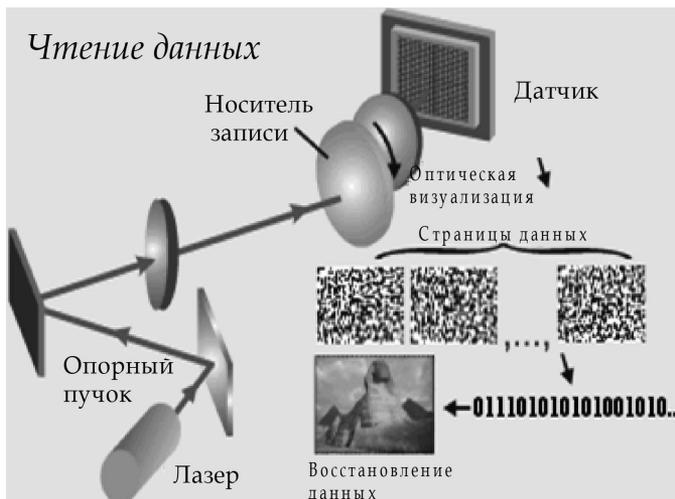


Рис. 2.2. Функциональная оптическая схема устройства считывания цифровой информации с голограмм

риала толщиной порядка от 1 до 2 мм, заключенный между двумя прозрачными подложками. Поверхность диска разбита на участки («книги»), на каждый из которых методом наложения записывается приблизительно 1000 информационных страниц (голограмм емкостью 1 Мб каждая). Диск содержит порядка 1500 «книг». В книге каждая страница-голограмма записывается с индивидуальными опорными пучками, различающимися своими характеристиками, например своими углами падения.

«Книги» регистрируются последовательно одна за другой, причем каждая страница (голограмма) распределяется по определенному объему (объему «книги») регистрирующей среды. Большая толщина регистрирующего слоя с высокой мультиплексностью записи и считывания обусловлена необходимостью формировать в нем трехмерную (брэгговскую) голограмму [2] с высокой селективностью к характеристикам считывающего излучения (углу падения на регистрирующую среду, длине волны, структуре волнового поля и т.д.). Мультиплексная запись и считывание информации в системах ОГП позволяют эффективнее использовать их преимущества.

Принципиальные схемы систем оптической памяти достаточно просты, однако для их реализации потребовались многие годы, поскольку отсутствовали необходимые коммерчески пригодные для их производства светочувствительные материалы, малогабаритные, надежные и дешевые источники когерентного лазерного излучения и отдельные оптические элементы и узлы для устройств записи/считывания, а также не было соответствующей голографической мультиплексной стратегии.

В настоящее время это стало возможным благодаря созданию качественных светочувствительных материалов, компактных и высокомошных источников лазерного излучения, ПМС, низкоабберационной коллимирующей оптики и систем регистрации восстановленной с голограммы информации.

Другой сложностью, возникшей на пути создания устройств голографической памяти, стал поиск подходящего материала для носителя информации. Свойства различных типов светочувствительных материалов, используемых в оптико-голографических системах архивной памяти, описываются в главе 3.

Для формирования интерференционной картины в компактных устройствах голографической памяти требуются малогабаритные источники высококогерентного лазерного излучения, имеющие довольно высокую мощность генерации. Действительно, для реализации голографической памяти непригодны лазерные диоды на базе полупроводниковых лазеров, применяемые в традиционных оптических устройствах, поскольку они обладают недостаточной когерентностью и мощностью, создают пучок с высокой расходимостью; кроме того, полупроводниковый лазер, генерирующий высококогерентное излучение в ближнем и среднем диапазонах видимой области спектра, изготовить очень сложно. Необходим мощный лазер, позволяющий создать параллельный пучок.

Разработанные для медицины, кабельного TV и печатной индустрии зеленые Nd:YAG-лазеры с удвоением частоты и диодной накачкой оказались весьма привлекательными применительно к регистрации голографической информации вследствие их малых размеров, слабой зависимости от внешних воздействий и низкой стоимости. Появились также недорогие полупроводниковые лазеры с высокими характеристиками.

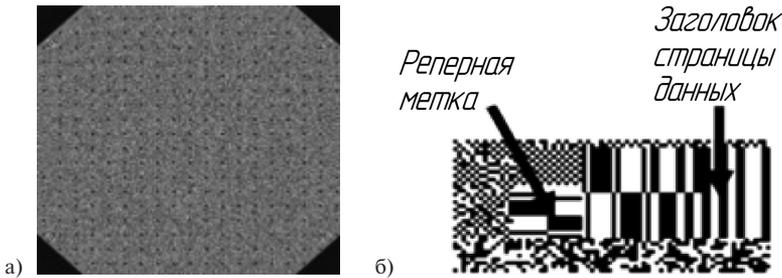
То же самое можно сказать и о пространственных световых модуляторах и матричных фотодетекторах: до недавнего времени

не было ни одного подобного устройства, которое можно было бы применять в системах голографической памяти. В настоящее время развиваются устройства на основе микроэлектромеханической технологии (Micro-Electrical Mechanical — МЕМ). Так, цифровые микрозеркальные устройства (digital micromirror devices), появившиеся в новых типах дисплеев, представляют собой массивы микрозеркал размером порядка 17 микрон и являются идеальными ПМС с большим числом информационных элементов — пикселей (примерно 1 млн), с высокой скоростью смены картинок (2000 Гц) и высоким оптическим контрастом. Эту же роль могут выполнить ПМС на основе технологии, применяемой при изготовлении LCD-экранов для различных устройств. Эти ключевые компоненты стали доступны, так как цены на них значительно снизились.

### **2.1.1. Страничное представление и кодирование цифровой информации для систем голографической памяти**

Для записи цифровой информации на голограмму необходимо данные представить в виде двухмерного распределения интенсивности — кодированной цифровой страницы данных (КЦСД). Кроме того, КЦСД должна содержать технические элементы — реперные точки, используемые для наведения устройства считывания. В данном параграфе продемонстрированы основные методы представления КЦСД в известных системах ОГП.

В ряде работ предлагается в качестве алгоритма составления КЦСД использовать прямое преобразование битов информации в пиксели страницы данных, которое заключается в изображении «0» черными пикселями, а «1» — белыми (рис. 2.3). Недостатком такого представления является тот факт, что суммарная амплитуда всех пикселей и, соответственно, нулевой порядок пространственного фурье-спектра страницы данных определяются составом записываемой цифровой информации. Это обстоятельство приводит к тому, что формируемые голограммы могут иметь различную дифракционную эффективность. Также подобное представление страницы данных приводит к слиянию рядом стоящих элементов



**Рис. 2.3.** Представление страницы данных InPhase [3]: а) общий вид страницы данных; б) увеличенные технические элементы — бар-код и синхрометка

в непрерывные полосы и линии, что является причиной проблем при считывании и декодировании информации.

Одним из перспективных и наиболее востребованных методов представления КЦСД в системах ОГП является стандарт, разработанный компанией OPTWARE в 2007 г. и получивший название ЕСМА-378 [4]. В соответствии с этим стандартом цифровая информация делится на блоки по 8 бит (1 байт), которым в соответствие ставится 16-битный блок. Байты кодируются положением 3 пикселей «1» (пиксели «1» имеют максимальную яркость, пиксели «0» — нулевую яркость) внутри квадратной площадки размером  $4 \times 4$  пикселя (рис. 2.4).

В стандарте ЕСМА-378 приведен словарь соответствия символов байтам. Символы объединяются в субстраницы, которые формируют страницу данных с реперной точкой в левом верхнем углу (рис. 2.5).

Как можно видеть из описания стандартов и рис. 2.3—2.5, стандарт ЕСМА-378 предназначен для кодировки информации классических двухмерных голограмм. Кодировка битов в нем осуществляется так, чтобы символы «1» не сливались в сплошные линии по горизонтали, вертикали и диагонали. Данный подход обеспечивает одинаковое распределение интенсивности восстановленного изображения с информацией для двухмерного случая и способствует выравниванию дифракционной эффективности записываемых голограмм. Также стоит упомянуть о более компактных методах представления, основанных на стандартах

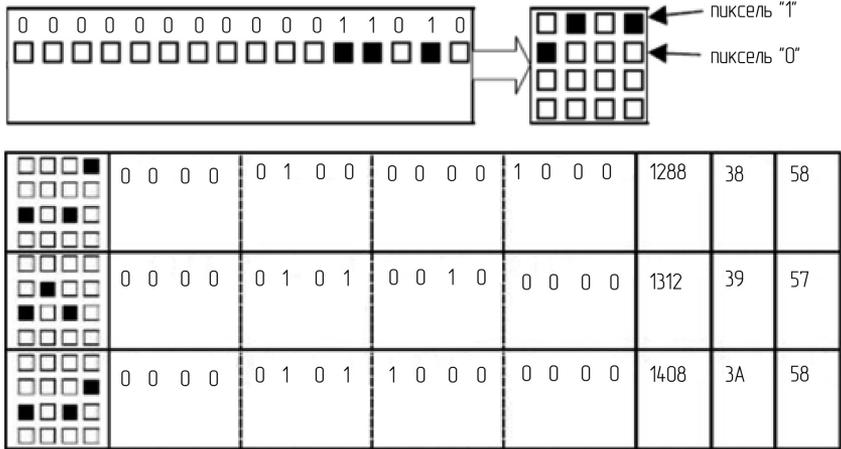


Рис. 2.4. Субстраница стандарта ЕСМА-377 и фрагмент словаря кодировки байтов

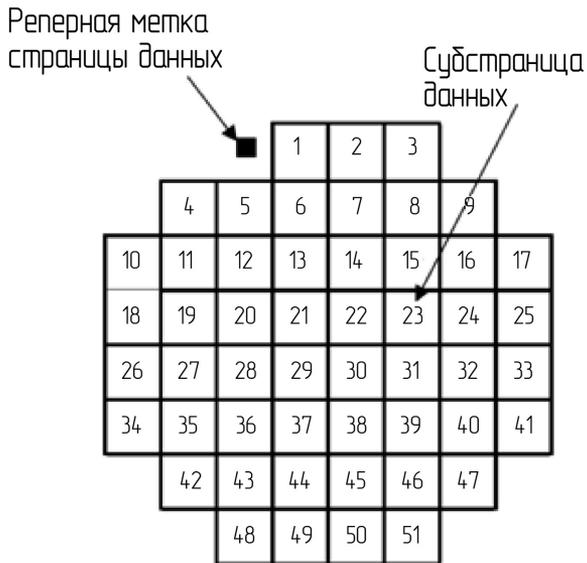


Рис. 2.5. Страница данных в стандарте ЕСМА-378

ЕСМА-377, 378, при которых блоки страницы данных состоят из 9 пикселей с тремя яркими элементами (заполнение 3:9) или из четырех пикселей с двумя яркими элементами (заполнение 2:4).

Форматы ЕСМА-377, 378 представляют байты в виде двухмерных блоков. Однако в ряде случаев, как, например, в случае записи одномерных голограмм Фурье, целесообразно составлять страницу данных из блоков  $1 \times 16$ , представляющих один байт информации вдоль строки КЦСД. При этом возможно считывать данные как в постраничном, так и в построчном режиме (рис. 2.6).

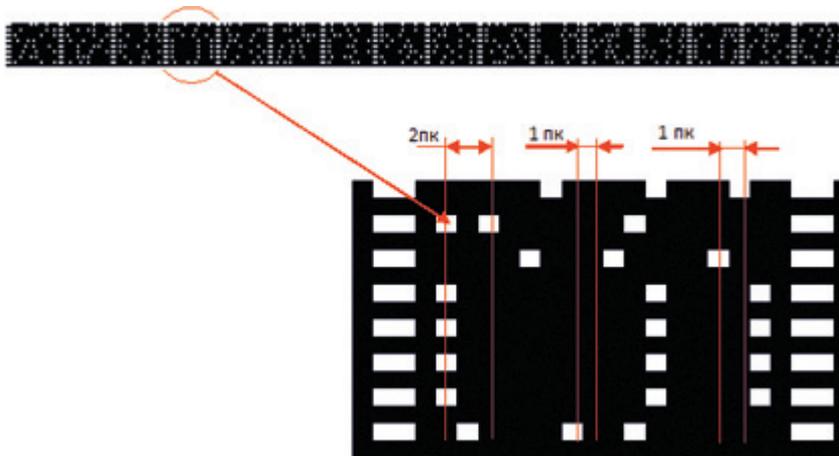


Рис. 2.6. Фрагмент страницы данных для записи одномерной голограммы Фурье

## 2.2. Оптические схемы записи страничной цифровой информации в виде одиночных микроголограмм Фурье

К оптическим схемам, применяющимся для регистрации и восстановления голограмм в системах ОГП, предъявляют следующие требования [5]:

- 1) максимальное отношение числа битов цифровой информации к размеру хранящей ее микроголограммы;
- 2) максимальная площадь заполнения микроголограммами зоны записи информации на носителе;
- 3) максимальная равномерность распределения энергии по объектному пучку;
- 4) минимально жесткие допуски на позиционирование носителя при восстановлении информации и на нестационарность характеристик компонентов системы считывания информации.

Первое требование следует из задачи получения максимально емкого носителя записанной информации. Число битов информации, которые могут быть помещены на одной странице памяти, сверху ограничено числом пикселей современных ПМС, поэтому при заданном ПМС это требование сводится к получению голограммы минимального размера и высокого качества, при котором восстановление информации с голограммы возможно с требуемым отношением сигнал/шум.

Второе требование также следует из задачи получения максимально емкого носителя и влияет в основном на выбор метода мультиплексирования голограмм (записи нескольких голограмм на одном и том же участке носителя информации).

Требование равномерности распределения энергии обусловлено необходимостью обеспечения одинаковых параметров дифракционной эффективности и отношения сигнал/шум в восстанавливаемых страницах данных для каждой микроголограммы, зарегистрированной на носителе. При неравномерном распределении энергии по объему голограмм при мультиплексировании происходят локальные выходы экспозиционной кривой регистрирующего материала из линейного диапазона, что отражает нестабильность указанных параметров микроголограмм. Названное требование вынуждает идти на компромисс между стремлением получить голограмму минимального размера и использованием в оптической схеме системы записи информации на носитель элементов, выравнивающих распределение энергии в микроголограмме, но вызывающих увеличение ее размера.

Последнее требование обусловлено условиями практической реализации и использования систем ОГП. Фоточувствительные материалы, применяемые для регистрации голограмм, характери-

зуются объемной и линейной усадкой, остаточной фоточувствительностью, старением, вызывающим дополнительное светорассеяние, что усложняет их использование в системах ОГП. Оптические схемы систем записи информации на носитель должны компенсировать или снижать влияние этих свойств материалов на процесс хранения и считывания информации, а оптические схемы восстановления изображений страниц данных с носителей — обеспечивать коррекцию параметров в зависимости от изменений характеристик носителя голограмм, а также элементов оптической схемы.

### 2.2.1. Безлинзовая оптическая схема записи микроголограмм Фурье без диффузора

Безлинзовая схема регистрации голограммы представлена на рис. 2.7. В этой схеме ПМС, расположенный в плоскости  $P_1$  и имеющий пропускание  $\tau(\xi, \eta)$ , освещается волной с плоским фронтом. На некотором расстоянии  $z_2$  от модулятора в плоскости  $P_2$  располагается регистрирующая среда. В качестве опорного пучка

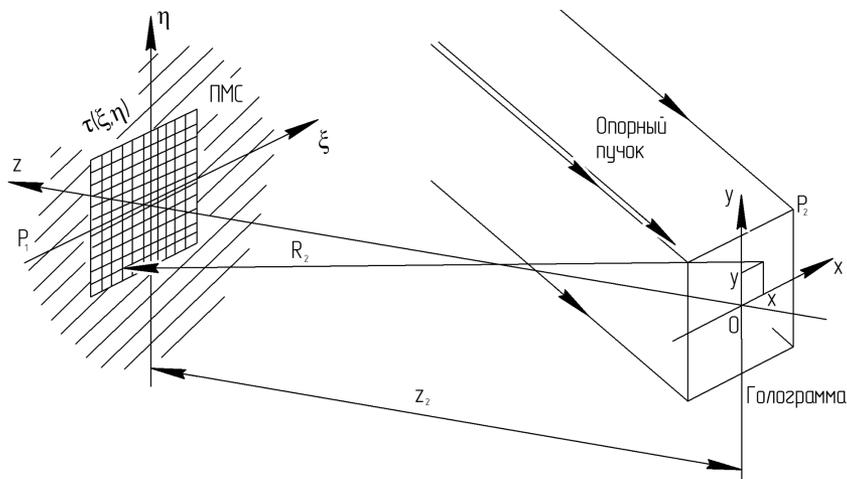


Рис. 2.7. Безлинзовая оптическая схема записи микроголограмм Фурье без диффузора

в зависимости от выбранного метода мультиплексирования голограмм можно использовать плоский, сферический пучок или пучок со сложным фазовым распределением.

Параметры безлинзовой схемы записи голограммы с различными освещающими объект пучками и линзовой схемой записи голограммы анализируем, используя геометрические соотношения однолинзовой схемы [6], представленной на рис. 2.8. В соответствии с правилом знаков величины  $l, \bar{l}, u, \bar{u}$  и  $s$  считаются отрицательными, остальные указанные на рисунке величины — положительными. Объект размером  $2\eta$  расположен в плоскости объекта на расстоянии  $l$  от объектива с фокусным расстоянием  $F$  (на рисунке оно не показано). Подсвечивающая объект волна распространяется из точки, лежащей на оптической оси объектива на расстоянии  $\bar{l}$  от него. Изображение источника формируется объективом в частотной плоскости на расстоянии  $\bar{l}'$ . Изображение объекта расположено в плоскости на расстоянии  $l'$  от объектива.

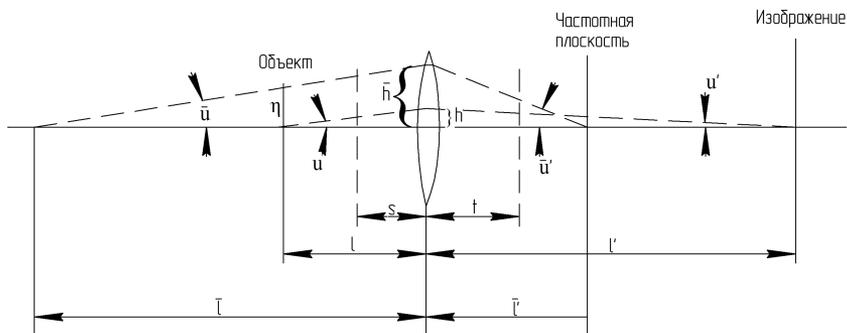


Рис. 2.8. Геометрические параметры однолинзовой оптической схемы записи микроголограммы Фурье

Связь между передним и задним апертурными углами  $\bar{u}$ ,  $u'$ , а также максимальным углом дифракции на объекте  $u$  и углом  $u'$  задается выражениями

$$\begin{cases} \bar{u}' - \bar{u} = \bar{h} / F \\ u' - u = h / F, \end{cases}$$

где  $\bar{h}$  и  $h$  — высота соответствующих лучей на линзе (см. рис. 2.8).

Ширина полосы пространственных частот объекта  $\phi$  определяется выражением [4]

$$\phi = 2\eta\nu_{\max},$$

где  $\nu_{\max}$  — максимальная пространственная частота в объекте.

При фиксированном размере объекта ( $2\eta$ ) полоса пространственных частот определяется числом пикселей (информационной емкостью), а точнее, размером одного пикселя — дискретным элементом модулятора.

Рассмотрим *плоскую* волну, подсвечивающую транспарант ( $\bar{u} = 0$ ). Примем  $l = -F$ , т.е. объект расположен в передней фокальной плоскости объектива.

Для того чтобы объектив пропустил все излучение с длиной волны  $\lambda$ , модулированное объектом, его относительное отверстие  $A$  должно быть равно

$$A = 2(|h| + |\bar{h}|)/F. \quad (2.1)$$

Для рассматриваемого случая  $\bar{u} = 0$ ,  $\bar{h} = \eta$  и  $h = -ul = \lambda\nu_{\max}F$ . Тогда, поскольку  $h > 0$  и  $\bar{h} > 0$ , выражение (2.1) можно преобразовать:

$$A = (2\lambda\nu_{\max}F + 2\eta)/F = A_t + A_0. \quad (2.2)$$

Видно, что в выражении (2.2) относительное отверстие  $A$  разбито на два слагаемых  $A_t = 2\lambda\nu_{\max}$  и  $A_0 = 2\eta/F$ , где первое слагаемое зависит от максимальной пространственной частоты в объекте и увеличивает второе слагаемое, определяемое традиционно параметрами схемы.

Умножив выражение (2.2) на  $\eta$  и выразив из него  $\phi = 2\eta\nu_{\max}$ , получим

$$\phi = \frac{-1}{2\lambda} (4\eta^2/F - 2A\eta). \quad (2.3)$$

Используя выражение (2.3), можно найти, при каком относительном отверстии объектива  $A$  ширина полосы пространственных частот объекта будет максимальной:

$$\frac{\partial\phi}{\partial\eta} = \frac{-1}{2\lambda} (8\eta/F - 2A) = 0 \rightarrow A = 4\eta/F; \phi_{\max} = A_0\eta/\lambda.$$

Определим плоскость с максимальной плотностью записи информации  $\rho = \frac{\phi}{D_{\min}}$ , где  $D_{\min}$  — минимальный диаметр отверстия,

через которое проходят все лучи от объекта. Размер  $D_{\min}$  определим в пространстве до объектива (*безлинзовая схема записи*). Положение рассматриваемой плоскости задается переменной  $s$ . Зависимость  $D_{\min}(s)$  описывается формулой

$$D_{\min}(s) = 2(-u - \bar{u})(-l + s) + 2\eta = 2(\lambda v_{\max} - \bar{u})(-l + s) + 2\eta. \quad (2.4)$$

Из формулы (2.4) следует, что в случае плоской подсвечивающей волны ( $\bar{u} = 0$ ) минимальное значение  $D_{\min} = 2\eta$  достигается при  $s = l$ , т.е. при регистрации голограммы в плоскости объекта.

Рассмотрим возможность получения меньшего значения  $D_{\min}$  в плоскости за объективом. Положение этой плоскости будем задавать расстоянием  $t$  (см. рис. 2.8). Высота лучей в рассматриваемой плоскости

$$\begin{cases} h_t = h - tu' \\ \bar{h}_t = \bar{h} - t\bar{u}' \end{cases}$$

Значение  $D_{\min} = 2(|h_t| + |\bar{h}_t|)$ , но, поскольку при  $0 \leq t \leq \bar{l}'$ ,  $h_t > 0$  и  $\bar{h}_t > 0$ , имеем

$$\begin{aligned} D_{\min} &= 2(|h_t| + |\bar{h}_t|) = 2(h - tu' + \bar{h} - t\bar{u}') = \\ &= -2\lambda v_{\max} l + 2\lambda v_{\max} t(1 + l/F) + \phi/v_{\max}(1 - t/F). \end{aligned} \quad (2.5)$$

Тогда плотность записи информации

$$\rho = \frac{\phi}{D_{\min}} = \frac{v_{\max}}{1 - \frac{t}{F}} \left[ 1 + \frac{2\lambda v_{\max} l}{D_{\min}} - \frac{2\lambda v_{\max} t(1 + l/F)}{D_{\min}} \right]. \quad (2.6)$$

Приравняем производную по  $t$  к нулю и выразим  $D_{\min}$ :

$$D_{\min} = 2\lambda v_{\max} F. \quad (2.7)$$

Подставив (2.7) в (2.5) и выразив расстояние  $t$ , получим  $t = F$ , т.е. минимальный размер голограммы наблюдается в задней фокальной плоскости объектива. При плоской подсвечивающей волне положение изображения не зависит от расстояния до объекта  $l$ .

Плотность записи информации в объектном пучке в этой плоскости  $\rho = \frac{\eta}{\lambda F} = \frac{A_0}{2\lambda}$  может быть увеличена при использовании

излучения с меньшей длиной волны и объектива с максимально возможным относительным отверстием  $A_0$ .

При  $l' \leq t \leq l$ ,  $\bar{h}_t < 0$ , но, поскольку в формулу для  $D_{\min}$  (2.5) высота  $\bar{h}_t$  входит под модулем, выражение (2.6) остается справедливым и для этого диапазона значений  $t$ .

Таким образом, максимальная плотность записи информации в объектной волне при плоском волновом фронте подсвечивающей объект волны достигается в задней фокальной плоскости объектива, а точнее, в частотной плоскости, которая при таком типе подсветки совпадает с задней фокальной плоскостью объектива.

При использовании *расходящейся* волны ( $\bar{u} < 0$ ) в пространстве объекта (до объектива) увеличивается значение  $D_{\min}$  по (2.4) и, следовательно, снижается плотность записи информации  $\rho$ . В пространстве предметов (после объектива) это приводит к сдвигу частотной плоскости из задней фокальной плоскости объектива в сторону плоскости изображения, что обуславливает рост параметра  $|\bar{h}_t|$  в (2.5) и вызывает увеличение диаметра  $D_{\min}$  в любой плоскости в пространстве предметов. Таким образом, использование расходящейся подсвечивающей объект волны не вызывает увеличения плотности записи информации в объектном пучке ни в одной плоскости.

При использовании *сходящейся* волны ( $\bar{u} > 0$ ) частотная плоскость сместится в сторону объектива и будет приближаться к нему с увеличением угла  $\bar{u}$ . При  $\bar{u} = 2\eta/F$  частотная плоскость совмес-

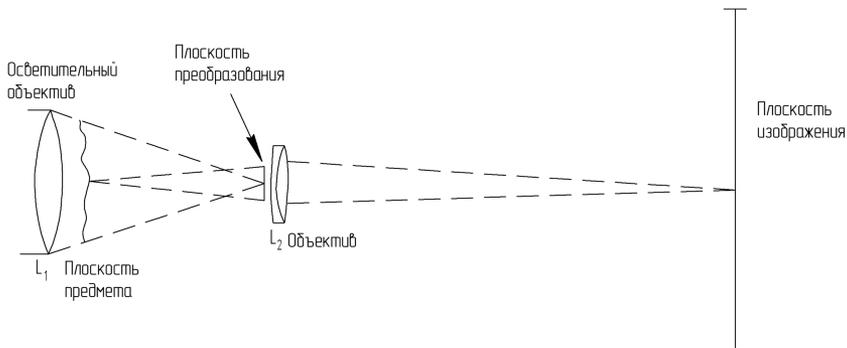


Рис. 2.9. Схема расположения компонентов при подсветке объекта сходящейся волной

тится с объективом и значение  $\bar{h}$  станет равно нулю (рис. 2.9). При этом плотность записи информации в объектной волне не изменится по сравнению с таковой в схеме с плоской волной. Максимальная плотность записи информации  $\rho$ , б/мм, будет достигнута в частотной плоскости:

$$\rho = \frac{\eta}{\lambda F} = \frac{A_0}{2\lambda}. \quad (2.8)$$

Несмотря на отсутствие преимуществ по плотности информации в объектном пучке, схема со сходящейся волной позволяет снизить требования к характеристикам и качеству объектива, поскольку фактически они разделяются между двумя объективами  $L_1$  и  $L_2$ . При этом объектив  $L_1$  должен иметь максимально большое относительное отверстие, но быть скорректированным лишь на сферическую aberrацию. Объектив  $L_2$  может иметь фокус, требуемый для сопряжения масштабов изображения и размеров фотоприемника, а его модуляционно-передаточная функция должна перекрывать только диапазон пространственных частот, необходимый для обеспечения требуемого разрешения в восстановленном изображении.

Таким образом, безлинзовая схема регистрации без применения диффузора по плотности записи информации всегда проигрывает схеме с регистрацией голограммы в задней фокальной плоскости линзы — голограммы Фурье.

### 2.2.2. Безлинзовая оптическая схема записи микроголограмм Фурье с диффузором

Установка диффузора в пучок, подсвечивающий ПМС, равносильна освещению его множеством точечных источников. Интенсивность этих источников может считаться одинаковой, а начальные фазы волн от них — разными. Это приводит к тому, что дифракционные картины от каждого источника в значительной степени перекрываются. При этом информация о каждой точке объекта равномерно распределяется по площади интерференции объектной волны с опорным пучком. Таким образом, каждая точка голограммы содержит информацию о всех точках ПМС, т.е. можно предположить, что в данном случае на регистрирующей среде можно вы-

делить малый участок, в котором регистрируется вся информации об объекте, и его размеры будут меньше, чем размеры голограммы Фурье того же объекта при использовании реальных объективов.

Теоретический анализ влияния размеров области регистрации голограмм на параметры схем записи и восстановления, подтвержденный экспериментально, показал, что размер голограммы в данном случае влияет на размер спеклов в восстановленном изображении. Это можно рассматривать как изменение отношения сигнал/шум в изображении.

Предположим, что каждая точка  $(u, v)$  диффузора (рис. 2.10) излучает свет и находится на расстоянии  $(\Delta u, \Delta v)$  от другой точки. Объект с функцией пропускания  $P(x, y)$  расположен на расстоянии  $z$  от диффузора. Голограмма регистрируется на расстоянии  $f$  от объекта в плоскости  $(\xi, \eta)$ . Объект представляет собой прозрачный прямоугольник размером  $2x_0 \times 2y_0$  (см. рис. 2.10). Размеры голограммы  $2\xi_0 \times 2\eta_0$ . Действительное изображение восстанавливается в плоскости  $(x', y')$ , расположенной на расстоянии  $f$  от голограммы.

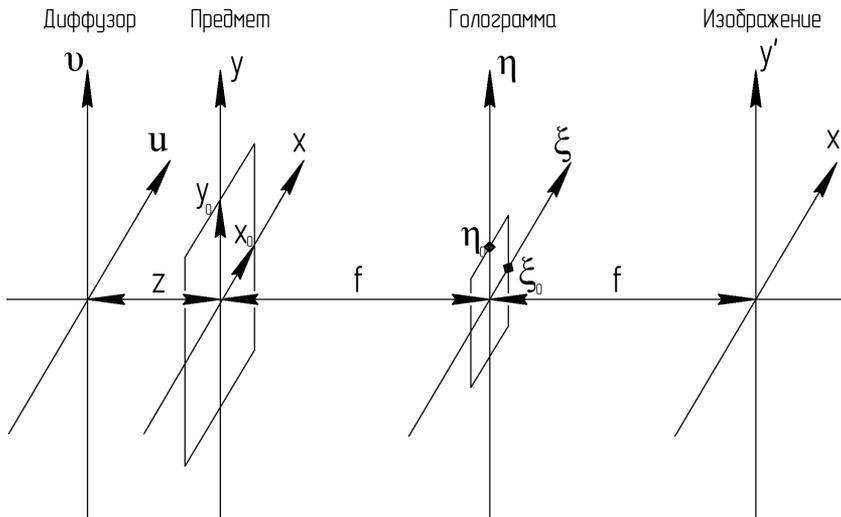


Рис. 2.10. Схема для расчета отношения сигнал/шум в восстановленном с голограммы изображении в безлинзовой схеме с диффузором

В случае единичной мощности освещающего пучка среднюю интенсивность  $\bar{I}$  в восстановленном изображении объекта, представляющем собой прямоугольник ( $2X \times 2Y$ ) минимального размера, можно выразить следующим образом:

$$\bar{I} = 16XY \xi_0 \eta_0 / f^2. \quad (2.9)$$

Квадрат среднеквадратического отклонения интенсивности  $\langle \bar{I}^2 \rangle$  в восстановленном изображении рассчитывается по формуле

$$\langle \bar{I}^2 \rangle = \frac{256X^2Y^2 \xi_0^2 \eta_0^2}{f^4} F(2X\omega_0)F(2Y\Omega_0), \quad (2.10)$$

где  $F(a)$  — функционал вида

$$\begin{aligned} F(a) &= a \left\{ \frac{\text{Si}(a)}{a} - \frac{1}{a^2} [1 - \cos(a) - \text{Ci}(a) + \ln(\gamma a)] \right\} = \\ &= 4 \left[ \frac{\pi}{2a} - \frac{1 + \ln(\gamma a)}{a^2} + \frac{\cos(a)}{a^4} + \frac{4 \sin(a)}{a^5} - \dots \right]. \end{aligned}$$

Здесь  $\text{Si}(a)$  — функция интегрального синуса,  $\text{Ci}(a)$  — функция интегрального косинуса,  $\gamma \approx 0,5772$  — постоянная Эйлера;  $\omega_0$  и  $\Omega_0$  — граничные пространственные частоты:

$$\omega_0 = 2\pi/d_{\min x} \text{ и } \Omega_0 = 2\pi/d_{\min y}, \quad (2.11)$$

где  $d_{\min x}$ ,  $d_{\min y}$  — размеры минимально разрешимого элемента в изображении по осям  $x$  и  $y$  соответственно.

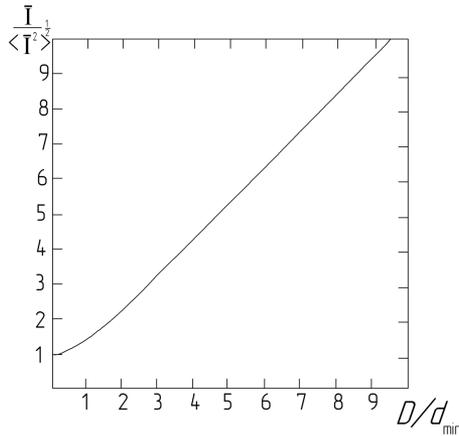
Отношение сигнал/шум в восстановленном с голограммы изображении можно представить в следующем виде:

$$\frac{\bar{I}}{\langle \bar{I}^2 \rangle^{0.5}} = [F(2X\omega_0)F(2Y\Omega_0)]^{-0.5} = \left[ F\left(\frac{4\pi X}{d_{\min x}}\right) F\left(\frac{4\pi Y}{d_{\min y}}\right) \right]^{-0.5}. \quad (2.12)$$

Подставив (2.11) в (2.12) и приняв  $d_{\min x} = d_{\min y} = d_{\min}$ ,  $2X = 2Y = D$ , получим

$$\begin{aligned} \frac{\bar{I}}{\langle \bar{I}^2 \rangle^{0.5}} &= \left( \frac{D}{d_{\min}} \right) \left[ 1 - \frac{1}{\pi^2} \left( \frac{d_{\min}}{D} \right) \left( \text{In} \left( \frac{d_{\min}}{D} \right) + 3,415 \right) + \right. \\ &\left. + \frac{1}{4\pi^4} \left( \frac{d_{\min}}{D} \right) \cos \left( \frac{2\pi D}{d_{\min}} \right) + \dots \right]^{-1} \approx \left( \frac{D}{d_{\min}} \right). \end{aligned}$$

Из графической зависимости  $\bar{I}/\langle \bar{I}^2 \rangle^{0.5}$ , представленной на рис. 2.11, следует, что начиная со значения  $D/d_{\min} = 1$  зависимость  $\bar{I}/\langle \bar{I}^2 \rangle^{0.5}$  от  $D/d_{\min}$  можно считать линейной.



**Рис. 2.11.** Зависимость отношения сигнал/шум в восстановленном с голограммы изображении от соотношения минимального размера элемента объекта и размера минимально разрешаемого элемента в его восстановленном с голограммы изображении

Изображение объекта восстанавливается с голограммы, если на голограмму попадают хотя бы нулевой и один из первых порядков дифракции на периодической структуре объекта с периодом  $D$ . Тогда минимальный размер голограммы  $h_{\min}$  можно найти по формуле

$$h_{\min} = \lambda z / D, \tag{2.13}$$

где  $z$  — расстояние от объекта до голограммы, если диффузор прилегает к объекту. При  $\lambda = 0,44$  мкм,  $z = 200$  мм и  $D = 30$  мкм минимальный размер голограммы  $h_{\min}$  по (2.13) равен 2,9 мм, что будет справедливо только при выполнении условия приближения Френеля, т.е. максимальный размер объекта должен удовлетворять условию  $r \ll \sqrt[4]{8z^3\lambda}$ . Для нашего примера  $r \ll 12$  мм.

Если реальный размер голограммы  $H > h_{\min}$ , то в восстановленном с нее изображении можно разрешить элементы размером  $d_{\min}$ , используя соотношение

$$(D/d_{\min}) = (H/h_{\min}). \quad (2.14)$$

Таким образом, формулу (2.14) можно трактовать как зависимость, показывающую, во сколько раз размер голограммы  $H$  должен быть больше минимального размера  $h_{\min}$ , определяемого по (2.13), для восстановления с нее изображения объекта с элементом минимального размера  $d_{\min}$  и требуемым соотношением сигнал/шум  $\bar{I}/\langle \bar{I}^2 \rangle^{0.5}$ .

В современных системах ОГП изображения восстанавливаются при отношении сигнал/шум 3—6 дБ, т.е.  $\rightarrow \bar{I}/\langle \bar{I}^2 \rangle^{0.5} = 1,4 \dots 2,0$ .

Следовательно, при использовании для регистрации голограмм в системе ОГП безлинзовой схемы с диффузным подсветом ПМС можно прогнозировать, что теоретически необходимый минимальный размер голограммы, содержащей одну страницу памяти, должен быть в 1,2—1,8 раза больше, чем размер  $h_{\min}$ .

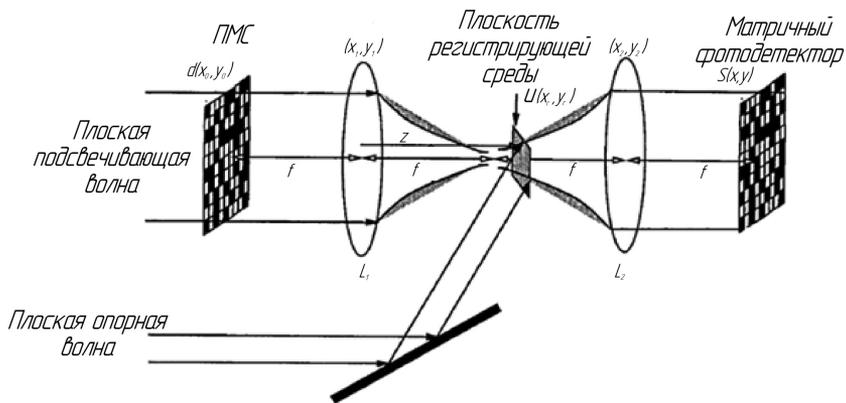
Элементы мелкой структуры диффузора, внутри которых фаза проходящего излучения не изменяется, определяют максимальную пространственную частоту  $\nu_{\max}$ . Последняя задает максимальный угол дифракции излучения на диффузоре и размер конуса распространения излучения после него:  $\cos(\theta_{\max}) = \lambda \nu_{\max}$ . Если элементы диффузора много мельче размера пикселя ПМС, то уширением конуса излучения после ПМС можно пренебречь, т.е. на площадь голограммы, определяемой дифракцией на ПМС по (2.14), будет попадать очень малая часть излучения. Распределение энергии в конусе излучения после диффузора, усредненное по зонам, превышающим несколько средних размеров спеклов, можно считать равномерным или подобным гауссову с шириной по полове выоте, равной угловому раствору конуса  $2\theta_{\max}$ . Тогда в первом приближении соотношение между энергией, приходящейся на площадь голограммы, и полной энергией в пучке будет равно отношению площади голограммы к площади сечения конуса излучения после диффузора плоскостью голограммы.

Увеличение элементов диффузора до размеров, соответствующих пикселю ПМС, приведет к сужению конуса излучения, что

сделает использование диффузоров такого типа более эффективным. Фазовые транспаранты с большим размером однородных элементов и псевдослучайной функцией фазового пропускания называют *фазовыми масками*.

### 2.2.3. Оптическая схема записи голограмм Фурье с объективами

В разделе 2.1 было показано, что максимальная плотность информации в объектном пучке достигается в фурье-плоскости при использовании объектива. Для определения требований к компонентам оптической схемы рассмотрим процесс регистрации голограммы на основе скалярной теории дифракции света. Известная схема регистрации и восстановления голограмм Фурье [7], называемая 4F, приведена на рис. 2.12.



**Рис. 2.12.** Схема 4F регистрации голограмм Фурье и восстановления изображения:  $L_1$  — фурье-преобразующий объектив записи,  $L_2$  — фурье-синтезирующий объектив восстановления,  $f$  — фокусное расстояние объективов,  $Z$  — расстояние от объектива  $L_1$  до плоскости регистрирующей среды,  $S(x,y)$  — распределение амплитуды в восстановленном с голограммы изображении в плоскости фотоприемника

На ПМС выводится страница данных  $\{b_{mn}\}$ , состоящая из нулей и единиц, так формируется функция пропускания ПМС:

$$d(x_0, y_0) = \sum_{m=1}^{M_{SLM}} \sum_{n=1}^{N_{SLM}} b_{mn} \text{rect}((x_0 - bm)/a) \text{rect}((y_0 - bn)/b), \quad (2.15)$$

где  $b_{mn} = 0$  или 1 в соответствии с данными в пикселе, имеющем координаты  $(n, m)$ ;  $b$  — размер пикселя ПМС.

Распределение поля объектной волны на произвольном расстоянии  $z$  за объективом  $L_1$  описывается уравнением

$$\begin{aligned} U(x_r, y_r, z) &= \\ &= K \iint_{\infty} d_0(x_0, y_0) \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda f} \frac{f-z}{f} (x_0^2 + y_0^2)\right] \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda f} (x_0 x_r + y_0 y_r)\right] dx_0 dy_0 = \\ &= K \exp\left(-j \frac{\pi}{\lambda} \frac{x_r^2 + y_r^2}{f-z}\right) \int dx_0 dy_0 d_0(x_0, y_0) \times \\ &\times \exp\left\{j \frac{\pi}{\lambda f} \frac{f-z}{f} \left[\left(x_0 - x_r \frac{f}{f-z}\right)^2 - \left(y_0 - y_r \frac{f}{f-z}\right)^2\right]\right\} = \\ &= K \exp\left(-j \frac{\pi}{\lambda} \frac{x_r^2 + y_r^2}{f-z}\right) R[f, z]\{d_0(x_0, y_0)\}, \end{aligned} \quad (2.16)$$

где  $x_r$  и  $y_r$  — координаты в плоскости регистрации голограммы;  $K$  — постоянный масштабный коэффициент,  $R[f, z]\{d_0(x_0, y_0)\}$  — оператор преобразования Френеля.

Если голограмма регистрируется точно в задней фокальной плоскости объектива  $L_1$ , т.е.  $z = f$ , то (2.16) принимает вид фурье-спектра функции  $d(x_0, y_0)$ , умноженного на функцию *sinc*, определяемую размером пикселя  $b$  ПМС:

$$U(f_x, f_y) = \text{sinc}(f_x b) \text{sinc}(f_y b) \sum_{m=1}^{M_{SLM}} \sum_{n=1}^{N_{SLM}} b_{mn} \exp[-j 2\pi b(m f_x + n f_y)], \quad (2.17)$$

где  $f_x, f_y$  — пространственные частоты,  $f_x = x_r / \lambda f$ ,  $f_y = y_r / \lambda f$ .

В точку с координатами  $(0,0)$  в плоскости регистрации голограммы приходит нулевая пространственная частота объекта с энергией, равной средней энергии проходящей через него волны. На ПМС выводится бинарная информация с равной вероятностью появления нулей и единиц, поэтому в данной точке будет сконцентрирована половина энергии объектной волны. Остальная

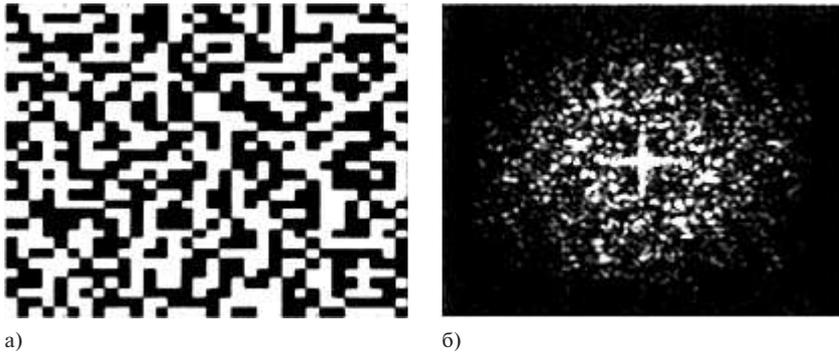


Рис. 2.13. Изображение страницы данных (а) и ее энергетический спектр (б)

энергия почти равномерно распределится вокруг этой точки (рис. 2.13).

При регистрации интерференционной картины центральный пик создает переэкспозицию фоточувствительной среды, что приводит к нелинейности записи, а следовательно, к искажению восстановленного изображения и увеличению перекрестных помех между наложенными микроголограммами при их мультиплексировании.

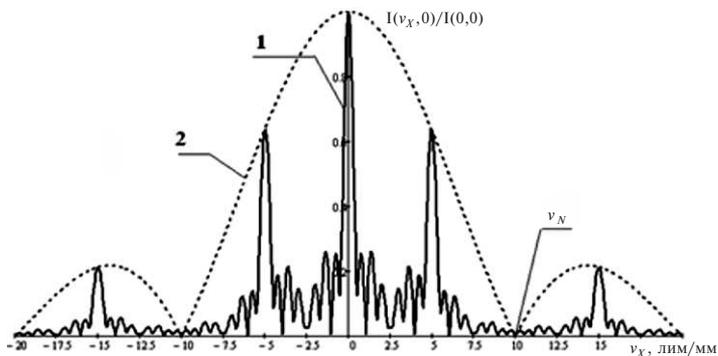
Пространственно-частотный спектр ПМС имеет бесконечные размеры, т.е. не существует граничной частоты  $\nu_{\max}$ , использованной в (2.7), поэтому размеры голограммы, определенные в геометрическом приближении, требуют уточнения.

На область высоких пространственных частот приходится малая часть энергии (рис. 2.14), а их удаление из спектра вызывает сглаживание контрастных границ перехода между яркими и темными элементами в восстановленном с голограммы изображении.

В спектре ПМС граничной пространственной частотой  $\nu_{\max}$  принято считать частоту Найквиста, определяемую как  $\nu_N = 1/t_a$ , где  $t_a$  — шаг между пикселями ПМС.

Диаметр апертуры в фурье-плоскости, пропускающий все лучи, углы дифракции которых определяются пространственными частотами от  $-\nu_N$  до  $\nu_N$ , рассчитывается по формуле

$$D_N = \lambda f \nu_N = \frac{\lambda f}{t_a} \quad (2.18)$$



**Рис. 2.14.** Нормированное распределение интенсивности в объектной волне вдоль оси  $x$  в фурье-плоскости: 1 — от произвольной страницы данных; 2 — от одного пикселя ПМС

и называется *апертурой Найквиста* [8]. Диаметр апертуры принято считать минимальным для обеспечения безошибочного восстановления информации при использовании пороговой бинаризации [9].

Для  $\lambda = 0,44$  мкм,  $f = 200$  мм и  $t_a = 30$  мкм размер минимального диаметра голограммы, равного апертуре Найквиста  $D_N$  по (2.18), равен 2,9 мм, что аналогично минимальному размеру, полученному по формуле (2.13) для голограммы Френеля в схеме с диффузором. При этих параметрах максимальный размер объекта не ограничен условием приближения дифракции Френеля и может быть в 10 раз больше, чем при записи голограммы Френеля.

Так, если размер голограммы ограничить прямоугольной квадратной диафрагмой с размером стороны  $W_a$ , то распределение амплитуды в восстановленном с голограммы изображении в плоскости фотоприемника будет описываться выражением

$$S(x, y) = -\frac{\alpha}{t_a} \operatorname{sinc}\left(\alpha \frac{x}{t_a}, \alpha \frac{y}{t_a}\right) d(-x, -y), \quad (2.19)$$

где  $\alpha = W_a / D_N$  — соотношение между размером голограммы и апертурой Найквиста.

Результаты расчета влияния значения  $\alpha$  на качество восстановления изображения [10] приведены на рис. 2.15. Коэффициент заполнения ПМС и матричного фотоприемника  $q = 0,9$ . Видно, что при размере голограммы менее  $1,5D_N$  качество восстановленного изображения сильно ухудшается, но даже при размере голограммы, равном  $D_N$ , велика вероятность правильного декодирования изображения.



Рис. 2.15. Компьютерное моделирование восстановления изображений с голограммы, записанной с использованием ПМС,  $16 \times 16$  пикселей, при значениях (слева направо)  $\alpha = 10; 5; 2; 1,67; 1,33; 1$

Кривые минимального уровня сигнала в единицах и максимального уровня сигнала в нулях, найденные в модельных восстановленных изображениях при разных значениях  $\alpha$ , представлены на рис. 2.16. Видно, что при  $\alpha = 1$  графики пересекаются, т.е. при  $\alpha < 1$  в восстановленных изображениях будут существовать участки, соответствующие информационным нулям, но имеющие яркость, большую, чем минимальная яркость участков, соответствующих единицам данного изображения.

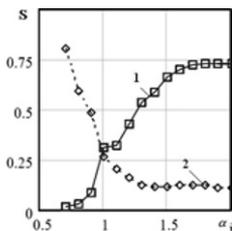


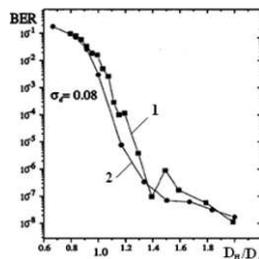
Рис. 2.16. Зависимость относительной яркости пикселей от значения  $\alpha$ : 1 – минимальные значения единиц; 2 – максимальные значения нулей

С ростом значений  $\alpha > 1$  наблюдается увеличение зазора по яркостям между самыми яркими нулями и самыми темными едини-

цами, но при  $\alpha > 1,5$  скорость увеличения зазора яркостей резко снижается и зазор практически перестает изменяться. Таким образом, использование микроголограмм размером, большим, чем  $D_N$  ( $\alpha > 1,0$ ), должно быть выгодным, несмотря на снижение теоретической плотности записи информации в одной микроголограмме. При этом наблюдается значительное увеличение отношения сигнал/шум в восстановленных изображениях, что позволяет скомпенсировать снижение общей информационной емкости носителя путем записи дополнительного числа мультиплексированных микроголограмм. Эти выводы подтверждаются практически всеми опубликованными работами по системам ОГП. Например, компания InPhase Technologies (США) [11] в опытных образцах систем дисковой ОГП в фурье-плоскости использует диафрагму размером  $1,16 D_N$ , компания Optware (Япония) [12,13] –  $1,2 D_N$ , система компании Sony (Япония) [14] –  $2 D_N$  и  $1,6 D_N$ , Stanford University (США) [15] –  $1,4 D_N$ , IBM (США) [16] –  $1,36 D_N$ , Daewoo (Япония) [17] –  $1,8 D_N$ .

Для численного описания качества изображения, восстановленного с голограммы и зарегистрированного на матричном фотоприемнике, помимо значения отношения сигнал/шум в полученном изображении также используется отношение битовых ошибок (Bit Error Rate – BER). Отношение битовых ошибок определяет вероятность появления ошибочно определенных нулей или единиц при декодировании зарегистрированного изображения.

Зависимости параметра BER изображения, восстановленного с фурье-голограммы, при разных размерах диафрагмы  $D_N$ , использованной для регистрации голограммы, и коэффициенте заполнения ПМС и матричного фотоприемника  $q = 1$  представлены на рис. 2.17 [18]. На рисунке видно хорошее совпадение экспериментальных результатов с теоретической моделью. Результат также



**Рис. 2.17.** Зависимости параметра BER в изображении от относительного диаметра фурье-голограммы: 1 – эксперимент; 2 – моделирование

подтверждает то, что при размере фурье-голограммы, равном  $D_N$ , в восстановленной с нее информации достигается минимально допустимое значение  $BER \approx 1 \times 10^{-3}$ .

Для систем ОГП на основе фурье-голограмм отношение сигнал/шум ( $SNR_i$ ) в восстановленных изображениях прямо пропорционально дифракционной эффективности голограмм  $\eta_i$  и обратно пропорционально площади голограммы  $S_r$ :

$$SNR_i \propto \frac{\eta_i}{wS_r}, \quad (2.20)$$

где  $w$  – спектр Винера.

На качество восстановленного изображения влияет не только размер диафрагмы, используемый при записи фурье-голограммы, но и ее форма (рис. 2.18). Исследования показали [19], что, используя крестообразную форму голограммы, когда лучи креста совпадают с направлениями сторон пикселей ПМС, всегда можно получить значение  $BER$  меньше, чем у аналогичной по размеру квадратной апертуры.

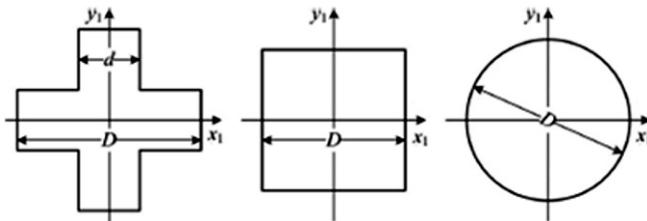


Рис. 2.18. Возможные крестообразная, квадратная и круглая формы диафрагм, задающие размеры фурье-голограммы

Модельные зависимости, поясняющие графики  $BER$  для этих двух типов апертур, представлены на рис. 2.19. На рисунке видно, что для выбранного размера квадратной апертуры  $D_r$  ( $k_2 = k_1$ ) всегда можно рассчитать параметр крестообразной апертуры  $d_r$ , имеющей меньшую площадь и соответствующей меньшему значению  $BER$ .

Анализ и экспериментальное сравнение квадратной, крестообразной и круглой апертуры голограммы представлены на рис. 2.20 [20].

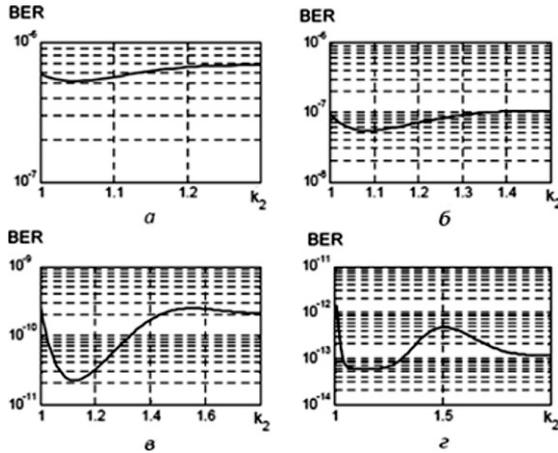
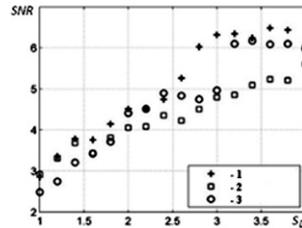


Рис. 2.19. Зависимости BER в восстановленном с голограммы изображении при изменении  $k_2 = d_r/D_N$  для разных значений  $k_1 = D_r/D_N$ :  $k_1 = 1,3$  (а);  $1,5$  (б);  $1,8$  (в);  $2$  (г)

Рис. 2.20. Зависимость величины отношения сигнал/шум SNR в восстановленном с голограммы изображении при различной относительной площади апертур трех видов: 1 – крестообразная, 2 – квадратная, 3 – круглая



По экспериментальным данным рассчитывают значение SNR:

$$SNR = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_1^2}}, \quad (2.21)$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_0$  – математическое ожидание распределения яркости «1» в восстановленном изображении страницы данных и «0» соответственно,  $\sigma_0$  и  $\sigma_1$  – среднее квадратическое отклонение распределения яркости «0» в странице данных и «1» соответственно.

На рис. 2.20 видно, что при площади апертур до  $2,5 D_N^2$  все три вида апертур ведут себя почти одинаково, но при значениях выше  $2,5 D_N^2$  крестообразная и круглая апертуры имеют лучшее отношение сигнал/шум, нежели квадратная.

### 2.3. Методы борьбы с переэкспозицией фоточувствительной среды при записи голограмм Фурье

Распределение энергии в объектном пучке, продифрагировавшем на странице записываемой информации, имеет пики, в которых плотность энергии в 5—6 раз превышает среднюю величину (см. рис. 2.14). Большой разброс яркости в плоскости чувствительного слоя голографического носителя приводит к появлению значительных нелинейных искажений в записанной голограмме и, соответственно, к появлению ошибок в записанной на голограмму информации. Для устранения этих ошибок необходимо сгладить распределение энергии в объектном пучке, падающем на голограмму.

В технике записи голограмм Фурье применяются несколько методов выравнивания распределения энергии в объектном пучке в плоскости голограммы: запись в смещенной плоскости, устранение пика от нулевой пространственной частоты, использование фазовых масок или диффузоров. Каждый метод имеет свои достоинства и недостатки, поэтому необходим анализ применимости того или другого метода в соответствии с конкретными условиями и задачами. Эффективность выравнивания распределения энергии  $R$  [дБ] принято определять по формуле

$$R = 10 \log \left( \frac{I_{\max}}{I_g} \right), \quad (2.22)$$

где  $I_{\max}$  — максимальная интенсивность объектного пучка в плоскости регистрации, Вт/м<sup>2</sup>;  $I_g$  — средняя интенсивность объектного пучка в плоскости регистрации, Вт/м<sup>2</sup>.

#### 2.3.1. Метод смещения плоскости регистрации

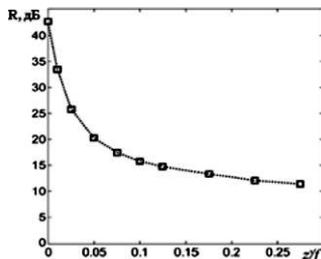
Метод записи голограммы Фурье в смещенной плоскости — самый распространенный благодаря его простоте и отсутствию дополнительных компонентов в оптической схеме. Суть метода

состоит в том, что плоскость установки регистрирующего материала смещают на некоторое расстояние  $z'$  относительно фурье-плоскости, что приводит к размыванию пиков в спектре и, следовательно, к выравниванию энергии. Однако это вызывает увеличение требуемых размеров голограммы в соответствии с формулой (2.13), поэтому для выбора смещения плоскости регистрации голограмм следует определить, как изменяется значение  $R$  в зависимости от смещения  $z'$ , а также как изменяется значение  $BER$  в зависимости от смещения  $z'$  и в зависимости от размера диафрагмы в плоскости регистрации.

При смещении плоскости регистрации из задней фокальной плоскости объектива на расстояние  $z'$  распределение амплитуды объектной волны в ней можно представить как размытие распределения амплитуды, полученное в фурье-плоскости по формуле (2.17), на слое пространства толщиной  $z'$ :

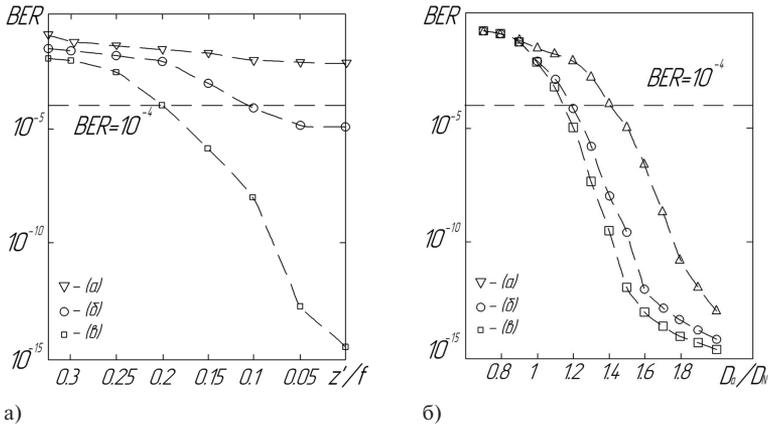
$$U(x_r, y_r) = R\{z'\} \{U(f_x, f_y)\}. \quad (2.23)$$

Результаты модельного расчета распределений амплитуды по формуле (2.23) при различных  $z'$  и соответствующем параметре  $R$  по формуле (2.22) представлены на рис. 2.21. В модели, использованной для построения рис. 2.21, значение  $R$  рассчитывалось при апертуре  $1,4 D_N$ . На рисунке видно, что смещение плоскости регистрации на 10% от фокуса фурье-объектива уже вызывает значительное снижение требований к динамическому диапазону регистрирующей среды.



**Рис. 2.21.** Зависимость эффективности выравнивания энергии в объектном пучке в плоскости регистрации от смещения данной плоскости от плоскости Фурье

Зависимости  $BER$  от смещения плоскости регистрации  $z'$  на 0—30% от фокусного расстояния фурье-объектива  $f$  для трех размеров диафрагмы, определяющей размер голограммы  $1,0 D_N$ ,  $1,2 D_N$ ,  $1,4 D_N$ , приведены на рис. 2.22, а. На рисунке видно, что при сме-



**Рис. 2.22.** Зависимости  $BER$  от смещения плоскости регистрации голограммы (а) и от размера полученной голограммы (б): а) при значениях апертуры  $D_N$  (а),  $1,2D_N$  (б) и  $1,4D_N$  (в); б) при отсутствии смещения (в), при смещении плоскости регистрации голограммы  $0,1f$  (б) и  $0,2f$  (а)

щении плоскости регистрации голограммы из фокальной плоскости объектива для получения значения  $BER < 10^{-4}$  требуется регистрация голограммы размером, большим  $1,2D_N$ , а при смещении на 20% — размером более  $1,4D_N$ . Зависимости  $BER$  от размера голограммы при смещении плоскости регистрации на 10 и 20% также показывают, что при размере голограммы  $(1,2-1,3)D_N$  допустимое смещение плоскости регистрации составляет 10% от фокусного расстояния фурье-объектива, используемого при записи (рис. 2.22, б).

### 2.3.2. Метод фазового кодирования объектного пучка с помощью фазовых диффузоров

Другим методом снижения требований к динамическому диапазону регистрирующей среды является устранение из пространственно-частотного спектра объекта нулевой частоты путем работы не

с амплитудным ПМС, а с фазовым. Этот метод более эффективен для получения высокой плотности записи информации, но менее распространен, так как требует значительного усложнения схем регистрации восстановленных изображений.

Нулевая пространственная частота в спектре объекта соответствует величине усредненной по апертуре ПМС амплитуде прошедшей волны и вызывает переэкспозицию среды при записи голограммы в фурье-плоскости. Для устранения нулевой пространственной частоты необходимо сделать среднюю амплитуду прошедшей ПМС волны равной нулю. Этого можно добиться, модулируя фазу проходящей волны. Рассмотрим несколько вариантов фазовых кодов, используемых в системах ОГП.

Первый вариант — чисто фазовое кодирование входной информации по схеме, когда нули и единицы на ПМС представляются полностью пропускающими ячейками, но фаза в единицах сдвинута на  $\pi$  (рис. 2.23), что эквивалентно отрицательному значению амплитуды проходящего излучения.

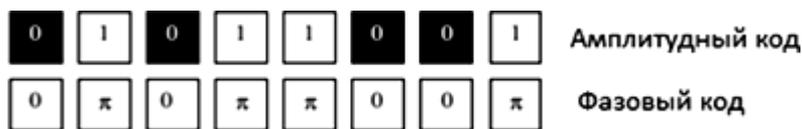
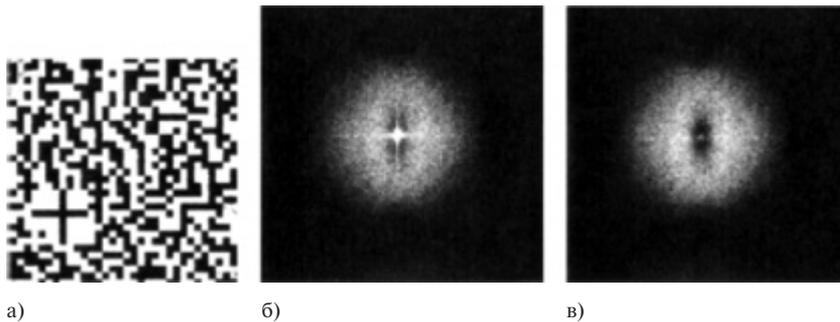


Рис. 2.23. Пример амплитудного и фазового кодов

Тогда, поскольку при рандомизирующем кодировании данных число единиц и нулей в каждой странице данных будет почти одинаково, средняя амплитуда прошедшей через ПМС волны будет близка к нулю. Результат использования такого метода представлен на рис. 2.24 [21]. На рисунке видно значительное ослабление нулевой частоты, эффект неполного ее гашения обусловлен небольшим различием в числе нулей и единиц в странице данных, выведенной на ПМС.

Существенным недостатком использования чисто фазового кодирования для устранения нулевой пространственной частоты является то, что восстановленные с голограммы изображения пикселей будут иметь одинаковую энергию, а отличие нулей от единиц будет заключено в фазе световой волны, которая утратится при регистрации квадратичным матричным фотоприемником, по-



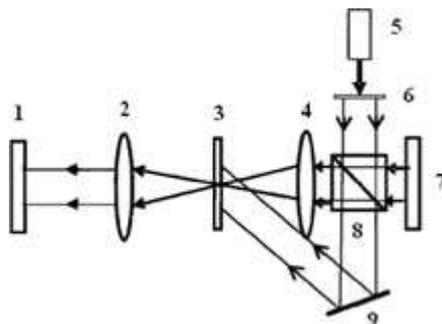
**Рис. 2.24.** Пример устранения нулевой пространственной частоты в спектре транспаранта: а) бинарное изображение (белым обозначены элементы, соответствующие единице); б) распределение интенсивности в объектной волне в фурье-плоскости от амплитудного транспаранта; в) распределение интенсивности в объектной волне в фурье-плоскости от фазового транспаранта

скольку он нечувствителен к фазе излучения. Для устранения этого недостатка требуется в плоскости приемника перевести фазовую информацию в амплитудную. В работе [21] авторами предложено несколько методов такого преобразования.

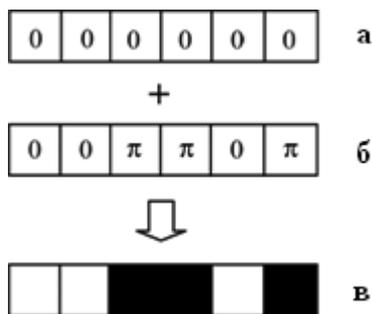
Визуализировать фазовое распределение в восстановленной волне можно, сложив ее с фазированной восстанавливающей плоской волной. Оптическая схема системы восстановления, позволяющая реализовать такой подход, представлена на рис. 2.25, а на рис. 2.26 приведена схема, поясняющая выполняемое преобразование.

В процессе восстановления изображения с голограммы объектная ветвь не перекрывается. На ПМС выводится равномерная фазовая картина, и голограмму освещают два пучка. Восстановленная с голограммы волна складывается с волной нулевого порядка, прошедшей по объектной ветви схемы, и интерференционная картина, соответствующая визуализированному фазовому изображению, регистрируется на фотоприемнике.

Исследователи отмечают, что этот метод можно с успехом применять для работы с одинарными голограммами, но при восстановлении изображения с мультиплексированных (наложенных)



**Рис. 2.25.** Схема записи и восстановления голографической памяти на основе фазового ПМС: 1 — матричный фотоприемник; 2, 4 — фурие-объективы; 3 — регистрирующая среда; 5 — лазер; 6 — расширитель лазерного пучка; 7 — фазовый ПМС; 8 — делитель лазерного пучка, 9 — зеркало, создающее опорную волну



**Рис. 2.26.** Схема преобразования невидимого фазового изображения (б) в видимое распределение интенсивности (в) в плоскости приемника после сложения с фазированной плоской волной (а)

в едином объеме голограмм отношение сигнал/шум в декодированном изображении быстро уменьшается при увеличении числа микроголограмм. Это связано с тем, что нецелевая микроголограмма, т.е. микроголограмма, которая не должна восстановить изображение в данный момент, для плоского сфазированного пучка представляет случайную фазовую маску, значительно искажающую его волновой фронт и, следовательно, зашумляющую итоговую интерференционную картину.

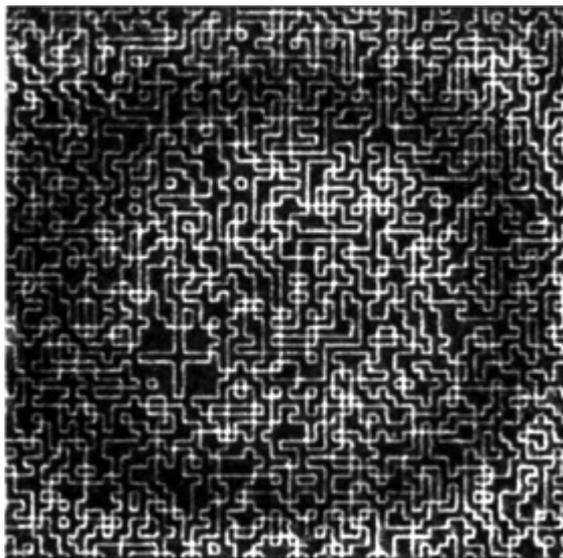
Другой метод устраняет эту проблему: каждая микроголограмма пишется в две последовательные экспозиции, когда при первой

экспозиции на ПМС выводится страница данных, а при второй — чистое поле. Тогда волна, восстановленная с такой голограммы, будет содержать в себе обе волны, требуемые для визуализации на фотоприемнике фазовой информации. Недостатком этого метода, кроме двухкратного снижения емкости носителя, является переэкспозиция среды при второй экспозиции микроголограмм, поскольку в этот момент объектная волна не является сбалансированной, т.е. не имеет нулевую среднюю амплитуду, а, наоборот, содержит максимальную для транспаранта концентрацию энергии на нулевой пространственной частоте.

Еще одним методом для борьбы с переэкспозицией среды в области нулевой пространственной частоты объекта является простое ее экранирование в схеме регистрации в промежуточной фурье-плоскости. При этом нет необходимости использовать фазовый модулятор, но требуется матричный фотоприемник с разрешением, значительно более высоким, чем в других случаях, так как восстановленное изображение содержит только высокие пространственные частоты транспаранта, т.е. контуры и границы переходов от белого к черному и наоборот (рис. 2.27).

Имея контуры границ областей нулей и единиц и зная яркость хотя бы одной области, можно заполнить все строки нулями и единицами, поскольку яркость каждого контура на пути от данной области к краю восстановленного изображения будет изменяться на противоположную. В качестве такого элемента могут выступать реперные объекты, чья форма и положение в страницах данных в каждой микроголограмме неизменны.

В работе [22] предложен и исследован метод визуализации фазовой картины, восстановленной с голограммы, содержащей страницу данных, в плоскости фотоприемника с помощью техники двухшаговой фазово-сдвиговой интерферометрии: микроголограмма регистрируется обычным способом, фазовая маска в опорной ветви используется для мультиплексирования микроголограмм и не влияет на предложенный метод восстановления изображений. При регистрации восстановленной с микроголограммы волны на фотоприемник в обход голограммы подается плоская волна. Регистрация полученной интерференционной картины проводится дважды. Отличие второй интерферограммы состоит в том, что фазу дополнительной волны изменяют на  $\pi/2$ . Таким образом, распределение интенсивностей  $I_1(x,y)$  и  $I_2(x,y)$



**Рис. 2.27.** Изображение, восстановленное с фурье-голограммы, полученной при экранировании зоны низких пространственных частот

в зарегистрированных интерферограммах описывается следующими формулами:

$$\begin{aligned}
 I_1(x, y) &= A^2 + A_d^2 + 2AA_d \cos[\varphi(x, y) - \varphi_d]; \\
 I_2(x, y) &= A^2 + A_d^2 + 2AA_d \cos\left[\varphi(x, y) - \varphi_d - \frac{\pi}{2}\right] = \\
 &= A^2 + A_d^2 + 2AA_d \sin[\varphi(x, y) - \varphi_d],
 \end{aligned}
 \tag{2.24}$$

где  $A \exp[i\varphi(x, y)]$  — распределение поля в восстановленной волне;  $A$  — постоянная амплитуда;  $\varphi(x, y)$  — фазовое изображение, требующее визуализации;  $A_d \exp[i\varphi_d]$  и  $A_d \exp[i(\varphi_d + \pi/2)]$  — распределение поля в плоских дополнительных волнах;  $A_d$  — постоянная амплитуда дополнительной волны;  $\varphi_d$  — неизвестный фазовый набег дополнительной волны относительно сигнальной.

Постоянные составляющие интенсивности сигнальной  $A^2$  и дополнительных волн  $A_d^2$  можно измерить с помощью матричного фотоприемника, перекрывая поочередно дополнительный и сиг-

нальный пучки. Вычитая измеренные интенсивности из распределений яркостей в интерференционных картинах (2.24), получаем

$$\begin{aligned} I_1'(x, y) &= 2AA_d \cos[\varphi(x, y) - \varphi_d] \\ I_2'(x, y) &= 2AA_d \sin[\varphi(x, y) - \varphi_d]. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Отсюда можно выделить фазовое распределение сигнальной волны, разделив  $I_1'$  на  $I_2'$ :

$$\tan^{-1} \left[ \frac{I_2'(x, y)}{I_1'(x, y)} \right] = \varphi(x, y) - \varphi_d. \quad (2.26)$$

Для точного декодирования исходной фазовой объектной информации необходимо определить  $\varphi_d$ . Это можно сделать, используя усредненные величины  $\left\langle \tan^{-1} \left[ \frac{I_2'(x, y)}{I_1'(x, y)} \right] \right\rangle$  и  $\langle \varphi(x, y) \rangle$ :

$$\varphi_d = \langle \varphi(x, y) \rangle - \left\langle \tan^{-1} \left[ \frac{I_2'(x, y)}{I_1'(x, y)} \right] \right\rangle. \quad (2.27)$$

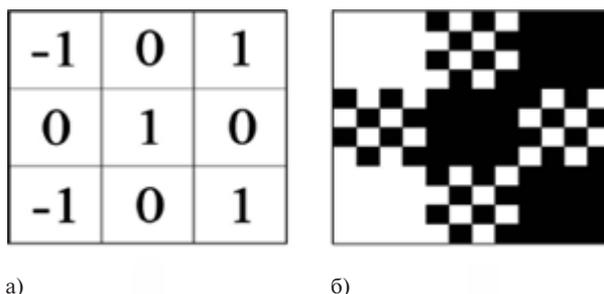
Среднее значение фазового распределения объекта  $\langle \varphi(x, y) \rangle$ , как правило, известно заранее из условий использования метода кодирования цифровой информации перед выводом на фазовый ПМС.

Дополнительным достоинством техники двухшаговой фазово-сдвиговой интерферометрии является то, что он нечувствителен к искажениям, вызывающим стационарный шум в интерферограммах (рассеяние на компонентах схемы, неравномерность амплитуд в пучках, неравномерность чувствительности элементов фотоприемника).

Сложность реализации ввода дополнительной волны в схему регистрации восстановленных изображений сдерживает широкое применение этого метода.

В работе [23] предложен метод, позволяющий получить преобразование фазовой информации в распределение интенсивности при восстановлении изображения с голограммы без использования интерферограмм. Авторы предлагают применять схему кодирования информации, в которой под «1» и «0» в странице данных выделяется не по одному пикселю ПМС, а группы по  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$  или более пикселей. Тогда группы пикселей, соответствующие

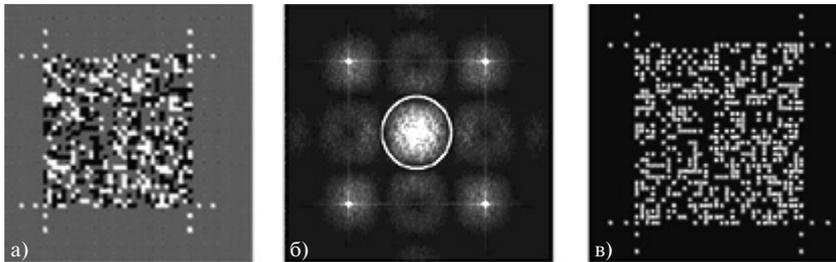
информационным единицам, кодируются постоянным фазовым распределением со скачком фазы на  $\pi$ , а зоны, отвечающие за информационные нули, заполняются двухмерными решетками максимальной частоты (рис. 2.28).



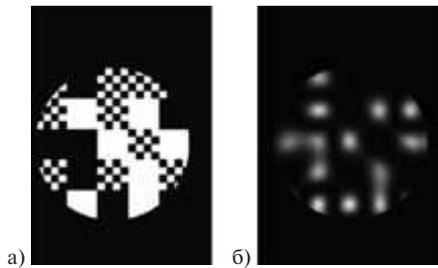
**Рис. 2.28.** Схемы кодирования информации фазовым распределением: а) амплитудное распределение (распределение, которое нужно получить в восстановленном изображении), б) фазовое распределение (распределение, которое выводится для этого на фазовый ПМС); черным обозначены пиксели с нулевой фазой, белым — с фазой, равной  $\pi$

Решетки, выведенные в зоны, которые соответствуют информационным нулям, вносят в пространственно-частотный спектр объекта частоты, значительно превышающие граничную пространственную частоту, необходимую для восстановления этих участков объекта. Если эти частоты не будут зарегистрированы в микроголограмме, то при восстановлении в указанных зонах изображение будет отсутствовать, что на фотоприемнике будет восприниматься как нулевая интенсивность. Чем большую площадь занимает группа пикселей, отведенная под 1 бит информации, тем больше будет разрыв между пространственными частотами, задаваемыми решетками, и частотами, необходимыми для правильного декодирования информации. Таким образом, эта схема одновременно гасит нулевую пространственную частоту в спектре объекта, поскольку среднее значение амплитуды близко к нулю, и позволяет регистрировать нефазовое восстановленное изображение на фотоприемнике.

Изображения, полученные в эксперименте по реализации этого метода, представлены на рис. 2.29 и 2.30. На рис. 2.29, б отчетливо видны четыре пика, расположенные квадратом вокруг зоны регистрации голограммы, отвечающие за частоты решеток, выведенных в зоны с информационными нулями.



**Рис. 2.29.** Изображения на разных стадиях алгоритма фазового кодирования: а) страница с фазовым распределением на ПМС; б) пространственно-частотный спектр фазового распределения, представленного на виде (а) (окружностью обведена область регистрации микроголограммы); в) зарегистрированное на фотоприемнике восстановленное изображение



**Рис. 2.30.** Увеличенные участки изображения: а) выводимого на ПМС; б) зарегистрированного на фотоприемнике

На увеличенных участках изображений, выводимых на фазовый ПМС и получаемых в плоскости матричного фотоприемника (см. рис. 2.30), видно, что в зонах, заполненных на ПМС двухмерными решетками, изображение не восстановилось, а все зоны, заполненные постоянным фазовым распределением, на фотоприем-

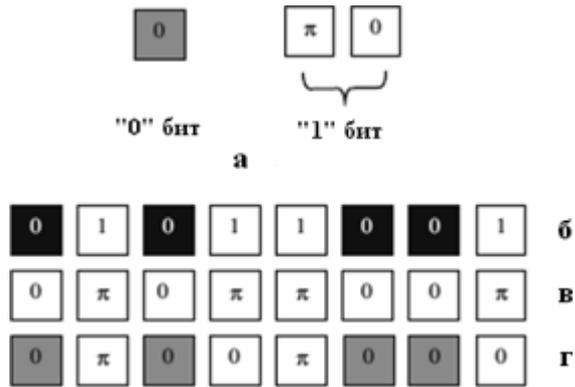
нике воспринимаются как яркие участки изображения и будут декодированы как информационные единицы.

Этот метод кодирования весьма перспективен для использования в системах ОГП, однако на практике приемлемые по соотношению сигнал/шум изображения в такой схеме можно получить только при использовании зон, размер которых больше, чем  $3 \times 3$  пикселя ПМС. Это существенно снижает конечную емкость носителя ОГП, поскольку более чем 10-кратное снижение емкости каждой страницы данных не удается компенсировать аналогичным увеличением мультиплексированных микроголограмм.

Метод, схожий с рассмотренным, можно реализовать с использованием не фазового, а амплитудного ПМС на основе твист-эффекта жидких кристаллов в режиме гибридной модуляции — амплитудной и фазовой одновременно [24]. В этом случае можно подобрать три состояния, при которых скачок фазы для двух из них будет равен нулю, а для третьего будет отличаться на  $\pi$ . При этом амплитудное пропускание синфазной пары состояний будет заметно различаться, а пропускание несинфазного состояния будет мало отличимо от пропускания одного из синфазных. Схема такого метода кодирования приведена на рис. 2.31. На рисунке видно, что для кодирования информационных нулей предполагается использовать состояние ПМС с низким пропусканием и нулевой фазовой задержкой, а для информационных единиц — состояние с высоким пропусканием и с фазовыми задержками нуль и  $\pi$  поочередно.

Схема регистрации при использовании такого гибридного кода будет аналогична схемам с простым амплитудным кодированием информации, но в фурье-спектре транспаранта нулевая частота будет отсутствовать. Однако гибридный режим работы для амплитудных модуляторов не является стандартным, и для определения нужных состояний необходимо проводить калибровку ПМС [25], кроме того, не у всех типов амплитудных модуляторов имеются требуемые три состояния.

**Установка фазовых масок и диффузоров в объектный пучок.** Для выравнивания энергии в объектном пучке в фурье-плоскости вместо фазовых ПМС можно использовать статические фазовые маски, которые вносят в объектный пучок случайные фазовые набегии, вследствие чего энергия перераспределяется по пространственным частотам. Наличие фазовой маски не влияет на восстановленное



**Рис. 2.31.** Схема гибридного кодирования: а) правило кодирования по предложенному методу; б) обычное амплитудное представление двоичных данных; в) простейшее фазовое представление данных; г) представление данных по гибричному методу

с голограммы изображение, так как фотоприемник регистрирует только распределение интенсивности. Этот метод широко исследован и успешно используется не только в системах ОГП, но и в других сферах применения голограмм.

Схема регистрации фурье-голограммы при расположении голограммы в фурье-плоскости объектива с добавленной фазовой маской, наиболее выгодная с позиции плотности записи информации и требований к характеристикам компонентов, представлена на рис. 2.32.

Если фазовая маска состоит из элементов, которые вносят в объектную волну фазовые набеги, равные только  $0$  и  $180^\circ$ , независящие от других элементов и являющиеся равновероятными (рис. 2.33), то распределение энергии в объектном пучке в фурье-плоскости пропорционально интенсивности от одного элемента ПМС (см. рис. 2.14). Если элементы фазовой маски вносят фазовый сдвиг не на  $180^\circ$ , а с некоторой погрешностью  $\delta$ , то результат работы такой маски можно рассматривать как преобразование спектра страницы данных суммой двух составляющих маски, одна из которых работает как идеальная маска со скачком фазы в  $180^\circ$ , а другая не вносит никакой разницы фаз, но отбирает на себя часть

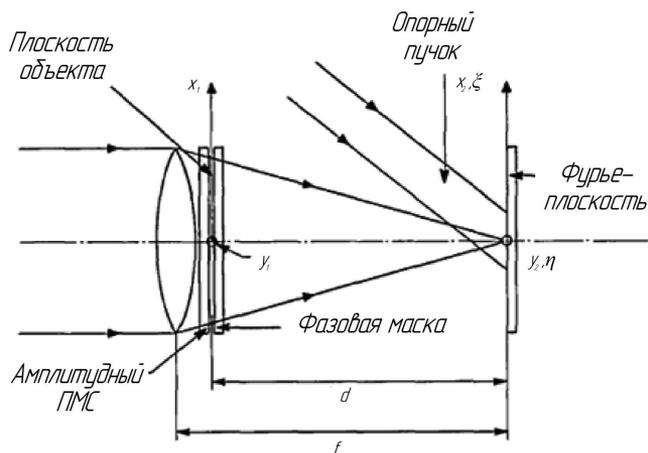


Рис. 2.32. Схема регистрации фурье-голограммы с фазовой маской в объектной волне

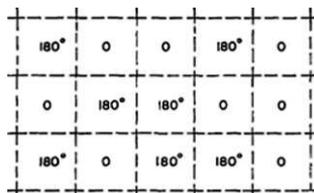


Рис. 2.33. Фазовая маска со случайной структурой расположения элементов

энергии пространственного спектра объекта. Доля нетрансформированной энергии  $P_2$  после такой маски описывается формулой

$$P_2 = P \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right),$$

где  $P$  — полная мощность в объектной волне, Вт.

При  $\delta = 10^\circ$   $P_2 = 7,6\%$ , при  $\delta = 45^\circ$  —  $14,6\%$ , а при  $\delta = 90^\circ$  —  $50,0\%$ .

Для более детального анализа влияния фазовых сдвигов в маске на эффективность ее работы при описании эффективности работы многоуровневых фазовых масок используют параметр качества

$$G = \frac{|F(x, y)|_{\max}^2}{M^2 \iint f_0(\xi, \eta) d\xi d\eta}, \quad (2.28)$$

где  $F(x, y)$  — пространственно-частотный спектр объекта с фазовой маской;  $|F(x, y)|_{\max}^2$  — максимальный уровень интенсивности в объектной волне;  $M$  — полное число элементов транспаранта;  $f_0(\xi, \eta)$  — функция пропускания одного элемента объекта.

Из формулы (2.28) следует, что при отсутствии фазовой маски  $G = M^2$ , так как максимальное значение амплитуды будет иметь волна с нулевой пространственной частотой.

При случайном распределении фазового набега на каждом элементе маски  $\theta(l, m)$  значение  $G$  можно рассчитать по формуле

$$G = \frac{1}{M^2} \left\{ \sum_{l=0}^M \sum_{m=0}^M \exp[i\theta(l, m)] \right\}^2. \quad (2.29)$$

Отсюда вероятность того, что значение  $G < G_0$  определяется выражением

$$P(G < G_0) = G_0 M \int_0^{\infty} J_1(G_0 M t) [J_0(t)]^{M^2} dt, \quad (2.30)$$

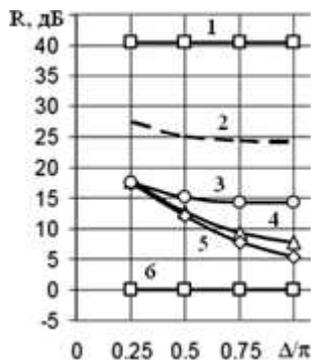
где  $J_0$  и  $J_1$  — функции Бесселя нулевого и первого порядка соответственно.

Исследования показали, что вариант схемы с двухуровневой фазовой маской, т.е. маской с единичным шагом фазы  $180^\circ$ , в теории и по результатам моделирования по схеме Монте-Карло всего в 2 раза хуже, чем вариант схемы с бесконечным числом шагов в диапазоне фазовых смещений  $0-360^\circ$ . Четырехуровневая фазовая маска приводит к выравниванию пространственно-частотной картины, практически не отличимой от картины, формируемой маской с бесконечным числом шагов.

Современные технологические возможности позволяют получать и двухуровневые, и многоуровневые, а также непрерывные фазовые маски, интегрированные с ПМС. Следует отметить, что непрерывные фазовые маски можно интерпретировать как диффузор, у которого средний размер однородного элемента равен размеру элемента ПМС.

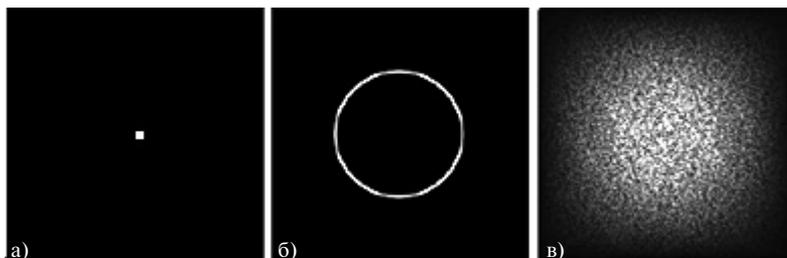
Для применения фазовых масок того или иного вида в системе ОГП должна быть известны не только эффективность выравнивания энергии по частотам, но и необходимое увеличение размеров голограммы, записанной без маски, чтобы обеспечить восстановление изображения с требуемым значением BER.

С помощью численного моделирования было определено влияние глубины фазовой модуляции  $\Delta$ , создаваемой масками разного типа, на эффективность выравнивания распределения энергии  $R$  (см. (2.15)) в объектном пучке в фурье-плоскости, представленное на рис. 2.34.



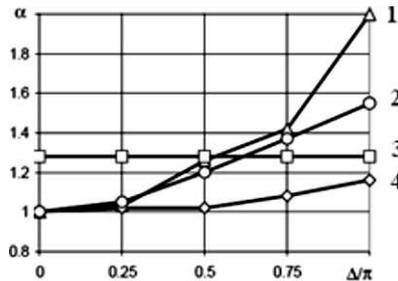
**Рис. 2.34.** Зависимости эффективности выравнивания энергии от глубины модуляции фазы, создаваемой фазовыми масками разных типов: 1 — без фазовой маски; 2 — аксикон ( $1000 \times 1000$  пикселей); 3 — стандартный аксикон; 4 — непрерывная псевдослучайная; 5 — дискретная многоуровневая псевдослучайная; 6 — случайная двухуровневая

Следует отметить, что на рис. 2.34 кривую для случайной бинарной фазовой маски нужно воспринимать как одну точку при  $\Delta = 1$ . На рис. 2.34 видно, что эффективность выравнивания энергии для всех типов масок выше при внесении набега фазы, равного  $\pi$ , и что расчетные псевдослучайные маски эффективнее, чем аксикон, который в силу его структуры ослабляет нулевую пространственную частоту не за счет перераспределения энергии по всем другим пространственным частотам, а только в определенном частотном диапазоне, образуемом в частотной плоскости кольцо (рис. 2.35).



**Рис. 2.35.** Распределение энергии в пространственно-частотном спектре объекта без маски (а), с аксиконом (б), с псевдослучайной многоуровневой маской (в)

Значение отношения требуемого размера голограммы к апертуре Найквиста  $\alpha = \frac{W_a}{D_N}$ , необходимое для получения значения  $\text{BER} < 10^{-4}$ , приведено на рис. 2.36.

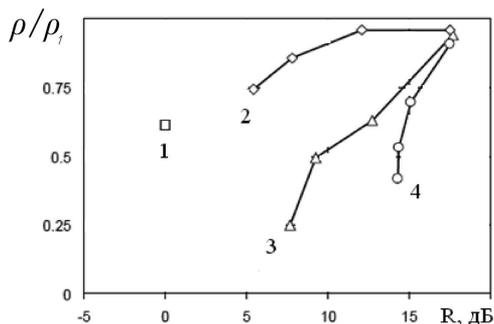


**Рис. 2.36.** Зависимости требуемой апертуры  $\alpha$  от вносимой фазовой маски  $\Delta\pi$ : 1 — непрерывная псевдослучайная маска; 2 — аксикон; 3 — случайная двухуровневая маска; 4 — дискретная многоуровневая псевдослучайная маска (точка (0,1) является значением для голограммы без фазовой маски)

На рисунке видно, что по этому критерию, определяющему конечную емкость носителя памяти, наилучшим образом распределение энергии в пространственно-частотном спектре выравнивает многоуровневая псевдослучайная маска, однако при этом требуется увеличение размеров голограммы не более чем на 20%. В то же время непрерывные фазовые маски при вносимой глубине модуляции фазы, равной  $\pi$ , требуют увеличения размеров голограммы минимум в 2 раза.

Зависимость плотности записи информации  $\rho$  от необходимой эффективности выравнивания энергии по пространственному спектру (рис. 2.37) представлена в долях плотности записи  $\rho_1$ , обеспечиваемой без использования фазовых масок и без учета ограниченного динамического диапазона регистрирующей среды.

На рисунке видно значительное превосходство многоуровневых и бинарных псевдослучайных масок по сравнению с фазовыми масками других типов, поэтому их использование выгоднее для получения наиболее емкого носителя информации.



**Рис. 2.37.** Плотности записи информации на голографический носитель для фазовых масок различных типов: 1 — случайная двухуровневая маска; 2 — дискретная многоуровневая псевдослучайная маска; 3 — непрерывная псевдослучайная маска; 4 — аксикон

Серьезным недостатком применения дискретных фазовых масок является чувствительность характеристик схемы записи к точности совмещения элементов масок с элементами ПМС. Сдвиг границ элементов маски относительно границ пикселей даже на 10% размера элемента ПМС приводит к перераспределению энергии в область высоких пространственных частот, что обуславливает деградацию сигнала в соответствующих пикселях восстановленного с голограммы изображения до уровня шумов [26]. Для расширения допуска на совмещение фазовой маски с положением пикселей на ПМС можно использовать кратные маски [27], в которых элемент имеет размер в несколько пикселей ПМС (например, размер информационного кодового блока). Во многих случаях число единиц и нулей в информационных блоках является постоянным в каждой странице данных, что обеспечивается используемым кодом преобразования информации в изображении страниц данных. Тогда фазовые маски с элементами в размер блока также будут удалять из пространственного спектра нулевую частоту. При увеличении минимального размера элементов маски в схему кодирования вносят дополнения, чтобы между информационными блоками в каждой странице данных существовал промежуток из непр пропускающих пикселей (неинформационный промежуток), на которых будут располагаться границы элементов

фазовой маски (рис. 2.38). Применение неинформационных промежутков позволяет сделать допуск на позиционирование маски равным  $\pm 0,5$  размера промежутка.

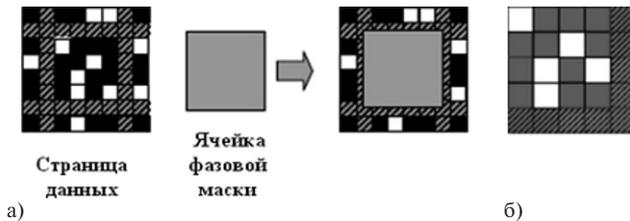


Рис. 2.38. Иллюстрация метода кратных фазовых масок: а) схема наложения маски; б) блок данных, снижающий потери на неинформационные промежутки

Введение неинформационных промежутков в общем случае значительно снижает емкость страницы данных, но при использовании для кодирования информации разреженных кодов, когда значение единиц в блоке данных берется фиксированным и меньшим, чем значение нулей, позволяет организовать кодовые комбинации, обеспечивающие отсутствие единиц пикселей на вертикальной и горизонтальной сторонах блока. Тогда границы будут входить в информационную составляющую каждого блока и потери информационной емкости страниц станут минимальны.

## 2.4. Методы и схемы мультиплексирования микроголограмм Фурье при записи на фоточувствительные регистрирующие среды

Основное достоинство применения голографического принципа для систем хранения информации состоит в возможности записи на одном участке регистрирующей среды мультиплексной голограммы в виде большого числа наложенных друг на друга субго-

логограмм, каждая из которых содержит «страницу» входной информации. Записанная таким образом мультиплексная голограмма обеспечивает селективное оптическое считывание отдельных субголограмм, поскольку каждой субголограмме соответствует интерференционная картина, однозначно закодированная соответствующим опорным пучком, и она с достаточной эффективностью откликается лишь на данный опорный пучок.

При использовании большинства методов мультиплексирования получают разрывное наложение голограмм, т.е. с определенного участка носителя без его механического сдвига восстанавливают некоторое число страниц данных с наложенных голограмм. Эти участки образуют разделенные между собой подзоны, которые также называют голограммами (или мультиплексными голограммами). Для устранения терминологической путаницы каждую отдельную голограмму, входящую в такую подзону, будем называть субголограммой, а подзону — *микроголограммой*.

Такой способ мультиплексной записи информации позволяет существенно увеличить плотность записи, а значит, и потенциальную емкость носителя. Процесс мультиплексирования в значительной степени определяет информационную емкость регистрирующей среды.

Мультиплексность записи и считывания является главным достоинством архивной голографической памяти на основе объемных регистрирующих сред, выгодно отличающим ее от традиционных двухмерных или многослойных средств побитовой оптической памяти. В последних мультиплексность практически не используется и повышение плотности хранимой информации на единицу площади осуществляется в основном в результате перехода к источникам излучения с малой длиной волны и увеличения числовой апертуры используемой оптической системы.

Мультиплексность в голографической памяти осуществляется за счет высокой селективности к характеристикам считывающего излучения (к углу падения на регистрирующую среду, длине волны, структуре волнового поля и т.д.). Однако выполнение этого требования зависит от выбора оптической схемы и характеристик регистрирующей среды.

В настоящее время наибольшее внимание уделяется объемным фазовым голограммам, обладающим высокой дифракционной эффективностью и хорошей селективностью.

Как известно [28], дифракционная эффективность  $\eta$  объемной фазовой пропускающей голограммы определяется фазовой модуляцией  $\Delta\varphi$ :

$$\eta = \sin^2 \Delta\varphi = \sin^2[(\pi \cdot \Delta n \cdot T)/(\lambda_0 \cdot \cos \theta_0 \cdot n_0)], \quad (2.31)$$

где  $\Delta n$  — фотоиндуцированное изменение показателя преломления регистрирующей среды,  $T$  — толщина среды,  $\lambda_0$  — длина волны лазерного излучения, используемого для записи голограммы,  $2\theta_0$  — угол между записывающими пучками в среде с показателем преломления  $n_0$ .

Селективность определяется допустимыми с точки зрения уменьшения значения дифракционной эффективности угловым ( $\delta\theta$ ) или спектральным ( $\delta\lambda$ ) отклонением от значений параметров  $\theta_0$  и  $\lambda_0$ , при которых дифракционная эффективность имеет максимальное значение и которые связаны известным соотношением Брэгга:

$$2n_0 \cdot d \cdot \sin \theta_0 = \lambda_0, \quad (2.32)$$

где  $d$  определяет пространственный период решетки в области записи.

Для фазовой пропускающей голограммы значение  $\delta\theta$  может быть представлено соотношением [28]

$$\delta\theta = \frac{\xi}{\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n_0}{\lambda_0}\right) \cdot T \cdot \sin \theta_0}, \quad (2.33)$$

где  $\xi$  — параметр, значение которого выбирают по приведенным в [15] зависимостям относительной дифракционной эффективности  $\frac{\eta}{\eta_0}(\xi)$  ( $\eta$  и  $\eta_0$  — дифракционная эффективность соответственно при отклонении  $\delta\theta$  и при нулевом отклонении от угла Брэгга).

Из (2.33) с учетом (2.32) получают

$$\delta\theta = \frac{\xi \cdot d}{\pi \cdot T}. \quad (2.34)$$

При этом из соотношения (2.32) следует зависимость между  $\delta\theta$  и  $\delta\lambda$ :

$$\delta\theta = \frac{\delta\lambda}{\lambda_0} \cdot \operatorname{tg} \theta_0. \quad (2.35)$$

Из соотношений (2.31), (2.34) и (2.35) ясно, что рассмотренные параметры  $\eta$ ,  $\delta\theta$  и  $\delta\lambda$ , определяющие возможности мультиплексирования в отношении числа одиночных субголограмм в мультиплексной голограмме, в первую очередь зависят от пространственного периода  $d$  голограммы и от ее толщины  $T$ ; в частности, повышение селективных свойств объемной голограммы, выражающееся в уменьшении значений  $\delta\theta$  и  $\delta\lambda$ , связано с увеличением ее толщины.

Одной из ключевых основ любой системы голографической памяти является угол  $\theta$ , под которым опорный пучок излучения падает на регистрирующую среду (при записи и считывании информации) относительно исходного информационного пучка излучения, что определяет возможность мультиплексных записи и считывания информации. Если среда объемная, т.е. ее толщина составляет несколько десятков микрон, то, например, изменяя угол между опорным и сигнальным пучками излучения, на одном и том же участке фоточувствительного материала можно последовательно записать и независимо считать каждую из множества различных голограмм.

В последнее время предложен целый ряд методов мультиплексирования [29] (рис. 2.39):

- 1) угловое (angle multiplexing),
- 2) частотное (wavelength multiplexing),
- 3) конфокальное (confocal multiplexing),
- 4) сдвиговое (shift multiplexing),
- 5) корреляционное (correlation).

На рис. 2.39 схематично представлены различные методы мультиплексирования и их комбинации: *a* — угловое мультиплексирование в одной плоскости; *b* — угловое мультиплексирование в другой плоскости; *в* — мультиплексирование «перистрофик», осуществляемое за счет относительного поворота регистрирующей среды и плоскости, включающей параллельный опорный и предметный пучки; *г* — мультиплексирование путем изменения длины волны излучения; *д* — мультиплексирование с помощью фазового кодирования опорного (или предметного) пучка; *e* — сдвиговое мультиплексирование путем смещения опорного сферического пучка в одной плоскости с предметным пучком; *ж* — сдвиговое мультиплексирование путем смещения опорной сферической вол-

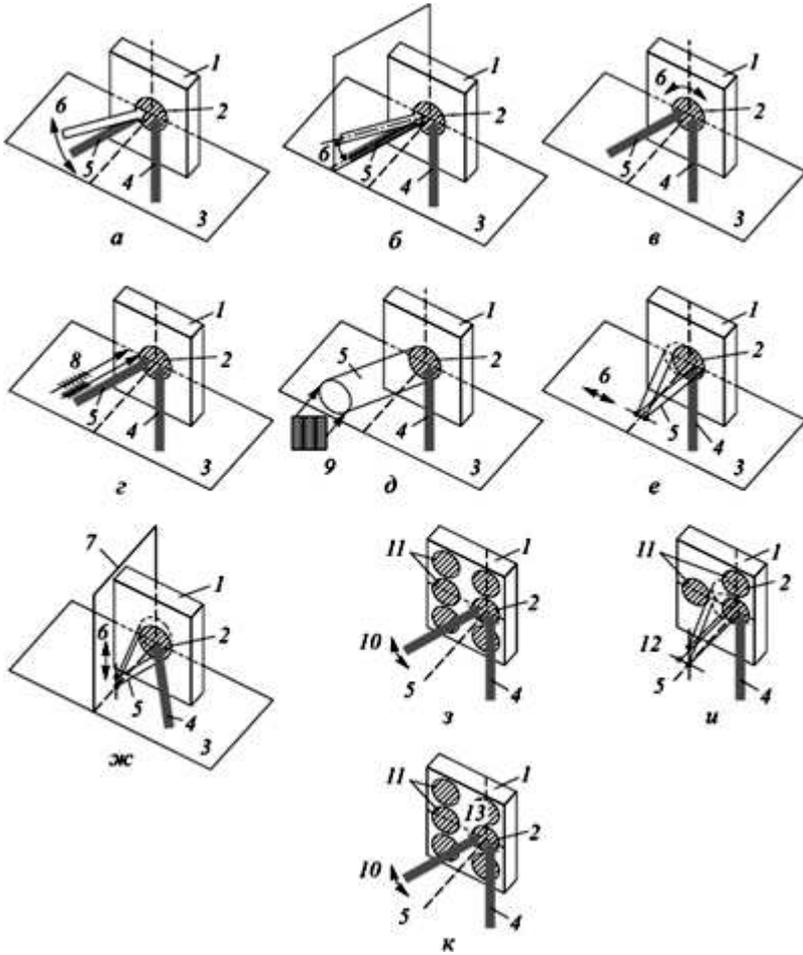


Рис. 2.39. Схемы методов мультиплексирования: 1 — голографический материал; 2 — голограмма; 3 — сигнально-опорная плоскость; 4 — сигнальный пучок; 5 — опорный пучок; 6 — направление мультиплексирования; 7 — плоскость нормали; 8 — изменение длины волны; 9 — изменение фазы; 10 — угол мультиплексирования; 11 — расположение области мультиплексирования; 12 — расположение сдвига мультиплексирования; 13 — мультиплексирование «перистрофик»

ны в перпендикулярной плоскости относительно предметного пучка;  $z$  — комбинирование методов углового мультиплексирования и смещения регистрирующей среды;  $u$  — комбинирование метода сдвигового мультиплексирования и смещения регистрирующей среды;  $k$  — комбинирование методов смещения, углового или «перистрофик».

При сдвиговом мультиплексировании используется сферический опорный пучок излучения, а при корреляционном — пучок еще более сложной формы. Кроме того, поскольку при корреляционном и сдвиговом мультиплексировании задействованы механические движущиеся элементы, время доступа при их применении будет примерно таким же, как и у обычных оптических дисков.

Одним из перспективных и многообещающих направлений мультиплексных записи и считывания голограмм является поляризационное мультиплексирование с использованием так называемых фотоанизотропных материалов, проявляющих эффект фотоиндуцированной оптической анизотропии (оптический дихроизм поглощения и (или) двулучепреломление) при поглощении ими поляризованного излучения.

Методы, в соответствии с которыми используется мультиплексирование голограмм на одном участке регистрирующего слоя, довольно сложны по конструкторской реализации, поскольку требуют наличия большого числа оптических элементов, часть из которых должна быть подвижной.

В Bell Laboratories разработан метод, известный как корреляционное мультиплексирование. Он заключается в том, что оптически сложный опорный пучок, созданный с использованием конкретной оптической архитектуры, «запоминается» в регистрирующем фоточувствительном слое. При этом в объеме данного конкретного участка фоточувствительного слоя в процессе записи серии голограмм возможно мультиплексирование множества различных голограмм только путем трансляционного смещения регистрирующей среды относительно опорного пучка на несколько микрон.

Разрабатываются системы ОГП, в которых используются комбинации нескольких приведенных выше методов мультиплексирования, например «перистрофик», углового и сдвигового мультиплексирования [30]. Наиболее широко используется метод углового мультиплексирования. Запись отдельных микроголограмм в составе мультиплексной голограммы ведется последовательной

регистрацией поля интерференции предметного и опорного пучков излучения в одной и той же области объемной регистрирующей среды при постоянном угле наклона сходящегося предметного пучка и различных углах падения на регистрирующую среду параллельного опорного пучка.

Запись мультиплексных голограмм в отдельных слоях регистрирующей среды может осуществляться в результате смещения среды как в направлении, перпендикулярном плоскости регистрирующей среды, так и в направлении предметного пучка. Указанное смещение сопровождается угловым поворотом регистрирующей среды. В одной из основных модификаций системы голографической памяти этот поворот происходит относительно линии, являющейся линией пересечения регистрирующей среды и плоскости, включающей оси предметного и опорного пучков. В другой модификации поворот регистрирующей среды происходит в плоскости среды относительно точки, являющейся точкой пересечения осей предметного и опорного пучков.

Восстановление отдельных голограмм в составе мультиплексной голограммы осуществляется последовательно пучком, сопряженным с опорным, использовавшимся при записи, при соответствующих пространственных положениях регистрирующей среды. Угловые смещения регистрирующей среды на стадии записи голограмм обеспечивают на стадии их восстановления отсутствие перекрестных помех от соседних мультиплексных голограмм, находящихся в области прохождения восстанавливающего пучка.

Следует отметить следующие недостатки систем, использующих приведенные выше методы мультиплексирования. Реализация этих методов предполагает наличие достаточно большого количества оптических элементов, большая часть из которых должна быть подвижна, что определяет сложность оптико-механических устройств системы. При этом предполагается использование объемных регистрирующих сред для записи мультиплексных голограмм, обладающих угловой и спектральной селективностью, достаточной для раздельного восстановления изображений с отдельных голограмм. Кроме того, восстановление голограмм в составе мультиплексных голограмм осуществляется последовательно, что снижает скорость воспроизведения информации.

Допустимое число пересекающихся — наложенных в общем объеме фоточувствительной среды — субголограмм ограничено

требованием к минимально допустимым значениям дифракционной эффективности каждой субголограммы и отношения сигнал/шум при регистрации восстановленного с каждой субголограммы изображения. С увеличением числа наложенных субголограмм в любой фоточувствительной среде дифракционная эффективность каждой последующей субголограммы будет снижаться, если не использовать специальных методов принудительного ограничения дифракционной эффективности голограмм. Эти методы позволяют получать заданное наперед число наложенных субголограмм с равной, но не максимальной дифракционной эффективностью. Значение отношения сигнал/шум в восстанавливаемых изображениях с увеличением числа наложенных голограмм также всегда снижается, причем как у наложенной субголограммы, так и у ранее записанных. Этот эффект называют перекрестной помехой.

Основными характеристиками регистрирующей фоточувствительной среды являются динамический диапазон  $M^\#$  и толщина слоя фоточувствительного материала  $T$  [28]. Для фоточувствительных сред, используемых в голографии, динамический диапазон принято определять следующим образом:

$$M^\# = \sum_{i=1}^M \sqrt{\eta_{i\max}}, \quad (2.36)$$

где  $M$  — число голограмм, мультиплексируемых в объеме среды,  $\eta_{i\max}$  — максимальная дифракционная эффективность  $i$ -й субголограммы.

Основываясь на таком представлении динамического диапазона среды, через  $M^\#$  можно выразить среднюю дифракционную эффективность субголограммы  $\eta$ , которую можно получить на данном материале при заданном числе  $M$  мультиплексных субголограмм:

$$\eta = \left( \frac{M^\#}{M} \right)^2. \quad (2.37)$$

Связь количества мультиплексных голограмм с толщиной  $T$  слоя фоточувствительного элемента выражается зависимостью

$$M = \Delta n T / \lambda \cos(\theta_{0i}), \quad (2.38)$$

где  $\Delta n$  — максимальное изменение показателя преломления среды в процессе регистрации голограммы,  $\theta_{0i}$  — половинный угол между интерферирующими пучками.

Для определения емкости носителя голографической памяти необходимо знать линейные размеры носителя голограмм: для диска — внутренний ( $D_1$ ) и внешний ( $D_2$ ) диаметры зоны записи, для пластины — ширину ( $L_1$ ) и высоту ( $L_2$ ). Тогда площадь зоны записи  $S_{33}$  (мм<sup>2</sup>) на носителе выражается формулами:

$$\text{для диска — } S_{33} = S_{\text{диска}} = 0,25\pi(D_2 - D_1)^2 \approx 0,79(D_2 - D_1)^2;$$

$$\text{для пластины — } S_{33} = S_{\text{пласт}} = L_1 L_2.$$

Геометрия каждой голограммы может быть описана ее диаметром  $D_{\text{гол}}$  (мкм) или площадью  $S_{\text{гол}}$  (мкм<sup>2</sup>). В зависимости от формы упаковки голограмм в зоне записи на носителе будет занята не вся площадь, что можно описать, вводя коэффициент плотности упаковки голограмм на носителе  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{KS_{\text{гол}}}{S_{33}}, \tag{2.39}$$

где  $K$  — максимальное число голограмм, размещающихся при выбранном методе их упаковки на носителе площадью  $S_{33}$ .

Каждая голограмма получается путем мультиплексирования  $M$  микроголограмм. Микроголограмма содержит одну страницу цифровых данных. Объем информации  $\rho$ , содержащийся в одной странице данных, может достигать нескольких миллионов бит. Емкость голограммы  $C_{\text{гол}}$  (бит/мкм<sup>2</sup>) можно выразить следующим образом:

$$C_{\text{гол}} = \frac{M\rho}{S_{\text{гол}}}. \tag{2.40}$$

Емкость носителя голографической памяти  $C$  (бит/мкм<sup>2</sup>) будет описываться формулой

$$C = \frac{KM\rho}{S_{33}} = \gamma C_{\text{гол}}. \tag{2.41}$$

Нужно отметить, что в емкости носителя голографической памяти учитывается вся информация, включающая пользовательские данные, избыточные данные для безошибочного восстановления пользовательской информации и технические данные для

осуществления коррекции и позиционирования системы считывания информации. В практически реализованных современных системах такого типа доля непользовательских данных в общем объеме информации, хранимой на носителе голограмм, составляет больше его половины.

Для систем долговременной памяти принято считать  $BER = 10^{-4} \dots 10^{-3}$  допустимым значением для «сырых» данных, т.е. до восстановления информации с помощью помехоустойчивых кодов, позволяющих получить на выходе пользовательскую информацию с  $BER = 10^{-14} \dots 10^{-15}$ , т.е. один ошибочный бит на 113 ТБ пользовательской информации.

### **2.4.1. Метод углового мультиплексирования и оптические схемы записи и считывания информации с микроголограмм Фурье на основе многоканальных оптических головок**

В настоящем разделе рассматриваются пути создания голографической памяти на основе тонкой регистрирующей среды (галогенидосеребряных или фотополимерных материалов), с минимальным числом оптико-механических устройств перемещения и возможностью параллельного считывания информации.

Для разработки устройства голографической памяти с высокой информационной емкостью и высокой скоростью считывания информации предлагается метод мультиплексирования, согласно которому при регистрации субголограмм обеспечивается перпендикулярное падение опорного пучка на поверхность регистрирующей среды и наклонное падение предметных пучков (с числом пучков, равных числу наложенных субголограмм) при их концентрическом положении относительно оси опорного пучка [31—35].

На рис. 2.40 представлена оптическая схема устройства записи мультиплексных голограмм с использованием многоканальной записывающей оптической головки с числом каналов, соответствующим числу субголограмм в мультиплексной голограмме (до 20), при их концентрическом положении относительно оси опорного пучка. Здесь излучение лазера 1 после прохождения через окно

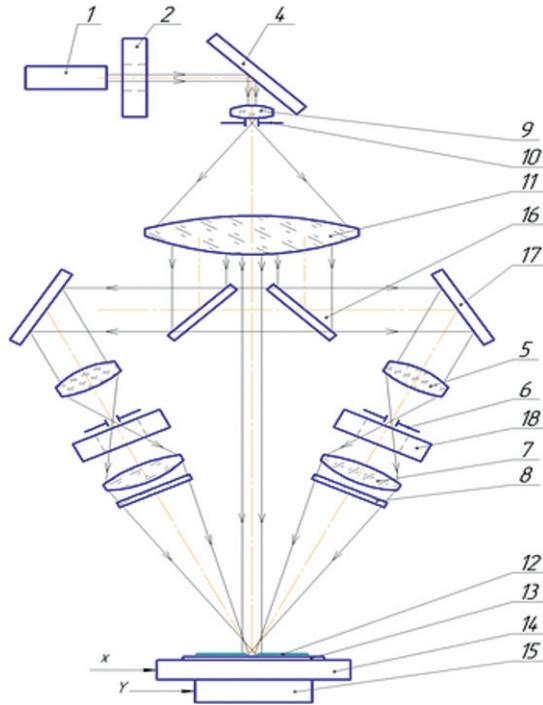


Рис. 2.40. Устройство записи мультиплексных голограмм в системе архивной оптико-голографической памяти с использованием многоканальной записывающей головки

затвора 2 и отражения плоским зеркалом 4 расширяется и фильтруется системой в составе микрообъектива 9 и точечной диафрагмы 10 и затем коллимируется объективом 11.

В схеме осуществляется пространственное деление общего коллимированного пучка излучения на опорный и предметные пучки по числу каналов записывающей головки. Для простоты изображения на оптической схеме (рис. 2.40) представлены только два диаметрально противоположных канала многоканальной записывающей головки. Центральная часть коллимированного пучка используется в качестве опорного пучка, падающего на фоточувствительную среду перпендикулярно ее поверхности. Периферийная кольцевая часть коллимированного пучка системой

зеркал 16 и 17 распределяется по каналам многоканальной записывающей головки, расположенным симметрично относительно оси опорного пучка. В каждом из каналов излучение фильтруется системой в составе объектива 5 и точечной диафрагмы 6 и после прохождения через окно затвора 18 поступает на фурье-преобразующий объектив 7 и пространственный модулятор света (ПМС) 8. Голографическая запись информации осуществляется путем последовательной регистрации поля интерференции на фоточувствительной пластинке 13 в области пересечения предметных и опорного пучков на площади, ограниченной диафрагмой 12. Электронное управление работой затворов обеспечивает последовательную быструю запись субголограмм при поочередном открытии затворов 18. Для записи всего массива мультиплексных голограмм осуществляется перемещение регистрирующей пластинки фотопластинки в плоскости, совпадающей с ее поверхностью, по координатам X и Y с помощью двухкоординатного устройства перемещения в составе частей 14 и 15.

На рис. 2.41 показана 3D-модель конструкции одного канала оптической головки оптико-электронного устройства (ОЭУ) для записи матрицы микроголограмм на голографическом носителе формата А4 (вид спереди), работающем в «старт-стопном» режиме перемещений.

Одиночный канал оптической головки состоит из следующих компонентов: 1 — полупроводниковый лазер с отклоняющим зеркалом; 2 и 9 — быстродействующие электромеханические затворы; 3 — оптическая система расширения лазерного пучка, включающая микрообъектив с пинхолом (точечной диафрагмой) и коллимирующий объектив; 4 — фокусирующий объектив; 5 — барабан с 20 наклонными зеркалами; 6 — коллимирующий объектив с пинхолом (точечной диафрагмой); 7 — четвертьволновая пластинка; 8 — голографический носитель информации формата А4; 10 — зеркало; 11 — микрообъектив с пинхолом (точечной диафрагмой); 12 — фурье-объектив; 13 — ЖК ПМС; 14 — установочная рамка для закрепления голографического носителя информации формата А4; 15 и 16 — устройства для двухкоординатного перемещения голографического носителя информации в «старт-стопном» режиме движений.

Оптико-электронное устройство записи матрицы микроголограмм работает следующим образом. Лазерный пучок от зеркала 1

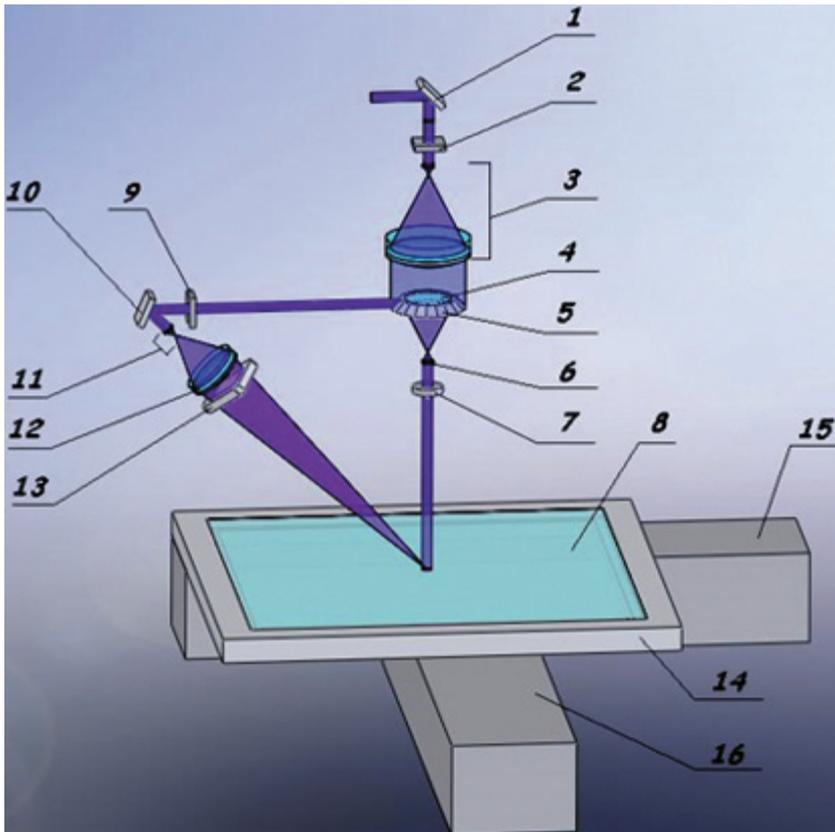
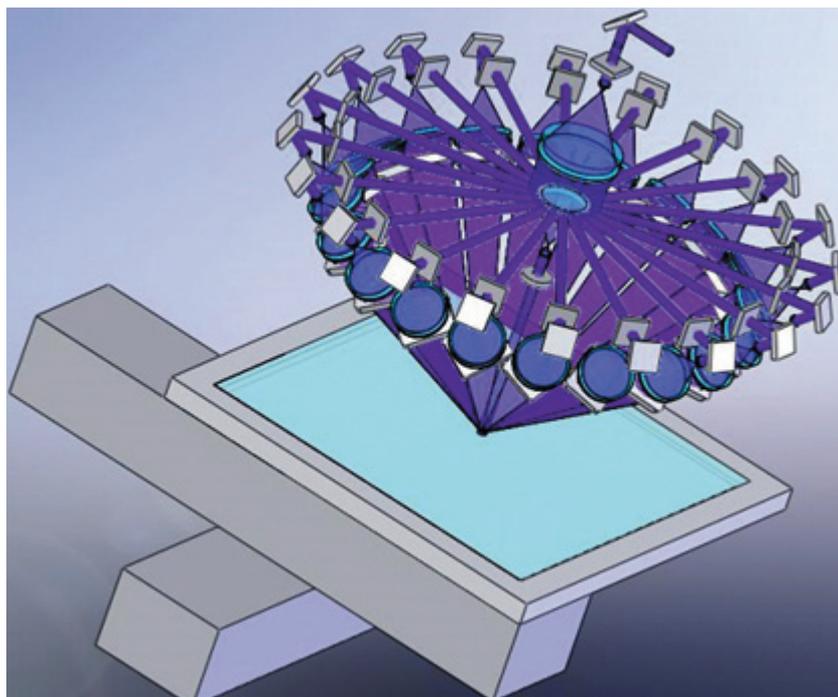


Рис. 2.41. 3D-модель конструкции одного канала оптической головки ОЭУ получения матрицы микроголограмм на голографическом носителе формата А4 (вид спереди)

проходит через электромеханический затвор 2, расширяется до требуемого диаметра оптической системой 3 и освещает фокусирующую линзу 4 с зеркальным барабаном 5. Часть лазерного пучка отклоняется зеркалом, установленным на барабане 5, проходит через затвор 9, отражается от зеркала 10, расширяется до требуемого диаметра микрообъективом 11 с пинхолом и освещает входной зрачок фурье-объектива 12. Сразу за фурье-объективом в сходящемся лазерном пучке установлен ЖК ПМС, который

формирует пространственно-частотный спектр (ПЧС) транспаранта с входной информацией в задней фокальной плоскости фурье-объектива, совпадающей с плоскостью фотопластинки 8. Другая часть лазерного пучка фокусируется линзой 4, проходит через пинхол с микрообъективом 6 и четвертьволновую пластинку 7 и попадает в место, где был сформирован ПЧС транспаранта. В результате внутри области ориентировочно диаметром 0,6—1 мм на голографической фотопластинке 8 записывается одна субголограмма.

На рис. 2.42 показана 3D-модель конструкции 20-канальной оптической ОЭУ записи матрицы микроголограмм на голографическом носителе формата А4.



**Рис. 2.42.** 3D-модель конструкции 20-канальной оптической головки ОЭУ получения матрицы микроголограмм на голографическом носителе формата А4 (вид сбоку)

В табл. 2.1 приведены основные параметры оптико-электронного устройства записи матрицы микроголограмм на голографический носитель формата А4, работающего в «старт-стопном» режиме перемещений.

Таблица 2.1

Размер голографического носителя (фотопластинки) формата А4	280 × 200 мм	280 × 200 мм
Диаметр одной микроголограммы (равен периоду расположения субголограмм)	<b>0,6 мм</b>	<b>1,0 мм</b> (с учетом введения синхродорожек)
Количество оптических каналов в записывающей головке	20 каналов	20 каналов
Количество субголограмм в одной микроголограмме	20 шт.	20 шт.
Общее количество субголограмм в матрице микроголограмм при методе мультиплексирования «перистрофик»	$(280:0,6) \times (200:0,6) \times 20 = 3\ 103\ 560$ шт.	$(280 \times 200) \times 20 = 1\ 120\ 000$ шт
Количество информации на одной субголограмме при ЖК-ПМС с размерностью 1920 × 1200 пикс.	[(1900 × 1100 пикс.) : 4 увел. пикс.] : 2 парафаз. код. = 261 250 пикс. = 0,26 Мб	[(1900 × 1100 пикс.) : 4 увел. пикс.] : 2 парафаз. код. = 261 250 пикс. = 0,26 Мб
Общее количество информации на голографическом носителе формата А4	$(0,26\ Мб \times 3\ 103\ 560) = 810\ Гб$ или 100 ГБ	$(0,26\ Мб \times 1\ 120\ 000) = 291\ Гб$ или 36,4 ГБ
Время экспонирования одной субголограммы	1 мс	1 мс
Время механического поворота при перезаписи от одной субголограммы к другой (с учетом времени отстоя)	30 мс	30 мс
Время механического смещения на период от одной до другой микроголограммы (с учетом времени отстоя)	30 мс	30 мс

Таблица 2.1. (Окончание)

Суммарное время записи цифровой информации на голографический носитель А4	$3103560 \text{ шт.} \times (30 \text{ мс} + 30 \text{ мс}) = 51 \text{ час}$	$1120000 \text{ шт.} \times (30 \text{ мс} + 30 \text{ мс}) = 18,6 \text{ часов}$
Скорость ввода информации на ЖК-ПМС	$(0,26 \text{ Мб} : 30 \text{ мс}) = 8,6 \text{ Мб/с}$	$(0,26 \text{ Мб} : 30 \text{ мс}) = 8,6 \text{ Мб/с}$
Скорость ввода потока цифровой информации в устройство записи матрицы микроголограмм (с учетом буферного ОЗУ на 3 кадра)	$(0,26 \text{ Мб} : 30 \text{ мс}) \times 3 = 25,8 \text{ Мб/с}$	$(0,26 \text{ Мб} : 30 \text{ мс}) \times 3 = 25,8 \text{ Мб/с}$

При считывании информации с мультиплексной голограммы, записанной с помощью данного устройства записи, пучки излучения со всех субголограмм, составляющих мультиплексную голограмму, восстанавливаются одновременно при том, что эти пучки являются пространственно разделенными. Считывание информации осуществляется с помощью многоканальной считывающей оптической головки с числом фотоприемных каналов считывания, равным числу записанных субголограмм.

На рис. 2.43 показана 3D-модель конструкции одного канала оптической головки ОЭУ считывания цифровой видеоинформации с голографического носителя формата А4 (вид спереди)

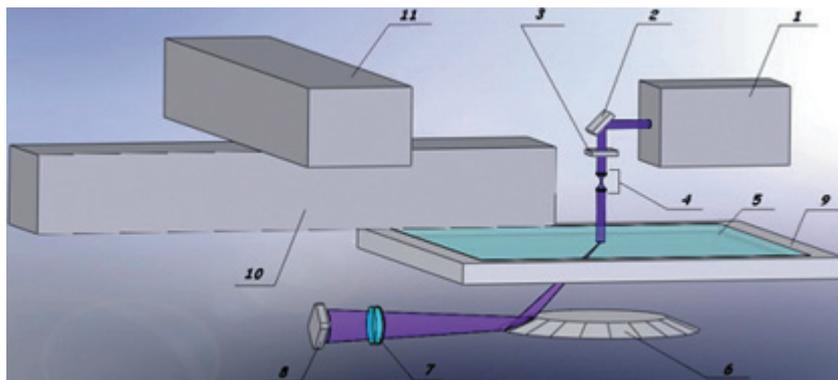


Рис. 2.43. 3D-модель конструкции одного канала оптической головки ОЭУ считывания цифровой видеоинформации с голографического носителя формата А4 (вид спереди)

ции с голографического носителя формата А4 (вид спереди), работающего в режиме непрерывного сканирования.

Одиночный канал оптической головки состоит из следующих компонентов: 1 — полупроводниковый лазер (синий или красный в зависимости от применений и стоимости); 2 — зеркало; 3 — быстродействующий электромеханический затвор; 4 — оптическая система расширения лазерного пучка, включающая микрообъектив с пинхолом (точечной дифракмой) и коллимирующий объектив; 5 — голографический носитель информации формата А4; 6 — барабан с 20 наклонными зеркалами; 7 — оптическая система согласования апертур; 8 — матричный приемник изображений с электронным драйвером считывания и обработки информации; 9 — держатель голографического носителя информации; 10 и 11 — устройство для двухкоординатного перемещения голографического носителя информации, работающее в режиме непрерывного сканирования.

На рис. 2.44 представлено 3D-изображение многоканальной считывающей головки, где 1 — лазер, 2 — оптическая система

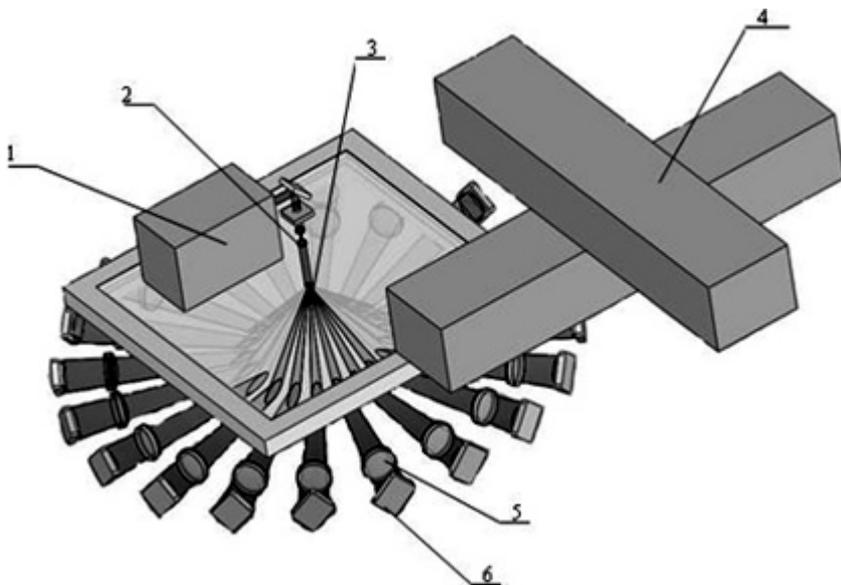


Рис. 2.44. 3D-изображение конструкции 20-канальной оптической считывающей головки ОГП



формирования считывающего пучка, 3 — матрица мультиплексных голограмм, 4 — 2-координатное устройство перемещения, 5 — оптическая система считывающего канала, 6 — фотоприемное устройство на основе видеокамеры.

В табл. 2.2 приведены основные параметры опико-электронного устройства считывания матрицы микроголограмм с голографического носителя формата А4, записанного в «старт-стопном» режиме и считываемого в непрерывном режиме сканирования.

**Таблица 2.2**

Диаметр одной микроголограммы / диаметр пучка считывающего лазерного излучения	<b>0,6 мм / 0,6 мм</b>	1,0 мм / 1,0 мм
Суммарное количество микроголограмм/ субголограмм в матрице	155178 шт. / 3 103 560 шт.	56000 шт. / 1120000 шт.
Число каналов, одновременно считываемых с 20 субголограмм (т.е. одной микроголограммы)	20 каналов	20 каналов
Общее количество цифровой информации на голографическом носителе	810 Гб или 100 ГБ	291 Гб или 36,4 ГБ
Размерность матричного приемника изображений (МПИ)	1600 × 1200 пикс.	1600 × 1200 пикс.
Информационная емкость одной страницы данных цифровой информации в считанном изображении (с одной субголограммы)	0,26 Мб	0,26 Мб
Информационная емкость страницы данных цифровой информации после парафазного декодирования считанного изображения с одной субголограммы	(0,26 Мб × 4) = = 1,04 Мб	(0,26 Мб × 4) = = 1,04 Мб

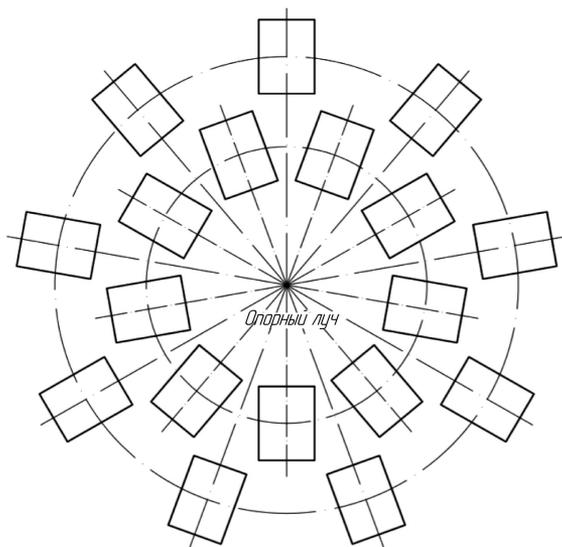
Таблица 2.2. (Окончание)

Время считывания цифровой информации одновременно с 20 субголограмм (с учетом обработки в компьютере)	30 мс	30 мс
Время обработки цифровой информации считанного изображения в компьютере (одновременно с 20 субголограмм)	30 мс (параллельно со временем вывода информации с МПИ)	30 мс (параллельно со временем вывода информации с МПИ)
Скорость вывода обработанной страницы данных считанного изображения в компьютере (одновременно с 20 субголограмм)	$(1,04 \text{ Мб} : 30 \text{ мс}) =$ $= 34,6 \text{ Мб/с}$	$(1,04 \text{ Мб} : 30 \text{ мс}) =$ $= 34,6 \text{ Мб/с}$
Суммарное время считывания матрицы микроголограмм (при считывании одновременно 20 субголограмм и с учетом обработки в компьютере)	$155178 \text{ шт.} \times 30 \text{ мс} =$ $= 4655 \text{ с.} =$ $= 1,3 \text{ часа}$	$56000 \text{ шт.} \times 30 \text{ мс} =$ $= 1680 \text{ с.} = 28 \text{ мин.}$

При использовании тонкослойной записывающей среды в описанной схеме при считывании информации в каждом канале восстанавливаются два изображения (плюс первый и минус первый дифракционные порядки), в результате чего диаметрально противоположные каналы создают помехи друг другу. Для устранения этого недостатка угловое расстояние от нормали к поверхности фоточувствительной среды у этих двух каналов делается разным, чтобы минус первый порядок одного канала не накладывался на плюс первый другого.

На рис. 2.45 приведен габаритный чертеж 19-канальной оптической головки для записи матрицы микроголограмм на голографическом носителе формата А4. Видно, что четные каналы (внешнего радиуса А) и нечетные каналы (внутреннего радиуса Б) имеют разное положение и их дополнительные порядки дифракции при восстановлении не будут накладываться.

Таким образом, построение устройства ОГП по предложенному методу мультиплексирования и использование в устройстве



**Рис. 2.45.** Габаритный чертеж многоканальной оптической головки получения матрицы микроголограмм на голографическом носителе формата А4

многоканальной оптической головки записи, а при последующем считывании — многоканальной считывающей оптической головки при одновременной работе каналов на стадии считывания, во-первых, позволяет устранить вращение регистрирующей среды, тем самым упростить систему и уменьшить требования к ее механической стабильности, во-вторых, позволяет реализовать параллельный процесс считывания отдельных субголограмм, что обеспечивает соответственно более высокие скорости считывания информации.

Реализация этого метода, предполагающего использование многоканальных головок для голографической записи и считывания информации, не является излишне экономически затратной в связи с возможностью изготовления отдельных каналов головок с применением недорогих элементов, как чисто оптических (зеркала, малогабаритные объективы), так и ПМС и фотоприемных матричных устройств, при отсутствии прецизионных электромеханических узлов вращения и перемещения элементов.

Предложенный авторами модифицированный метод мультиплексирования «перистрофик» позволяет обеспечить достаточно высокую скорость считывания информации, а также исключить вращательное движение элементов устройства, уменьшив тем самым требования к стабильности системы, и упростить конструкцию устройства голографической памяти.

Предложенный метод обеспечивает возможность использования относительно тонких регистрирующих сред, как, например, серийно выпускаемые отечественной промышленностью галогенидосеребряные материалы.

## **2.5. Современное состояние в области разработки систем оптико-голографической мультигигабайтной памяти**

Ранее развитие систем ОГП было затруднено отсутствием коммерчески пригодных для их производства элементов и компонентов, соответствующих голографической мультиплексной стратегии и, что наиболее важно, отсутствием фоточувствительных регистрирующих материалов, в полной мере удовлетворяющих требованиям ОГП. Последние достижения в разработке этих компонентов возобновили интерес к технологии ОГП.

Вместе с тем, несмотря на то что в настоящее время компоненты ОГП достаточно доступны по сравнению с 1960-ми годами, до сих пор существует ряд нерешенных технических проблем. Так, например, при записи множества страниц информации в одном участке голографической среды яркость каждой из голограмм существенно падает, а при некотором отклонении конфигурации считывающего пучка от пучка, использовавшегося при записи, возможно возникновение фоновых искажений информационной станицы. Тем не менее ОГП-системы имеют информационную емкость, приблизительно в 27 раз превышающую емкость современных 4,7 ГБ DVD-систем, при этом скорость считывания в 25 раз превышает скорость считывания DVD-проигрывателей.

Оглядываясь назад, даже Билл Уилсон (Bill Wilson), директор по научной части InPhase, как он сам признался, долгое время на

заре своей научной карьеры считал практическую реализацию голографической памяти неосуществимой. В 1987 г. после получения докторской степени по физической химии в Стэнфордском университете он пришел в Bell Labs, чтобы заняться голографическими устройствами хранения информации, полагая, что его изыскания будут носить сугубо научную, но не производственную направленность [36].

В начале 90-х были обнаружены физические пределы использования технологий магнитной записи, поэтому новые методы записи и хранения информации стали вызывать большой интерес. Первой тревогу забила IBM, которая сама внесла огромный вклад в разработку технологий записи на жестких дисках. Внимание многих исследователей, и в том числе в Bell Labs, сосредоточилось на голографических технологиях, поскольку к тому моменту начали появляться необходимые регистрирующие среды и оптические компоненты достаточно малых размеров, в том числе миниатюрные когерентные лазеры, пространственные модуляторы света, матричные фотоприемники (камеры) и соответствующее программное обеспечение для коррекции ошибок при записи и воспроизведении цифровых бит.

В результате Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) и такие гиганты в области высоких технологий, как IBM и Lucent, Bell Labs, Aprilis — дочерняя структура Polaroid и другие, возродили разработки голографической памяти.

Рост активности зарубежных исследований в области трехмерной голографической памяти наблюдается с 1994 года. Так, в это время в США при лидирующей роли *IBM Almaden Research Center (San Jose)*, начали работать два объединенных исследовательских коллектива из специалистов 12 промышленных, государственных и университетских организаций по реализации проекта создания голографической памяти со сверхплотной упаковкой данных. Первый из них — консорциум *PRISM (Photorefractive Information Storage Materials)* — ориентирован на поиск и исследование фоторефрактивных материалов как голографических объемных сред для записи и хранения данных; второй — *HDSS (Holographic Data Storage Systems)* — на разработку архитектуры перспективной странично-организованной голографической памяти и ее оптоэлектронной элементной базы.

К 2010 году в области разработчиков систем ОГП образовались две мощные группы компаний: с одной стороны, это альянс

InPhase, Hitachi Maxell и Bayer Material Science (и, по некоторым данным, Imation), а с другой — Optware, CMC Magnetics, Fuji Photo Film, Nippon Paint, Pulstec Industrial и Toagosei, сформировавшие консорциум Holographic Versatile Disc (HVD) Alliance. Последний будет заниматься продвижением голографических носителей формата HVD, которые предположительно смогут вмещать до 1 ТБ данных.

Также в списке разработчиков ОГП стоит упомянуть японскую компанию NTT, разработавшую свой собственный голографический носитель Info-MICA (Information-Multilayered Imprinted CArd) на основе пластика для коммерческих применений в бытовой технике, в первую очередь для обычных и карманных персональных компьютеров, а также мобильных телефонов [37]. Тип памяти NTT имеет маленькие размеры, она дешева в производстве, легко утилизируется и очень сложно копируется. Устройства для чтения Info-MICA также очень компактны и потребляют мало энергии. По предварительным расчетам NTT, флеш-карты голопамяти будут стоить порядка 10 долларов, а устройства чтения — около 200 долларов США. В NTT продолжают работать над реализацией перезаписываемого носителя для ОГП на основе реверсивных регистрирующих сред в виде пластиковых карт с информационной емкостью до 10 Гб.

Для записи информации на Info-MICA используется технология тонкопленочной *наноголографии*. Данная технология позволяет использовать для производства носителей дешевые материалы. В будущем — конкуренция с современными флеш-дисками, емкость которых примерно такая же. Продемонстрированный прототип сделан из прозрачного пластика, имеет размеры почтовой марки и насчитывает 100 слоев. Данные хранятся в виде двухмерных изображений, которые переносятся на слои с помощью технологии CGH (Computer Generated Hologram). При чтении лазер воссоздает первоначальный рисунок на слое, считываемый затем с помощью оптического сенсора для последующей расшифровки.

Также в Европе работами в области оптической и, в частности, голографической памяти занимаются достаточно много исследовательских групп, находящихся в основном в университетах. Их усилия объединены в проекте COST Action P8, целью которого является расширение знаний в области разработки материалов для оптической памяти, определения ее оптимальных параметров,

методов кодирования/декодирования и конструкций для будущих применений в промышленности и для социальных, культурных и экономических нужд.

### 2.5.1. Разработки оптико-голографической системы памяти компаний InPhase, Akonia

**Компания InPhase.** На сегодняшний день наибольших успехов достигла команда разработчиков из США, которая основала в декабре 2000 года компанию InPhase. Компания InPhase смогла при помощи современных материалов и устройств реализовать возможности голографии на принципиально новом техническом уровне, первой объявила о разработке опытного образца и наиболее близко подошла к реализации данной технологии в массовых устройствах хранения данных.

В сентябре — октябре 2006 г. американская компания InPhase Technologies, специализирующаяся на исследованиях в области голографических способов хранения информации, совместно со своим японским партнером Hitachi Maxell объявила о завершении работы над WORM-дисками, информация на которых записывается с использованием интерференции света посредством классической двухлучевой схемы, а также технологии углового мультиплексирования — поляризационного политопического мультиплексирования [38]. Эти фирмы обещали выпустить свои первые голографические дисководы и WORM-диски размером 5,25 дюйма с возможностью однократной записи емкостью 300 ГБ со скоростью передачи данных 160 Мб/с. Это примерно в десять раз быстрее, чем современные устройства записи на обычные DVD. По оценкам специалистов на один такой диск можно будет записать свыше 240 часов видео в телевизионном качестве, более 18 месяцев радиопередач, до 1,6 миллиона цифровых фотографий высокого разрешения либо 780 миллионов страниц А4 с текстом, что сравнимо с библиотекой, состоящей из четырех миллионов томов.

Голографические диски модели Tapestry HDS-300R выпускались компанией Hitachi Maxell на японском заводе в Цукубе из компонентов, поставляемых немецким химическим концерном

Bayer Material Science. Специалисты InPhase разработали особый технологический процесс ZeroWave [39], обеспечивающий производство плоских оптических носителей плоскостностью менее долей микрона при минимальных затратах, что позволило этим носителям быть конкурентоспособными на массовом рынке. Сохранность информации в подобного рода накопителях, по словам производителя, будет гарантирована в течение 50 с лишним лет, что сравнимо с обычными CD-RW, заявленная долговечность которых составляет от 20 до 100 лет в зависимости от производителя.

Первый дисковод типа Tapestry HDS-300R оборудован встроенной системой радиоидентификации (RFID) и использовал диски 300 ГБ с однократной записью, предназначенные для профессионального архивирования. Он имел SCSI-интерфейс со скоростью передачи 20 Мб/с, среднее время доступа 250 мс. Длина волны лазера — 407 нм, объем страницы — 1,4 МБ, вероятность ошибки не превышает 10—15%. Среднее время безотказной работы — 100 000 ч. Носителем служит диск 130 мм, размещенный в картридже размером 5,25 × 6 × 0,25", срок хранения записи — до трех лет, архивного хранения — более 50 лет.

Первой телевизионной сетью, которая дала в эфир видеозапись с голографического WORM-диска, разработанного InPhase Technologies, стала американская компания Turner Network Television. 21 октября 2005 года инженеры обеих фирм записали на диск, изготовленный Hitachi Maxell, рекламное объявление новой технологии. Реклама была в электронном виде считана и перенесена на сервер Turner Network Television, после чего выдана в эфир в строго запланированное время. Кроме того, ролик остается активным и будет выдаваться в эфир каждому, кто будет запрашивать программу передач этой кабельной сети. Первая публичная демонстрация голографических дисков в Японии состоялась на Международной выставке вещательного оборудования (Inter BEE), проходившей с 16 по 18 ноября 2009 г. в Токио.

Главной проблемой, стоявшей перед разработчиками из InPhase Technologies, был поиск подходящего материала для хранения данных. Ученые из Bell Labs работали над этим материалом в течение семи лет, и результатом их исследований стал фотополимерный материал с фирменным названием Tapestry для WORM и ROM голографических носителей информации [40—45], отлича-

ющийся высокой светочувствительностью, широким динамическим диапазоном, оптической прозрачностью, стабильностью пространственных и тепловых характеристик, а также удобством в производстве. Этот материал и использовала компания InPhase Technologies, выделившаяся в свое время из Bell Labs.

Обычно недостатком носителей на базе фотополимерных материалов является их высокая усадка (до 20%) при полимеризации, ограничивающая объем данных, который можно разместить в каждом кубическом сантиметре. В материале Tapestry эту проблему обошли так: этот фотополимер состоит из смеси двух совместимых, но независимо фотополимеризующихся химических компонентов. Диски формируются путем естественной УФ-фотополимеризации одного из компонентов, в результате чего создается практически безупрочная (порядка 0,1%) однородная твердотельная молекулярная структура с равномерно (на молекулярном уровне) распределенной в ней другой светочувствительной в видимой области спектра компонентой. Запись голограммы осуществляется видимым лазерным излучением, после чего осуществляется фиксация (десенсибилизация) записанной информации путем дополнительной равномерной засветки среды тем же излучением.

Был решен и целый ряд других проблем, препятствующих коммерческому использованию голографической записи. В частности, был расширен рабочий температурный диапазон регистрирующего слоя, а в записывающих и считывающих устройствах были применены широко распространенные недорогие лазерные головки с красным и синим лазером. В качестве массивов датчиков в новой технологии выступают серийно выпускаемые приборы с зарядовой связью (CCD — Charge-Coupled Device или ПЗС), которые устанавливаются в цифровых фотоаппаратах и отличаются высоким качеством наряду с приемлемой ценой. В роли пространственных световых модуляторов (SLM) выступают цифровые микрзеркальные и ферроэлектрические модуляторы, применяемые в цифровых телевизорах и видеопроекторах.

К 2010 году компания InPhase Technologies планировала представить голографические диски диаметром 130 мм, емкостью до 1,6 ТБ. А в 2011 году должна была увидеть свет перезаписываемая версия носителя. Однако, несмотря на достижения, описанные выше, компании InPhase Technologies так и не удалось выпустить коммерчески перспективное устройство ОГП. Основной пробле-

мой была цена первых рекордеров, которая, по оценкам представителей разработчика, составит от 12000 до 15000 долларов США.

**Компания Akonia Holographics.** В 2012 году компания InPhase обанкротилась, а все ее активы, в том числе и все оборудование, технология и интеллектуальная собственность, через аукцион перешли компании Akonia Holographics. Благодаря этому исследование и разработка системы архивной голографической памяти коллективом из Bell Labs продолжается и по сей день. В 2015 году на международной конференции Practical Holography — XXIX коллективом был представлен прототип системы голографической памяти второго поколения (рис. 2.46). В новом устройстве был применен ряд новых технологий, позволяющих достичь плотности записи цифровых данных более 31 Гб/мм<sup>2</sup> [49], среди которых выделяются:

- 1) новый материал для записи DRED, показавший увеличение динамического диапазона записи в 6 раз по сравнению с Tapestry;
- 2) динамическое апертурное мультиплексирование, при котором изменяются свойства считывающего пучка при помощи подвижной маски;
- 3) гомодинное квадратурное детектирование [49], которое позволяет снизить нелинейные шумы, связанные с когерентностью считывающего пучка;
- 4) фазово-квадратурное голографическое мультиплексирование, которое позволяет удвоить число записанных голограмм [50].



Рис. 2.46. ОГП Akonia Holographics (США)



В результате авторам удалось продемонстрировать возможность мультиплексной записи 440 субголограмм страниц бинарных данных на одну область диска.

Стоит также упомянуть, что параллельно с этим в Центре инновационных технологий компании Hitachi успешно разрабатывается своя система голографической памяти высокой плотности на основе схемы с угловым мультиплексированием [49]. Авторы используют усовершенствованные методы многоуровневого фазового кодирования страниц данных для увеличения числа мультиплексированных голограмм и заявляют о планах по созданию устройства с плотностью записи до 65 Гб/мм<sup>2</sup>.

### 2.5.2. Разработка оптико-голографической системы памяти компании Optware

Другим лидером в разработке ОГП является японская компания Optware, которая представила новую коллинеарную схему голографической записи информации [50—52]. Компания имеет патенты [53, 54], в том числе на особый пластик для изготовления оптики. Это значительно облегчает построение привода для голографических оптических дисков. Формат Optware получил название Holographic Versatile Disc — HVD. Предполагается, что его информационная емкость превысит разрабатываемые BD и HD DVD оптические дисковые системы.

Основной задачей, стоявшей перед разработчиками OPTWARE, было создание системы ОГП, значительно более компактной по сравнению с системой конкурентов из InPhase. На рис. 2.47 изображена разработанная схема устройства записи. В запатентованной схеме опорный и предметный пучки формируются с помощью одного ПМС и распространяются соосно друг другу, отсюда и название схемы записи — «коллинеарная». Для считывания голограммы используется та же схема, что и при записи, за исключением того, что в этом случае ПМС формирует только опорный пучок, аналогичный использовавшемуся при записи. На рис. 2.48 представлены изображения структур, выводимых на ПМС при записи голограмм (а) и при считывании (б). Мультиплексирование осуществляется путем наложения голограмм со смещением. Достоинством коллинеарной схемы устройства является использование лишь одной

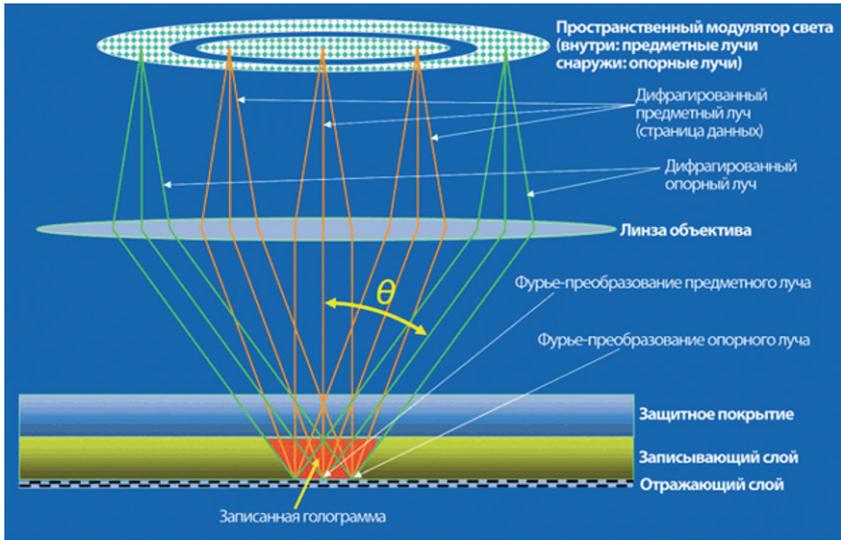


Рис. 2.47. Схема устройства записи страниц данных коллинеарного типа

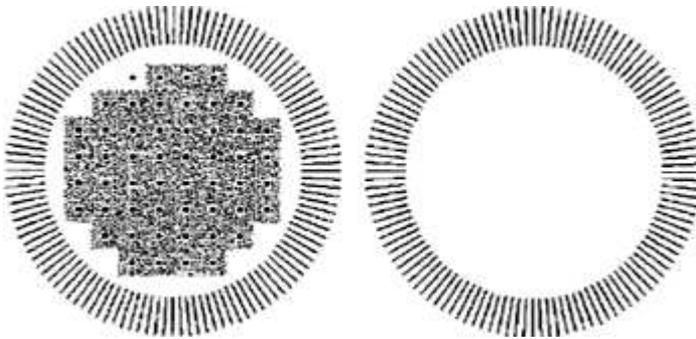
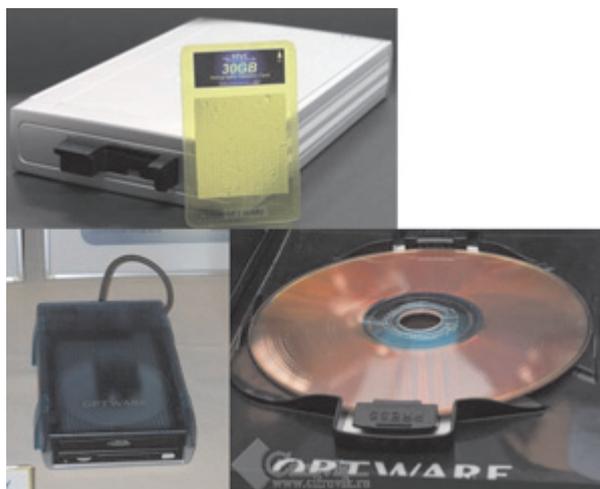


Рис. 2.48. Изображения, выводимые на ПМС при а) записи голограммы страницы данных; б) считывании той же голограммы

объектной линзы, поскольку информационный и опорный пучки сформированы из одного пучка лазера на той же оси, что используется и для чтения, и для записи.

Хотя в плане емкости устройств дальше всех продвинулась компания InPhase, что касается процесса стандартизации, то здесь стоит отметить Optware, которая в феврале 2005 года обратилась с предложением своего метода голографической записи HVD в международную организацию Ecma International, занимающуюся стандартизацией в области информационных и телекоммуникационных технологий.

Основатель и главный технический директор Optware Хидеюши Хоримаи (Hideyoshi Horimai) говорил о том, что в будущем возможно выпускать диски диаметром 120 мм и емкостью до 4 ТБ. В это же время было заявлено, что оптические диски — не единственный носитель, способный хранить данные, записанные голографическим способом. Голографический носитель в формате карт памяти и прототип (макет) картридера для работы с такими картами и саму карточку компания Optware уже продемонстрировала. На рис. 2.49 показан прототип голографического картридера и 30 Гб HVC карточки к нему. Предполагается, что размер демонстрируемой HVC-карты по габаритам равен кредитной карте и может быть доведен до типоразмеров современных



**Рис. 2.49.** Устройство считывания (ридер) фирмы Optware с голографической пластиковой карточкой размером 80 × 50 мм и информационной емкостью 30 Гб

карт флеш-памяти. Коммерческий выпуск NVC карты по цене \$ 1—9 компания Optware предполагала начать в конце 2006 года. При этом цена накопителя не должна была превышать \$ 200.

### **2.5.3. Оптико-голографическая система памяти Института автоматики и электрометрии СО РАН на основе метода многослойной записи/ считывания брэгговских решеток в объемных фоточувствительных средах с многофотонным поглощением**

В Институте автоматики и электрометрии СО РАН был разработан оригинальный метод [55] записи/считывания информации с помощью голографических брэгговских решеток.

Принцип записи/воспроизведения информации в многослойной микроголографической памяти на объемных регистрирующих носителях базируется на двухфотонном механизме записи, гетеродинном детектировании и фазовом кодировании информации. Его можно пояснить с помощью рис. 2.50, где 1 — объемная регистрирующая среда, а 2 — экспонируемый микрообъем вещества. Для этого используются два когерентных сфокусированных пучка света: опорный 3 и гетеродинный 4. Эти пучки, как показано на рисунке, пространственно совмещаются в произвольном слое 11 среды 1, в результате чего в экспонируемом объеме вещества формируется микрорешетка 2. Запись микрорешеток в других областях слоя 11 осуществляется за счет X-, Y- перемещения среды, а в других выше- и нижележащих слоях осуществляется за счет Z-перемещения среды по отношению к области пересечения пучков.

Обнаружение объемных микрорешеток осуществляется путем коллинеарного оптического гетеродинирования. Частота света гетеродинного пучка 4 сдвигается на  $\Delta\omega$  относительно частоты опорного пучка 3, и бегущая интерференционная решетка, образовавшаяся в зоне пересечения пучков 3 и 4, совмещается с решеткой 2, записанной ранее в адресуемом слое 11. Световые пуч-

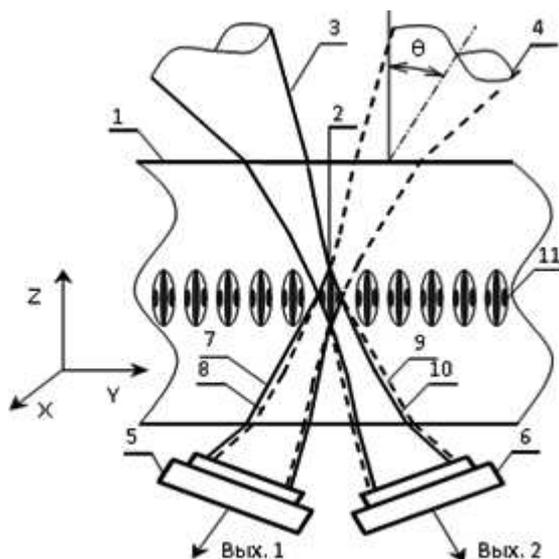


Рис. 2.50. Схема записи и детектирования микрорешеток в объеме среды

ки 7 и 9 образуются в результате дифракции на решетке 2 пучков 3 и 4 соответственно. Вследствие совпадения пространственных частот бегущей и записанной решеток пучок 7 будет распространяться в одном направлении (коллинеарно) с пучком 4, а пучок 9 — с пучком 3.

В результате взаимодействия двух коллинеарных пучков (7, 8) или (9, 10) с различными частотами на выходах фотоприемников 5, 6 появляются фототоки с разностной частотой  $\Delta\omega$ , несущие информацию о наличии (отсутствии) микрорешетки и ее параметрах (амплитуде и фазе). Зондирование микрорешетки происходит только в зоне пересечения остросфокусированных пучков. Поэтому шумы рассеяния регистрирующей среды и оптических элементов, блики и переотражения мало влияют на результаты детектирования.

В данной системе используется так называемое двухфотонное поглощение (ДФП), когда переход атома (молекулы) из одного энергетического состояния в другое с более высокой энергией

происходит при поглощении двух фотонов с одинаковой или разной энергией. В отличие от однофотонного процесса, в котором вероятность поглощения фотона пропорциональна интенсивности излучения, в случае двухфотонного процесса вероятность зависит от квадрата интенсивности. Это позволяет, используя сфокусированные лазерные пучки, пространственно локализовать область, где происходят двухфотонные фотоиндуцированные изменения. Схемы, иллюстрирующие распределение поглощенной энергии по глубине в случае линейного и ДФП, приведены на рис. 2.51. Линейное поглощение характеризуется экспоненциальным затуханием. В случае ДФП, если частота излучения выбрана лежащей в полосе прозрачности материала, а удвоенная частота способна вызвать фотоиндуцированное изменение, поглощение происходит локально — вблизи фокальной плоскости микробиоъектива. Такая локализация создается путем использования импульсных лазеров и фокусирующих объективов с высокой числовой апертурой.

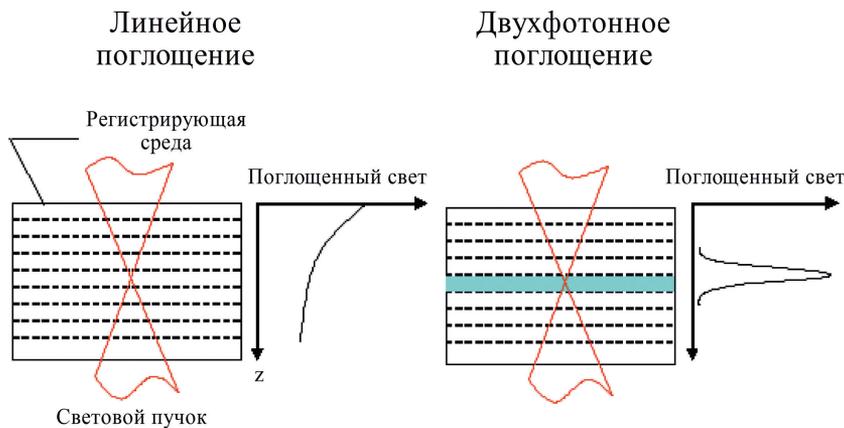


Рис. 2.51. Сравнение распределения по глубине поглощенной энергии светового пучка в случае линейного и двухфотонного поглощения

Следует отметить, что ДФП в большинстве регистрирующих сред начинает проявляться при интенсивности излучения  $\sim 10^7$ — $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>. Однако предельно малый размер информационной

единицы — микроголограммы, используемой в разработанном методе, позволяет применять компактные лазеры с невысокой средней мощностью. Использование ДФП в толстых регистрирующих средах позволяет решить основные проблемы многослойной записи: обеспечить однородную запись во всем объеме среды и неразрушающее считывание.

Схема установки, созданной для проведения многослойной двухфотонной записи и считывания микроголограмм, приведена на рис. 2.52. Перетяжка пучка света полупроводникового лазера 1 оптической схемой 2 переносится в зону акустооптического модулятора 4. Полученные в результате дифракции световые пучки с помощью телескопической системы 5, 6 совмещаются в адресуемом слое регистрирующей среды 7, где записывается образовавшаяся в зоне пересечения пучков 10, 11 интер-

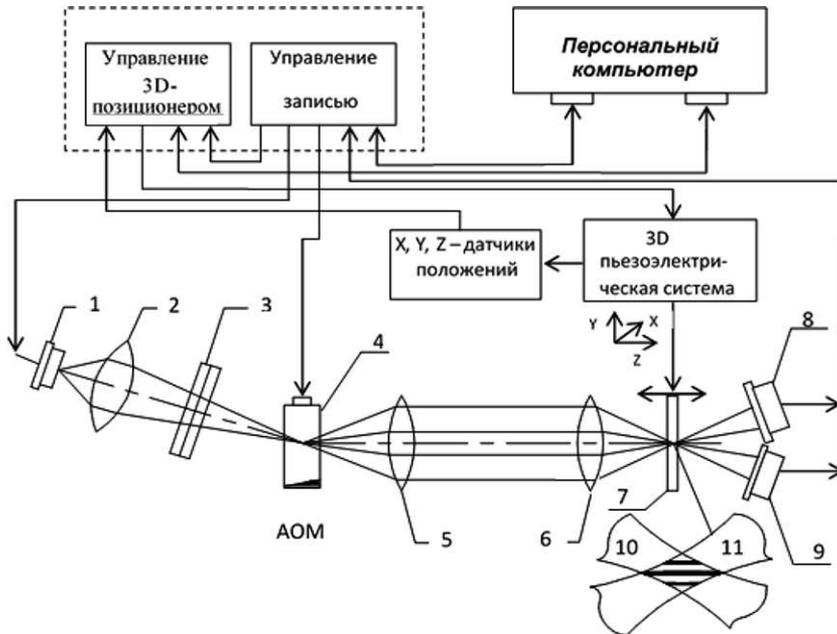


Рис. 2.52. Схема экспериментальной установки для многослойной двухфотонной записи и гетеродинного считывания микроголограмм

ференционная решетка. Размер решетки по глубине среды выбирается гораздо меньше толщины слоя регистрирующей среды. Для записи решеток в других областях и глубинных слоях среда 7 перемещается с помощью трехкоординатного пьезоэлектрического позиционирующего устройства. Управление работой установки осуществляется от персонального компьютера.

Как при записи, так и при гетеродинном детектировании микрорешеток лазер 1 работает в импульсном режиме. При записи частота напряжения управления акустооптическим модулятором (АОМ) кратна частоте следования импульсов света, поэтому изображение бегущей решетки, формируемой в зоне взаимодействия света со звуком, в экспонируемом микрообъеме остается неподвижным. В режиме записи микрорешеток в обоих синтезаторах устанавливается одинаковая частота. При детектировании микрорешеток в первом из синтезаторов устанавливается частота, равная частоте записи, во втором — сдвигается на  $\Delta\omega$  относительно частоты опорного пучка и система автоматизации работает в режиме гетеродинного фотоприемника с двойным преобразованием частоты: в АОМ и в фотоприемнике. При детектировании микроструктур частота следования импульсов лазера 1 устанавливается выше частоты управляющего напряжения АОМ. В результате стробоскопической подсветки бегущей в АОМ ультразвуковой волны на выходе фотоприемника возникает сигнал на разностной частоте. Для обработки сигнала, несущего полную информацию об амплитуде и фазе детектируемой микрорешетки, используются два канала синхронного детектирования. Результаты детектирования с помощью двух аналого-цифровых преобразователей преобразуются в цифровую форму и передаются микроконтроллером в компьютер для дальнейшей обработки.

Для увеличения скорости и плотности записи, а также для повышения степени помехозащищенности использован метод относительной фазовой модуляции. Информационным параметром в этом случае является разность фаз двух рядом расположенных пространственных микрорешеток. При 8-уровневой фазовой модуляции сдвиги фаз между соседними микрорешетками принимают значения  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ , ...  $270^\circ$  и  $315^\circ$ . Это позволяет в каждой информационной микрорешетке проводить запись трехразрядного двоичного слова, увеличивая тем самым в три раза плотность записи и скорость регистрации. Кроме того, фазово-кодированные

данные являются более помехоустойчивыми в сравнении с амплитудно-кодированными.

Фазовый сдвиг микрорешетки в области пересечения пучков осуществляется путем изменения фазы напряжения, подаваемого на АОМ 4.

При гетеродинном детектировании движущаяся в АОМ решетка совмещается с решеткой, ранее зарегистрированной в адресуемом слое. В результате взаимодействия двух коллинеарных пучков с различными частотами света на выходах фотоприемников 8, 9 появляется электрический сигнал с разностной частотой. Путем обработки этого сигнала находят значения амплитуды и фазы микрорешетки.

Таким образом, акустооптический модулятор является одним из важнейших элементов в системе. С его помощью осуществляется 8-уровневая модуляция фазы микрорешеток при записи и сдвиг частоты лазерного излучения при их детектировании. Кроме того, параметры акустооптического модулятора оказывают существенное влияние на такие характеристики системы, как коэффициент полезного использования мощности лазерного пучка, плотность размещения и контраст записываемых микрорешеток, а также уровень перекрытия пучков (а следовательно, уровень помех). АОМ в системе должен работать в режиме дифракции Брэгга с выходными пучками нулевого и первого порядков. В этом случае достигается максимальный КПД по свету, что важно, например, для повышения скорости записи данных. Кроме того, для уменьшения уровня помех степень перекрытия выходных пучков в дальней зоне АОМ должна быть минимальной. Формируемые с помощью данной схемы микрорешетки должны иметь близкое к единице значение контраста и содержать минимальное количество периодов. В этом случае амплитуда информационной составляющей детектируемого сигнала будет иметь наибольшее значение, а запись данных будет проводиться с максимальной плотностью.

Для демонстрации предельных возможностей двухпучкового метода записи/детектирования микрорешеток была проведена запись в 50 глубинных слоях ниобата лития. Число слоев было ограничено малым рабочим отрезком фокусирующего микрообъектива. Расстояние между слоями в среде составляло 12 мкм. Сдвиг фаз между двумя соседними микрорешетками был равен  $\pi$  радиан. Измерения показали, что максимальная дифракционная эффек-

тивность полученных микрорешеток составляет 2,5%. Такое значение дифракционной эффективности соответствует амплитуде модуляции показателя преломления  $\sim 3 \cdot 10^{-3}$ , что является предельной величиной для легированного железом ниобата лития. При значениях  $\lambda = 0,67$  мкм и относительного отверстия микрообъектива  $NA = 0,65$  экспериментальные размеры микрорешеток в ниобате лития составили  $1 \times 1,4 \times 8,5$  мкм<sup>3</sup>.

## Литература

1. Psaltis D. Coherent optical information systems. *Science*. — 2002. — V. 298. — P. 1359—1363.
2. Ashley J. Holographic data storage / J. Ashley, M.-P Bernal, G. W. Burr, H. Coufal, H. Guenther, J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson, B. Marcus, R. M. Macfarlane, R. M. Shelby, and G. T. Sincerbox // *IBM Journal of Research and Developmen*. — 2000. — V. 44. — № 3. — P. 341—368.
3. Curtis K., Dhar L., Hill A., Wilson W. and Ayres M. *Holographic data Storage. From Theory to Practical System*, 1<sup>st</sup> ed., John Wiley & Sons Ltd. — 2010. — P. 248.
4. Standard ECMA-378 Information Interchange on Read-Only Memory Holographic Versatile Disc (HVD-ROM) Capacity: 100 Gbytes per disk, URL: <https://www.ecma-international.org/publications/standards/Ecma-378.htm> (дата обращения: 10.08.2017).
5. *Holographic data storage*. Editors: Coufal, H., Psaltis, D., Sincerbox, G. T. *Springer Series in Optical Sciences*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. — 2000. — V. 76. — P. 489.
6. A. Vander Lugt. Packing Density in Holographic Systems // *Appl. Opt.* — 1975. — V. 14. — P. 1081—1087.
7. Goodman J. W. *Introduction to Fourier Optics*, 2nd ed., McGraw-Hill. — 1996.
8. Gu C. Cross-talk limited storage capacity of volume holographic memory // *J. Opt. Soc. Am. A* 9. — 1992.
9. Várhegyi P. System modeling and optimization of Fourier holographic memory // *Appl. Opt.* 44. — 2005. — P. 3024.
10. Callaghan M. O. Sorting through the lore of phase mask options: performance measures and practical commercial designs // *Proc. SPIE*. 2004. — Vol. 5362. — P. 150.
11. Anderson K. High-Speed Holographic Data Storage at 500 Gbits/in<sup>2</sup> // *SMPTE MOTION IMAGING JOURNAL*. — 2006. — Vol. 115. — № 5/6. — P. 200.

12. Shimura T. Analysis of a collinear holographic storage system: introduction of pixel spread function // *Opt. Lett.* 31. — 2006. — P. 1208.
13. Horimai H. Collinear holography / H. Horimai, X. Tan and J. Li // *Appl. Opt.* 44. — 2005. — P. 2575.
14. Tanaka K. 415 Gbit/in<sup>2</sup> recording in coaxial holographic storage using low-density parity-check codes // *Optical Data Storage*. — 2009. — Proceedings of the SPIE. — Vol. 7505.
15. Orlov S. S. High-Transfer-Rate High-Capacity Holographic Disk Data-Storage System // *Appl. Opt.* 43. — 2004. — P. 4902.
16. Burr G. W. Volume holographic data storage at an areal density of 250 gigapixels/in<sup>2</sup> // *Opt. Lett.* 26. — 2001. — P. 444.
17. Hwang E. Real-time video demonstration of holographic disk data storage system // *Optical Data Storage*. — 2006. — Proc. of SPIE. — Vol. 6282.
18. Bernal M.-P. Balancing Interpixel Cross Talk and Detector Noise to Optimize Areal Density in Holographic Storage Systems // *Appl. Opt.* 37. — 1988. — P. 5377.
19. Gu H. Optimization of the geometrical shape of the aperture in holographic data storage system // *Conf. Quantum Optics, Optical Data Storage, and Advanced Microlithography, Proc. SPIE*. — 2007. — Vol. 6827, 68271I.
20. Gu H. Improving signal-to-noise ratio by use of a cross-shaped aperture in the holographic data storage system // *Appl. Opt.* 48. — 2009. — P. 6234.
21. Joseph J. and Waldman D. A. Homogenized Fourier transform holographic data storage using phase spatial light modulators and methods for recovery of data from the phase image // *Appl. Opt.* 45. — 2006. — P. 6374.
22. Mingzhao He. Novel phase detection method for a holographic data storage system using two interferograms // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 11. — 2009. — 065705.
23. Göröcs Z. Hybrid multinary modulation using a phase modulating spatial light modulator and a low-pass spatial filter // *Opt. Lett.* 32. — 2007. — P. 2336.
24. John R. Content-addressable Holographic Digital Data Storage Based on Hybrid Ternary Modulation with a Twisted-Nematic Liquid-Crystal Spatial Light Modulator / John R., Joseph J., Singh K. // *Optical Review*. — 2005. — Vol. 12. — № 3. — P. 155.
25. Fernández E. Hybrid Ternary Modulation Applied to Multiplexing Holograms in Photopolymers for Data Page Storage // *J. Lightwave Technol.* 28. — 2010. — P. 776.
26. O'Callaghan M. J. Spatial light modulators with integrated phase masks for holographic data storage // *Optical Data Storage 2006, Proc. of SPIE*. — 2006. — Vol. 628208.
27. Przygodda F. Special Phase Mask and Related Data Format for Page-Based Holographic Data Storage Systems // *Optical Review*. — 2009. — Vol. 16. — №. 6. — P. 583.

28. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. Мир. — 1973. — С. 698.
29. Barbastathis G., and Psaltis D., Volume holographic multiplex methods in Holographic data storage // Springer Series in Optical Sciences. — 2000. — P. 21—62.
30. Ju-Seog Jang. Holographic data storage by combined use of peristrophic, angular, and spatial multiplexing / Ju-Seog Jang; Dong-Hak Shin; Youn-Sup Park // Optical Engineering. — 2000. — V. 39. — № 11. — P. 2975—2981.
31. Патент РФ № 80968. G03H 1/00, G11B 7/006, G11B 7/0065. Устройство записи мультиплексных голограмм в системе оптико-голографической памяти / Одинокоев С.Б., Вереникина Н.М., Колесников В.Ю. и др. — Заявл. 24.09.2008 г. Опуол. 27.02.2009. БИ № 6, 2009 г.
32. Одинокоев С.Б. Разработка и исследование метода и оптической системы получения мультиплексных голограмм в системах архивной оптико-голографической памяти // С. Б. Одинокоев, Н.М. Вереникина, В. В. Маркин и др. // Оптический журнал. — 2009. — Т. 76. — № 7. — С. 3—9.
33. Odiнокоев S. B. Research of a method and optical system for recording multiplex holograms in a system of holographic memory // S. B. Odiнокоев, E. A. Usovich, N. M. Verenikina et al. // Proc. SPIE. — 2009. — Vol. 7358, 735816 ; doi:10.1117/12.820514.
34. Метод записи мультиплексных голограмм на тонкослойной регистрирующей среде для архивной мультигигабитной оптико-голографической памяти // Сборник трудов 6-й Международной конференции «ГОЛОЭКСПО-2009», 1—2 июля 2009 г., Украина, г. Киев, с. 102—104.
35. Odiнокоев S. B. Method of record of multiplex holograms on thin registering environment for archival multigigabyte optiс-holographic memory // S. B. Odiнокоев, N. M. Verenikina, D. S. Lushnikov et al. // Proceedings of 6<sup>th</sup> International Conference “HOLOEXPO-2009”, 1—2 July 2009. — Ukraine, Kiev. — P. 104—105.
36. Huang G. T. Holography memory, Technology review. — Sept. 2005. — P. 3—5.
37. WO 2005029399 A1 Optical memory medium and optical memory medium reproducing device.
38. Ken Anderson and Kevin Curtis. Polytopic multiplexing // OPTICS LETTERS. — June 15, 2004. — Vol. 29. — № 12.
39. US6156415.
40. W. I. WILSON. HIGH performance data storage via volume holography // Presented at the THIC Meeting at the National Center for Atmospheric Research. — Boulder CO 80305-5602, June 11—12 (2002).

41. Kevin Curtis. Holographic Data Storage: From Theory to Practical Systems / Kevin Curtis, Lisa Dhar, Adrian Hill, William Wilson, Mark Ayres // John Wiley and Sons Ltd, 2010.
42. US 6,939,648. Optical article and process for forming article, Dhar et al.
43. US 2003.0044691. Process and composition for rapid mass production of holographic recording article.
44. Schnoes M. Holographic data storage media for practical systems.
45. Ayres M. R. Image oversampling for holographic data storage // InPhase Technologies.
46. Mark R. Ayres. Holographic data storage at 2+ Tbit/in<sup>2</sup> / Mark R. Ayres, Ken Anderson, Fred Askham, Brad Sissom, Adam C. Urness // Proc. SPIE 9386, Practical Holography XXIX: Materials and Applications. — March 10, 2015. — 93860G.
47. M. R. Ayres, U.S. Patent 7,623,279. Method for holographic data retrieval by quadrature homodyne detection. — Nov. 24, 2009.
48. M. R. Ayres. Coherent techniques for terabyte holographic data storage // Optical Data Storage Topical Meeting. — ODS 2010. — May 2010 (Invited paper).
49. Kazuyuki Tajima. High-density recording in holographic data storage system by dual 2-level run-length-limited modulation / Kazuyuki Tajima, Yusuke Nakamura, and Taku Hoshizawa // Japanese Journal of Applied Physics. — 2016. — 55, 09SA09.
50. Hideyoshi Horimai, Xiaodi Tan, and Jun Li. Collinear holography // Appl. Opt. 44. — 2005. — P. 2575—2579.
51. Hideyoshi Horimai and Xiaodi Tan. Collinear technology for a holographic versatile disk // Applied Optics. — 2006. — Vol. 45. — Issue 5. — P. 910—914.
52. Koga H. Reconstruction Technique of Collinear Hologram with Holographic Optical Element / H. Koga, P. B. Lim, H. Horimai, and M. Inoue // in Optical Data Storage, OSA Technical Digest Series (CD). — Optical Society of America. — 2007. — Paper TuD3.
53. WO2005038789. Optical information recording method and optical information recording medium. Hideyoshi Horimai. Optware Corp. (JP).
54. P1596376. Optical information recording medium. Hideyoshi Horimai et al. Optware Corp.
55. Беликов А.Ю. Экспериментальные исследования процессов лазерной записи и гетеродинного детектирования микроструктур в объеме регистрирующих сред / А.Ю. Беликов, Н.Н. Вьюхина, В.Н. Затолокин, П.Е. Твердохлеб, А.В. Трубецкой, И.Ш. Штейнберг, Ю.А. Щепеткин // Автометрия. — 2007. — Том 43. — № 1. — С. 76—90.

## **ГЛАВА 3**

# **ТИПЫ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И РЕГИСТРИРУЮЩИХ СРЕД ДЛЯ ОПТИКО- ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМ АРХИВНОЙ ПАМЯТИ**

### **3.1. Требования к параметрам фоточувствительных материалов для систем архивной голографической памяти**

Одна из главных проблем в области хранения голографической информации и одно из основных условий коммерческой реализации архивной ОГП — разработка соответствующих фоточувствительных материалов для регистрации голограмм. Голографические носители должны удовлетворять строгим критериям:

- высокая разрешающая способность;
- расширенный динамический диапазон;
- высокая фоточувствительность;
- безусадочность;
- оптическая прозрачность;
- термо- и влагостойкость;
- неразрушающее считывание;
- низкая стоимость материала;
- низкая удельная стоимость хранения на нем единицы информации;
- технологичность и доступность для серийного изготовления больших партий фоточувствительных материалов требуемой геометрической формы (квадрат, прямоугольник, диск) и требуемой толщины фотоэмульсии;
- длительные сроки хранения изготовленных голограмм без изменения свойств материала и без потери информации (не менее 25 лет).

Разработчики нашли множество материалов: фазовращающие материалы, фоторефрактивные кристаллы типа  $\text{LiNbO}_3$  (ниобат лития), органические полимеры, жидкие кристаллы, полимеры со структурной поверхностью и даже такие экзотические среды, как бактериородопсины в желатиновых матрицах. Самые дешевые в производстве — фотополимеры.

В табл. 3.1 и 3.2 представлены параметры органических и неорганических материалов, используемых в качестве фоточувствительных регистрирующих сред в голографической памяти.

В таблице чувствительность  $S$  определяется как

$$S = \frac{\frac{1}{\eta^2}}{I \cdot t \cdot d} = \frac{\sqrt{n}}{It},$$

где  $\eta$  — дифракционная эффективность,  $I$  — интенсивность,  $T$  — толщина.

Плотность записи  $M^*$  определяется как

$$M^* = \pi \Delta n d / \lambda,$$

где  $\Delta n$  — амплитуда модуляции показателя преломления,  $\lambda$  — длина волны.

Многие научные и производственные группы исследователей направляют свои усилия на разработку новых классов материалов, которые должны удовлетворить жестким критериям для коммерческой реализации этого проекта.

Далее кратко рассматриваются основные физические принципы, свойства, параметры и характеристики наиболее перспективных типов фоточувствительных регистрирующих материалов, которые использовались для голографической памяти [1, 2]:

- а) галогенидосеребряные фоточувствительные материалы;
- б) фотополимерные материалы и композиции;
- в) фоторефрактивные кристаллы;
- г) органические и неорганические среды на основе низкомолекулярных фоточувствительных веществ;
- д) бихромированная желатина;
- е) халькогенидные пленки и стекла.

Таблица 3.1. Параметры органических фоточувствительных регистрирующих сред

Материал/эффект	Тип	Чувствительность		Плотность записи		Время отклика	$\Delta n$	$T$ , мкм	Стабильность	
		Спектральный диапазон, нм	$S$ , см/Дж	л/мм	$M^*$				Перезапись	Срок хранения
Катионоактивное кольцо / фотополимеризация	Об.	514, 532, 650—670	0,5— $6,7 \cdot 10^3$		22		0,01	100—500	нет	
Азобензола жидкие кристаллы и аморфные полимеры / фотоизомеризация	Пл./Об.	488, 514, 532, 633		> 6000			0,3	2—10	да	годы
Азобензола жидкие кристаллы и аморфные полимеры / образование поверхностного рельефа	Пл./Об.	257—532	$10^2$	> 3000		10 с.	0,1	3—5	да	годы
Фотохромные	Пл./Об.	Видимый	$3 \cdot 10$	> 1600		мс		100		
Окрашенные жидкие кристаллы / поверхностная переориентация	Об.	440—514	$3 \cdot 10^3$	> 1000		мс	0,1	10—20	нет	

PDLCPiPS / TIPS / фоторефракция	Пл./Об.	360—532, 770—870		> 1000				20—100	нет PIPS/TIPS да, PR	
PALC / фотохимическое фазовое превращение	Пл./Об.	< 550	10 <sup>4</sup>	> 1000	3,1	100 мкс	0,15	0,2— 1,2	да	
Бактериородопсин в желатиновой матрице	Пл./Об.	520—640	4,7 · · 10 <sup>6</sup>	> 1000	0,34	1— 100 мс	2 · 10 <sup>-3</sup>	30—40	> 10 <sup>6</sup>	> 10 лет
Дихромированная желатина	Об.	< 700	10 <sup>4</sup>	> 5000	2,9		0,022	15—35	нет	годы
Другие фотополимеры	Пл./Об.	< 550	10 <sup>3</sup>	> 5000	2,9	10 с. — 2 мин.	0,012	5—500	нет	
Золь-гель-эмульсия	Об.	< 550	6,3 · · 10 <sup>2</sup>	> 2000	1,2	с.	0,011	100— 1500	нет	
Фотополимер на акриламиде	Об.	510—540, 590—690	8 · 10 <sup>3</sup>	> 3000	3,8	0,1— 0,2 с.	6 · 10 <sup>-3</sup>	65—150	нет	> 10 лет

Таблица 3.2. Параметры неорганических фоточувствительных регистрирующих сред

Материал/ эффект	Тип	Чувствительность		Плотность записи		Время отклика	$\Delta n$	$T$ , мкм	Стабильность	
		Спектральный диапазон, нм	$S$ , см/Дж	л/мм	$M^*$				Переза- пись	Срок хранения
Галоидное серебро	Об./Пл.	< 800	1100	> 7000			0,005	7–8	нет	годы
LiNbO <sub>3</sub>	Об.	350–650 800–1000	0,02–0,1 0,02–40	> 2000	10–20	0,5–20 с.	$2 \cdot 10^{-3}$	$> 10^4$	да	
LiTaO <sub>3</sub>	Об.	300–550		> 2000	> 1	0,1–20 с.	$10^{-3}$	$> 10^4$	да	
KNbO <sub>3</sub>	Об.	400–900	30–3000	> 2000		1 мс – 1 с.	$10^{-4}$	$> 10^4$	да	
Sn <sub>2</sub> P <sub>2</sub> S <sub>6</sub>	Об.	550–1100	1000–5000	> 2000		0,5–500 мс	$3 \cdot 10^{-4}$	$> 10^4$	да	
Bi <sub>2</sub> TeO <sub>5</sub>	Об.	450–550	0,5	> 2000	3	мс	$3 \cdot 10^{-4}$			> 5 лет

## 3.2. Галогенидосеребряные фоточувствительные материалы

В настоящее время в мире имеется целый ряд компаний, которые серийно выпускают фоточувствительные галогенидосеребряные материалы в виде фотопластинок и пленок:

- 1) Colour Holographic (Англия);
- 2) FilmoTech (Германия);
- 3) Ulnimate Holographic (Канада);
- 4) Agfa (Бельгия);
- 5) Konica (Япония);
- 6) Fuji (Япония);
- 7) АО «Компания «Славич» (Россия).

### 3.2.1. Фоточувствительные галогенидосеребряные материалы АО «Компания «Славич»

В России специализированные фотопластины и пленки для голографии на основе галогенидосеребряных фоточувствительных материалов серийно выпускаются с 1974 г. в АО «Компания «Славич» — завод «Микрон» (г. Переславль-Залесский Ярославской обл.) [3]. Ниже кратко приводятся основные сведения по этим материалам.

- 1) Пластины ВРП представляют собой пластины фотографические высокоразрешающие для голографии, предназначенные для изготовления прецизионных фотошаблонов в микроэлектронике, а также для изготовления мастер-голограмм живого объекта и высококачественных отражательных голограмм.
- 2) Пластины ПФГ-01 представляют собой пластины фотографические высокоразрешающие для голографии, предназначенные для получения голограмм по конаправленной и контрнаправленной схеме непрерывным лазером с длиной волны генерации 633 нм для целей неразрушающего контроля изделий, оптической обработки информации, портретной съемки и съемки движущихся объектов.

- 3) Пластины ПФГ-03М представляют собой пластины фотографические высокоразрешающие для голографии, предназначенные для регистрации контрнаправленных отражательных голограмм.
  - 4) Пластины ПФГ-03Ц представляют собой пластины фотографические высокоразрешающие для голографии, предназначенные для изготовления цветных отражательных голограмм.
  - 5) Пластины ПФГ-04 представляют собой пластины фотографические высокоразрешающие для голографии на основе бихромированного желатина, предназначенные для записи трехмерных контр- и конаправленных голограмм.
- Основные параметры и характеристики приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3. Основные параметры и характеристики

Наименование показателя	ВРП	ПФГ-01	ПФГ-03М	ПФГ-03Ц	ПФГ-04
Общая светочувствительность $S_{0,9}$ , ед. ГОСТа	0,012—0,030				
Дифракционная эффективность $\eta$ , %, не менее	35	40	40	40	70
Максимальная плотность на характеристической кривой $D_{\max}$ , Б, не менее	3,0	3,0	3,0	—	—
Коэффициент контрастности $g$ , не менее	5,0	5,0	5,0	—	—
Плотность вуали $D_0$ , Б, не более	0,02	0,02	0,02	0,02	—
Граница области спектральной сенсibilизации, нм, не более	565	650	680	680	565
Максимум спектральной сенсibilизации, нм	$525 \pm 5$	$540 \pm 10$	$625 \pm 10$	$635 \pm 5$ $525 \pm 5$	$635 \pm 5$
Разрешающая способность $R$ , $\text{мм}^{-1}$ , не менее	1570	1570	1570	1570	1570

На рис. 3.1, а, б, в приведены основные характеристики указанных фотоматериалов для фотопластинок ПФГ-03М.

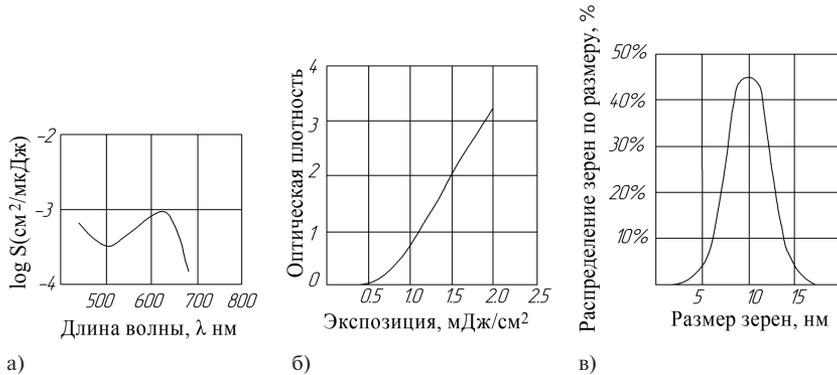


Рис. 3.1. Характеристики фотопластинок ПФГ-03М

Анализ параметров и характеристик указанных галогенидосеребряных фоточувствительных материалов показал, что данные фотопластинки имеют высокую чувствительность, достаточную разрешающую способность, имеют возможность для записи наложенных голограмм с числом мультиплексирования не менее 20.

### 3.3. Фотополимерные материалы

Считается, что в настоящее время фотополимерные материалы достаточно близки для того, чтобы соответствовать всем требованиям для голографических систем памяти. Остановимся на двух основных типах реакций фотополимеризации [4].

При первом типе фотополимеризации молекула фотоинициатора, поглощая квант света с определенным квантовым выходом (как правило, меньше 1), образует реакционноспособные частицы (радикалы или ионы), которые взаимодействуют с мономерными или олигомерными молекулами с образованием полимерных молекул в результате протекания цепной реакции.

Во втором типе реакции фотохимически активными являются структуры на основе макромолекулярных полимеров, содержащих в своем составе (в основной или боковой цепи) реакционноспособные фрагменты, которые в результате прямого или сенсibilизиро-

ванного поглощения квантов оптического излучения образуют новые внутри- или межмолекулярные химические связи, приводящие либо к росту полимерной цепи, либо к образованию «сшивок» (cross-links) между соседними макромолекулами.

Для коммерческого производства были разработаны фотополимерные материалы фирмами DuPont с их HFR-композициями, Polaroid Corporation с DMP128-средами (CROP) и InPhase Technologies с системой Tapestry. Эти материалы достаточно различны по своим механизмам, но близки по своим конечным голографическим свойствам.

Для получения высокой дифракционной эффективности голограмм, записанных на них, желательны среды с высоким изменением показателя преломления  $\Delta n$  и/или большой толщиной слоя. Так, например, для фотополимеризующихся сред, разработанных фирмой Polaroid, величина  $\Delta n$  достигает значения более 0,5. Для фотополимеров фирм DuPont и InPhase эта величина достигает значения около 0,07.

Столь высокое различие в величине модуляции показателя преломления проявляется в том, что материалы фирмы Polaroid способны формировать голограммы с высокой дифракционной эффективностью в тонких (несколько микрон) слоях, в то время как слои фотополимеров DuPont или InPhase должны при этом иметь толщину от 20 мкм до 1 мм. Естественно, тонкие голограммы (Polaroid) и толстые голограммы (DuPont или InPhase) в результате имеют различные степени угловой селективности (different levels of selectivity).

Материалы фирмы Polaroid, подобно слоям бихромированной желатины, после мокрой обработки формируют в слое пустоты. Процесс обработки требует тщательного контроля. По этой причине для последующей обработки после записи фирма предпочитала не позволять пользователям-любителям иметь доступ к DMP128, а предлагала обрабатывать голограммы на их фабрике в Cambridge. В этом заключается преимущество фотополимеров, разработанных в DuPont и InPhase, принцип регистрации в которых основан на диффузионном механизме, проявляющемся в модуляции показателя преломления непосредственно в процессе записи голограммы. Последующий прогрев приводит к увеличению фазовой модуляции, а равномерная засветка УФ-излучением позволяет фиксировать голограмму. Естественно, как следствие,

модуляция показателя преломления в этих слоях ниже, чем в слоях Polaroid [5].

Анализ термических свойств DuPont HRF 150-38 фотополимерных композиций для производства цифровых голографических карт [6] показал, что при записи голограмм после предварительного прогрева слоя до температуры 100 °С дифракционная эффективность достигает более 70%, однако экспоненциально спадает при температуре выше 100 °С. Фиксация голограмм при обработке УФ-излучением повышает дифракционную эффективность приблизительно на 10%, однако голограмма подвергается стиранию при температуре выше 120 °С.

### 3.3.1. Фотополимеры фирмы DuPont

Фирма E.I. DuPont de Nemours & Company разработала серию сухих голографических фотополимерных пленок под коммерческой маркой OmniDex [7, 8—18]. Эти пленки состоят из таких компонентов как сенсibiliзирующие красители, фотоинициаторы, chain transfer agents (агенты передачи цепи), пластификаторы, стабилизаторы, полимеризационноспособные акриловые мономеры и полимерные наполнители [8]. Конкретный компонентный состав этих слоев определяется назначением для различных применений. Фоточувствительные слои обычно наносятся на 50-микронную пленку полиэтилентерефталата (polyethyleneterephthalate (Mylar)) шириной 30 см, служащую в качестве основы и защищенную опять же 25-микронной Mylar-пленкой.

Для повышения дифракционной эффективности и ширины полосы (bandwidth) отражательные и пропускающие голограммы, записанные в этих слоях, могут дополнительно термически обрабатываться при температуре 100 °С в течение от 20 до 60 минут с последующим охлаждением до комнатной температуры. Можно использовать более короткое время и более высокую температуру (до температур 150—170 °С).

Спектр поглощения необлученной пленки HRF приведен на рис. 3.2, а дифракционная эффективность голографической решетки, записанной на HRF-150, — на рис. 3.3.

При этом эксперименте толщина пленки составляла 78 мкм, длина волны записи — 514 нм, плотность мощности в каждом пучке — 10 мВт/см<sup>2</sup>, длина волны считывания — 632,8 нм.

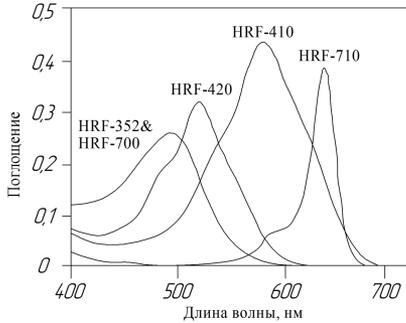


Рис. 3.2. Спектры поглощения неэкспонированных фотополимерных пленок серии HRF

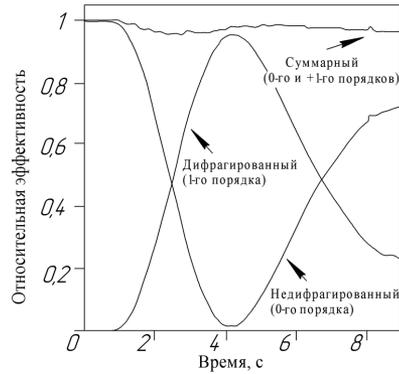


Рис. 3.3. Дифракционная эффективность голографической решетки, записанной на HRF-150

В табл. 3.4 приведены голографические свойства пленки HRF-352 на различных стадиях ее обработки [19].

Таблица 3.4. Голографические свойства пленки HRF-352 (с защитными слоями) в процессе ее обработки

Стадии обработки	Воспроизводимая длина волны, $\lambda_0$ (нм)	Эффективность отражения, $\eta$ (%)	Пропускная способность FWHM (нм)	Коэффициент модуляции $\Delta p$
Отражение при нормальном падении луча, 514 нм	508,3	68,67	4	0,007
Общая УФ-засветка (90 с.)	507,8	77,61	4	0,008
Нагрев, 100 °С, 15 мин.	504,3	99,61	11	0,022
Нагрев, 100 °С, 120 мин.	502,9	99,98	14	0,031
Нагрев, 100 °С, 72 ч.	504,2	99,92	15	0,027

Эти результаты типичны для отражающих голограмм. Их фиксация осуществляется путем дополнительной УФ-засветки, приво-

дящей к полимеризации остаточного мономера в слое. Простой прогрев приводит к увеличению модуляции показателя преломления, и голограмма остается стабильной после длительного прогрева. При этом наблюдается смещение брэгговской частоты в коротковолновую область спектра приблизительно на 2–3%.

Свойства отражательных голограмм, записанных при оптимальных условиях на некоторых фотополимерных пленках серии HFR, представлены в [20].

Свойства голограмм, записанных на HFR-150 и работающих на пропускание, исследованы в [7]. Модуляция показателя преломления  $\Delta n$  пленки HRF-150 обычно составляет около 0,008. Максимальная дифракционная эффективность  $\eta$  имеет место при толщине слоя 38 мкм. На пленке HRF-700 также можно формировать голограммы на пропускание с величиной модуляции показателя преломления (после термической обработки) порядка 0,009.

По сравнению с пленкой HRF-150 пленка HRF-600 имеет более высокое значение дифракционной эффективности при меньшей толщине слоя.

Модуляция показателя преломления после записи голограммы и УФ-засветки зависит от плотности мощности при записи (по крайней мере в области от 0,1 до 10,0 мВт/см<sup>2</sup>) [17]. Повышение плотности мощности приводит к снижению  $\Delta n$ . Этот эффект наблюдался для решеток с различным пространственным периодом и при различных толщинах пленок. Во всех случаях термическая обработка при 120 °С приводит к увеличению величины модуляции показателя преломления. Как показано на рис. 3.4, насыщение эффекта усиления наблюдается после приблизительно 3-часовой термической обработки пленки толщиной 7,5 мкм с пространственным периодом решетки 0,93 мкм [17].

В [21] проведен анализ термических свойств полимеров DuPont HRF150-38 для производства систем защиты на основе цифровых голографических карт. В случае регистрации после термической обработки дифракционная эффективность составляет более 70% при 100 °С, но экспоненциально уменьшается при температуре более 100 °С. Установлено, что без прогрева дифракционная эффективность фиксируется УФ-излучением и возрастает приблизительно 10% при 100 °С, но при температуре более 120 °С голограмма разрушается.

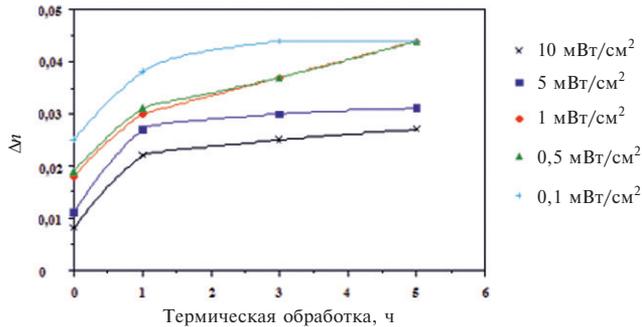


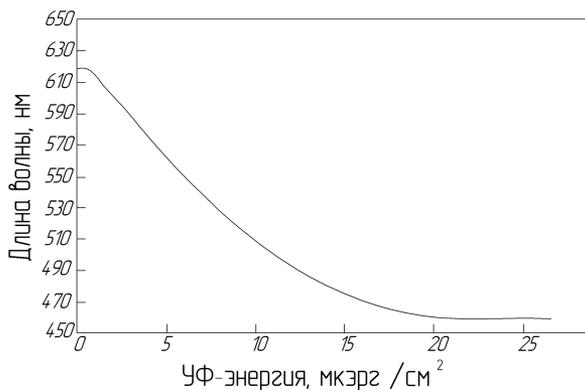
Рис. 3.4. Процесс усиления  $\Delta l$  при термической обработке

В [22] были исследованы характеристики наклонных голографических решеток, сформированных в DuPont OmniDex613, включая фактор усадки, коэффициент диффузии и длину нелинейного отклика. Запись голограмм производилась УФ-излучением с длиной волны 363,8 нм как с малыми углами наклона (менее 20°), так и с большими (более 40°). При этом применялся анализ на базе теории связанных волн (coupled-wave analysis) и модель нелокальной диффузии вместе с измерениями угловой селективности, а также измерениями дифракции в реальном масштабе времени. В зависимости от интенсивности экспозиции фактор усадки фотополимера при записи изменялся в пределах от 2,75% до 4,20%. Более того, в работе проведены систематические исследования, как условия постпрогрева влияют на величину  $\delta l$  и сдвиг брэгговских углов для наклонных голограмм. Установлено, что этот процесс может не только увеличить  $\delta l$  от 0,011 до 0,022 для решеток с большим углом наклона, но может также компенсировать ее.

Голограммы, записанные на фотополимер DuPont HRF-600, претерпевают по крайней мере 6000-ю термическую цикличность (–55 °С / 5 мин. — 125 °С / 5 мин.). Небольшое увеличение или уменьшение в  $\eta$  является комбинацией нескольких факторов. Эти факторы включают изменения в амплитуде  $\Delta l$  вследствие дополнительной полимеризации, ожидающейся на первых циклах, изменения толщины и показателя преломления, а также возможное искажение профиля первоначальной голограммы [23].

Ключевым участком OmniDex-технологии является метод обработки сухой пленки для управления пространственным перио-

дом голограмм [19, 24]. Этот процесс управления периодом заключается в ламинировании на голограмму второй фотополимерной пленки, которая отверждается УФ-излучением. Мономер во время настройки пленки диффундирует в голографическую пленку. Разбухание толщины изменяет период голограммы. Сдвиг периода является устойчивым, а процесс — воспроизводимым. Контролируя толщину и компонентный состав обеих пленок, можно получить практически любой сдвиг. Этот процесс перестройки периода аналогичен методу химического набухания для слоев бихромированной желатины и галогенидосеребряных материалов. На рис. 3.5 показан процесс изменения брэгговской длины волны в зависимости от энергии экспонирования второй пленки.



**Рис. 3.5.** Изменение брэгговской длины волны в процессе УФ-облучения слоя HRF-пленки [25]

В качестве наполнителя, как правило, используются фторсодержащие полимеры, совместимые с другими компонентами, которые после испарения растворителя формируют прозрачные твердые (например размерностабильные) слои.

Наличие фтора в наполнителе обычно уменьшает показатель преломления полимера, посредством чего возрастает величина  $\Delta n$  после записи голограммы. Она возрастает с увеличением концентрации фтора, однако при этом возможно помутнение слоя. Обычно концентрация фтора составляет от 3% до 25 % при

оптимальной величине 1% и зависит от конкретных применений материала.

Пленка включает по крайней мере один этиленненасыщенный мономер, способный полимеризоваться по свободнорадикальному механизму и имеющий точку кипения выше 100 °С. Обычно мономер является жидким и имеет ненасыщенную группу на конце молекулярной структуры. Использование твердых мономеров [26] в комбинации с жидкими имеет определенные преимущества, способствуя протеканию диффузионных процессов.

При необходимости получения сшитого (crosslinking) фотополимера в композицию можно вводить порядка 5 весовых %, по крайней мере один мультифункциональный мономер, включающий две или более концевые этиленнасыщенные группы, например ди-(2-акрилоксиэтил)эфир бисфенола А (di-(2-acryloxyethyl)etherof-bisphenol А).

Фотоиницирующая система включает одно или несколько веществ, которые образуют свободные радикалы при поглощении актиничного излучения. Она может включать в свой состав сенсibilизатор, способный расширять спектральный отклик материала в ближний видимый и/или ближний ИК спектральный диапазон.

В качестве веществ, генерирующих свободные радикалы, может использоваться большое число органических соединений, в частности окислительно-восстановительные системы, например содержащие красители типа бенгальский розовый 2 (RoseBengal/2) или дибутиламиноэтанол (dibuthylaminoethanol) [27].

Для изменения физических свойств пленок в их состав дополнительно вводятся и некоторые другие компоненты, такие как пластификаторы, термические стабилизаторы, адгезионные модификаторы и т.д.

Наличие пластификатора может изменять адгезионные свойства, гибкость и жесткость пленки и другие механические свойства. В качестве пластификаторов могут быть использованы такие вещества, как триэтиленгликоль диакрилата (triethyleneglycol diacrylate), триэтиленгликоль бис(2-этилгексаноат) (triethyleneglycol bis(2-ethylhexanoate), тетраэтиленгликоль дигептаноата (tetraethyleneglycol diheptanoate) и другие.

Ингибиторы термической полимеризации повышают стабильность композиции при длительном хранении. В качестве стабилизаторов используются такие вещества, как гидрохинон (hydroqui-

none), фенидон (phenidone), пара-метоксифенол (p-methoxyphenol) и другие [28].

Пропорция ингредиентов в фотополимеризующихся композициях находится в пределах следующих процентных областей относительно полного веса композиции: наполнитель — от 25% до 90%, предпочтительно от 45% до 75%, мономер(ы) — от 5% до 60%, предпочтительно от 15% до 50%, пластификатор — до 25%, предпочтительно от 0% до 15%, фотоиницирующая система — от 0,1% до 10%, предпочтительно от 1% до 7% факультативные ингредиенты — от 0% до 5%, обычно от 0,1% до 4%.

### 3.3.2. Фотополимеры фирмы InPhase Technologies

В 1994 г. специалисты Bell Labs (L. Dhar, Wilson и Curtis) разработали полимерную систему, которая содержит в своем составе две химически разные структуры (two-chemistry), которые работают независимо друг от друга (предшественница формирования матрицы с низким показателем преломления (low-refractive-indexprecursors) и фотополимеризующиеся мономеры (high-refractive-indexphotopolymerizablemonomers)) [29]. Одна химическая структура ответственна за формирование твердотельной пленки с заданными механическими, технологическими параметрами. Она же ответственна за время архивного хранения записанной в слое информации. Вторая химическая структура ответственна за сам процесс записи голограмм. Эти две структуры не взаимодействуют или интерферируют между собой, что обеспечивает высокий динамический диапазон и чрезвычайно хорошую размерную стабильность при записи.

Регистрирующий материал формируется путем полимеризации одной из структур с образованием твердотельной матрицы, в которой на молекулярном уровне распределена вторая, фоточувствительная и непрореагировавшая при этом структура. Регистрация голограммы производится в другой спектральной области путем полимеризации и фоточувствительных частиц, и пространственной диффузии неполимеризовавшихся частиц, в результате чего в слое образуется пространственная модуляция показателя преломления [29—34].

В дополнение к материалу был также разработан процесс изготовления высококачественной оптической среды. Качество волнового фронта при контроле плоскостности этой среды составляло порядка  $\lambda/8$  на  $\text{см}^2$  при длине волны 633 нм.

Специалисты InPhase Technologies запатентовали ZeroWave-процесс изготовления регистрирующих сред толщиной более 2 мм с плоскостностью менее  $\lambda/4$ .

В табл. 3.5 приведены спецификации регистрирующих сред из серии Tapestry, разработанные специалистами InPhase Technologies.

### 3.3.3. Фотополимерные материалы Института органической химии СО РАН

Пленочные фотополимерные материалы (ФПМ), изготовленные в ИОХ и ИАиЭ СО РАН в г. Новосибирске, являются перспективными для использования в качестве голографического носителя для хранения архивной информации.

Изготовителем ФПМ заявлены следующие характеристики:

- а) толщина фоточувствительного слоя на стеклянной подложке порядка 100 мкм;
- б) оптимальная экспозиция при использовании излучения He-Ne-лазера:
  - 0,1 Дж/ $\text{см}^2$  при  $\eta = 5\%$ ;
  - 0,3 Дж/ $\text{см}^2$  при  $\eta = 20\%$ ;
  - 0,7 Дж/ $\text{см}^2$  при  $\eta = 30\%$ .

Постэкспозиционная обработка образца ФПМ проводится путем его засветки лампой дневного света в течение 10–20 мин. до полного обесцвечивания образца [35].

#### 3.3.3.1. Композиции на основе фоточувствительных материалов и стекол типа золь-гель-стекла

##### 1. Силикатные стекла

Альтернативой полимерному наполнителю могут служить силикатные стекла, которые могут быть сделаны или в виде толстых пленок, или в виде монолита с желаемой толщиной и свойствами,

Таблица 3.5. Характеристики регистрирующих сред серии Tapestry

Медиа-продукты	Тип носителя	Длина волны, нм	Динамический диапазон (на 200 мкм)	Светочувствительность	Усадка	Толщина материала	Формат	Оптимальное использование
HDS1000	ROM и Recordable	510—532	0,7	$1 \cdot 10^{-7}$	0,3%	от 200 мкм до 2 мм	Slide 2"X3"; Coupon 3"X3"	Первоначальная характеристика голографической системы; для настройки системы тестирования и начальных экспериментов
HDS2000	ROM и Recordable	510—532	2	$2 \cdot 10^{-6}$	<0,1%	от 200 мкм до 2 мм	Slide 2"X3"; Coupon 3"X3"; Disk 120/130 мм	Голографические эксперименты по планированию; самый широкий диапазон эксплуатации окружающей среды
HDS3000	ROM и Recordable	510—532	4	$6 \cdot 10^{-6}$	<0,1%	от 200 мкм до 2 мм	Slide 2"X3"; Coupon 3"X3"; Disk 120/130 мм	Эксперименты по максимизации емкости
HDS4000 (New, Dec 2005)	ROM и Recordable	630—750	6	$1 \cdot 10^{-6}$	<0,1%	от 200 мкм до 2 мм	Framed Slide 38mmX25 мм; Slide 2"X3"	Коммерческие потребительские приложения
HDS5000	ROM and Recordable	400—410	6	$6 \cdot 10^{-6}$	<0,1%	от 200 мкм до 2 мм	Slide 2"X3"; Coupon 3"X3"; Disk 120/130 мм	Приложения для коммерческих предприятий

такими как высокое оптическое качество, твердость и стабильность к окружающей среде [36, 37]. Однако энергетическая чувствительность этих материалов еще далека от подобной характеристики наиболее фоточувствительных фотополимеров [38, 39].

Стабильные голографические решетки были зарегистрированы на фотополимерных силикатных стеклах, включающих акриламид и N, N'-метиленабисакриламид (acrylamide and N, N'-methylenebisacrylamide) в качестве мономеров, триэтаноламин (triethanolamine) как соинициатор и эозин желтоватый как фотоинициатор [40]. Стекла приготавливались с использованием стандартной золь-гель-технологии (sol-gel technique), которая осуществлялась через стадии гидролиза и поликонденсации тетраэтилортосиликата (tetraethyl orthosilicate) в спиртовом растворе, содержащем кислотный катализатор, молдинг и желатинизацию золь с последующим старением и сушкой геля при нормальных лабораторных условиях (20 °C и 60% RH).

Для слоев толщиной 100 мкм величина дифракционной эффективности достигает 80% при динамическом диапазоне  $M^* = 2,4$ . При этом требуемая энергия записи составляет 10 мДж/см<sup>2</sup>. Эти величины схожи с теми параметрами, которые получаются на обычных фотополимерных системах на основе ПВА, но лучше, чем параметры, достигаемые на других золь-гель-композициях.

## 2. Золь-гель-стекла (Sol-gel glass)

Фоточувствительное гибридное стекло использовалось для изготовления микрооптических элементов. К преимуществам этого материала можно отнести хорошие оптические свойства и одностадийный метод изготовления. В [41] фоточувствительное гибридное SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> золь-гель-стекло использовалось для получения решеток голографическим методом. Для этого золь-раствор синтезировался гидролизом 3-(триметоксисил) пропил метакрилата (3-(trimethoxysilyl) propyl methacrylate) (MPTMS) в изопропанол и подкисленной воде с молярным отношением 0,040/0,048/0,035 и титан пропоксида (titanium propoxide) в ацетилацетоне (acetylacetone) в атмосфере азота с молярным отношением 0,01/0,04. TiO<sub>2</sub>-сетка добавлялась в SiO<sub>2</sub>-сетку, так что показатель преломления сетки мог регулироваться. В золь-гель-пленку вводили 4% (по весу) фотоинициатора бис(2,4,6-триметил)-фенилфосфиноксида (bis(2,4,6-trimethylbenzoyl)-phenylphosphine oxide).

Запись голограммы с периодом 1 мкм осуществлялась с помощью He-Cd-лазера (325 нм, 200 мВт, время записи — 2 мин.). Толщина золь-гель-пленки была около 500 мкм. При записи фотоинициатор разлагался на свободные радикалы, которые инициировали полимеризацию МРТМС-мономеров, проявляя свойства негативного фоторезиста. После экспонирования пленка проявлялась в этаноле в течение 15 с. для формирования решеточной структуры с периодом 1 мкм.

### 3.3.4. Фотополимерные материалы «Диффен» Санкт-Петербургского НИУ ИТМО

Полимерный регистрирующий материала «Диффен», изготовленный Санкт-Петербургским НИУ ИТМО, может использоваться в качестве регистрирующей фоточувствительной среды в системах голографической памяти.

Изготовителем ФПМ заявлены следующие характеристики:

- а) образцы — диск толщиной от 1,0 до 1,2 мм (при регистрации одиночных голограмм) и диск толщиной 1,3 мм (при регистрации мультиплексных голограмм);
- б) оптимальная экспозиция (обеспечивается линейность регистрации) при использовании когерентного излучения с длиной волны 0,488 мкм: 1 Дж/см<sup>2</sup> при  $\eta = 2\%$  [42]; в соответствии с ходом кривой спектральной чувствительности материала при регистрации на длине волны 0,441 мкм чувствительность увеличивается в 14 раз, то есть экспозиция при регистрации одиночных голограмм будет составлять 0,07 Дж/см<sup>2</sup>.

Постэкспозиционная обработка образца ФПМ «Диффен» проводится путем его прогрева в термостате при температуре от 55 до 60 °С в течение от 20 до 50 часов и последующей засветки некогерентным синим светом, например излучением синего светодиода.

Экспериментальные исследования образцов фотополимерных материалов совместной разработки Института органической химии и Института автоматики и электрометрии СО РАН (г. Новосибирск) и фотополимерных материалов «Диффен» НИУ ИТМО (г. Санкт-Петербург), проведенные авторами, показали:

- низкую светочувствительность (20 Дж/см<sup>2</sup> для ФПМ ИОХ и ИАиЭ и  $20 \cdot 10^{-3}$  Дж/см<sup>2</sup> для ФПМ ИТМО);
- значительную усадку и светорассеяние для образцов ИОХ и ИАиЭ СО РАН;
- значительное время нагрева (до 50 часов при температуре 50—60 °С) для образцов «Диффен» НИУ ИТМО;
- необходимость значительных капиталовложений (от 200 тыс. дол. США) и технологические сложности для перехода от экспериментальных образцов к опытным и серийным образцам.

В табл. 3.6 приведены основные параметры исследованных фотополимерных материалов и фоточувствительных галогенидосеребряных материалов, определяющие возможность их применения в разрабатываемой оптико-голографической системе.

**Таблица 3.6**

Наименование фоточувствительного материала, изготовитель	Дифракционная эффективность, %	Чувствительность, Дж/см <sup>2</sup>	Угловая селективность $\delta_{0,1}$ , град.	Время постэкспозиционной обработки, час.
Фотополимерный материал ИОХ и ИАиЭ СО РАН, г. Новосибирск	До 15	20	3,3	0,5
Фотополимерный материал «Диффен» Санкт-Петербургского НИУ ИТМО	До 80	$2 \cdot 10^{-2}$	0,5	50
Пластины с галогенидосеребряным слоем ПФГ-03М, АО «Компания «Славич»	До 2—3	$2 \cdot 10^{-4}$	4	0,5

Примечание к таблице:

- 1) численные значения параметров приведены для случая регистрации методом мультиплексирования 10 субголограмм в одной микроголограмме;
- 2) дифракционная эффективность для голограмм на пластинах ПФГ-03М приводится для условий реальной работы на макете оптико-электронного устройства в целях записи потоков видеoinформации (при соотношении плотностей мощностей предметного и опорного пучков в плоскости регистрации 1:5).

Как видно из табл. 3.6, фоточувствительные галогенидосеребряные материалы, серийно выпускаемые АО «Компания «Славич» (г. Переславль-Залесский, Ярославская обл.), в частности голографические фотопластинки ПФГ-03М, имеют следующие преимущества:

- высокую светочувствительность ( $2 \cdot 10^{-4}$  Дж/см<sup>2</sup> против 20 Дж/см<sup>2</sup> для ФПМ ИОХ и ИАиЭ и  $2 \cdot 10^{-2}$  Дж/см<sup>2</sup> для ФПМ из ИТМО), что позволяет значительно снизить время экспонирования и ускорить процесс записи матрицы микроголограмм;
- значительный динамический диапазон, позволяющий записать до 20—30 наложенных субголограмм на один участок;
- технологическую отработанность и доступность для приобретения больших партий серийно изготовленных материалов;
- технологическую возможность изготовления серийных образцов фоточувствительных галогенидосеребряных материалов больших размеров (до 1000 × 1000 мм), требуемой геометрической формы (квадрат, прямоугольник, диск) на стеклянном или пленочном носителе, требуемой толщины фотоэмульсии (от 1 мкм до 20 мкм);
- значительные сроки хранения изготовленных голограмм без потери качества и количества информации (по известным публикациям — до 30 лет).

При регистрации голограмм на пластинках ПФГ-03 проявляется невысокая угловая селективность голограмм, обусловленная относительно небольшой толщиной регистрирующего слоя, которая может быть компенсирована оптическими схемами регистрации и считывания субголограмм. Кроме того, относительно невысокая дифракционная эффективность галогенидосеребряных пластин в связи с высокой чувствительностью матричных приемников изображений в устройстве считывания информации не является ограничивающим фактором для дальнейшего использования.

### **3.3.5. Сравнительная характеристика коммерческих фотополимерных материалов**

Сравнительная характеристика материалов приведена в таблице 3.7.

Однако для голографических систем памяти фотополимерные материалы имеют недостатки:

- низкую светочувствительность;
- сложную систему постэкспозиционной обработки в виде УФ-облучения, мокрой обработки и длительного нагрева материалов при температуре до 60 °С;
- технологические сложности по изготовлению толстых слоев фотополимерного материала (от 100 мкм и выше).

**Таблица 3.7.** Сравнительная характеристика коммерческих фотополимерных материалов

	DuPont	Polaroid Corp.	InPhase Technologies
Тип	HFR-150—38 и др.	DMP 128	Tapestry HDS1 000 — HDS5 000
Спектральная чувствительность, нм	488, 530, 580, 647	442, 488, 514, 633, 647	510—532, 630—750, 400—410
Толщина, мкм	20—1000	5—15	200—2000
Дифракционная эффективность, %	70	80—95	70
Обработка	Прогрев + УФ	Мокрая обработка	Прогрев + УФ

### 3.4. Фоточувствительные материалы на основе бихромированной желатины

Слои бихромированной желатины (БХЖ) достаточно широко используются в голографии из-за высокой дифракционной эффективности голограмм, записанных на них, и широкой полосы отклика. Однако они имеют малое время жизни до их использования и требуют мокрой стадии проявления для формирования голограммы после записи скрытого изображения. Вследствие малого времени жизни материал желательно приготавливать перед использованием или предварительно его «задубить».

Мокрый процесс вводит дополнительную стадию при изготовлении голограмм. Более того, он сопровождается размерными из-

менениями в слое, такими как формирование микрорельефа и усадка, что, в свою очередь, влияет на формирование интерференционных полос.

Как и большинство фазовых материалов, слои БХЖ в их простейшей форме могут быть использованы для изготовления разнообразных голограммных оптических элементов (ГОЭ) с использованием сине-зеленого или более коротковолнового излучения. В ряде случаев использовались красный криптоновый или He-Ne-лазеры. Однако фоточувствительность при этом была низкой, необходимая энергия записи составляла от 50 до 1000 мДж/см<sup>2</sup> ( $\lambda = 647$  нм), в то время как для коротковолновой области спектра она была около 4 мДж/см<sup>2</sup> ( $\lambda = 442$  нм) и порядка 100 мДж/см<sup>2</sup> ( $\lambda = 514$  нм). Следует отметить, что обычно все фотополимеризующиеся и фотоструктурирующиеся среды по крайней мере в 1000 раз менее чувствительны по сравнению с галогенидосеребряными материалами.

Внутренние шумы высокоэффективных ГОЭ, записанных в слоях БХЖ толщиной от 5 до 8 мкм, составляют от 1% до 2%. Недостатком БХЖ является высокая чувствительность к влажности.

### 3.5. Фототерморелрактивные стекла Санкт-Петербургского НИУ ИТМО

Фототерморелрактивные (ФТР) стекла являются перспективным материалом для создания объемных амплитудно-фазовых голограмм и многослойных голографических структур [43, 44]. Эти стекла производят компании Corning (США), Optigrate (США), PD-LD (США) и НИИ нанофотоники и оптоинформатики НИУ ИТМО (Россия). В качестве преимуществ применения ФТР-стекло и оптических элементов на их основе выделяют следующие [45]:

- 1) высокий прирост показателя преломления ( $\Delta n \approx 5 \times 10^{-4}$ );
- 2) высокая дифракционная эффективность (до 95%);
- 3) неограниченный срок хранения (десятки лет);
- 4) высокая термическая, механическая и оптическая прочность.

Перечисленные преимущества ФТР-стекло делают их одним из весьма перспективных материалов для использования в качест-

ве носителей информации в оптико-голографических системах архивной памяти.

ФТР-стекло — это многокомпонентный материал, в состав которого помимо стеклообразователя в виде силикатов и модификаторов входят разнообразные добавки: трехвалентный церий, ионы серебра, сурьмы и олова. Трехвалентный церий является донором фотоэлектронов и определяет фоточувствительность материала. Ионы серебра, сурьмы и олова сначала играют роль акцепторов электронов, перехватывают фотоэлектроны от церия, а затем при последующей термообработке играют роль доноров, высвобождая электроны, которые захватываются ионами серебра с последующим их восстановлением и образованием коллоидных частиц. Также в состав ФТР-стекол входят галогениды — хлориды, фториды и бромиды, необходимые для формирования кристаллической фазы. Стандартным коммерчески доступным ФТР-стеклом является, например, стекло системы  $\text{Na}_2\text{O}-\text{ZnO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{NaFKBr}$ , активированное  $\text{Ag}_2\text{O}$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SnO}_2$ .

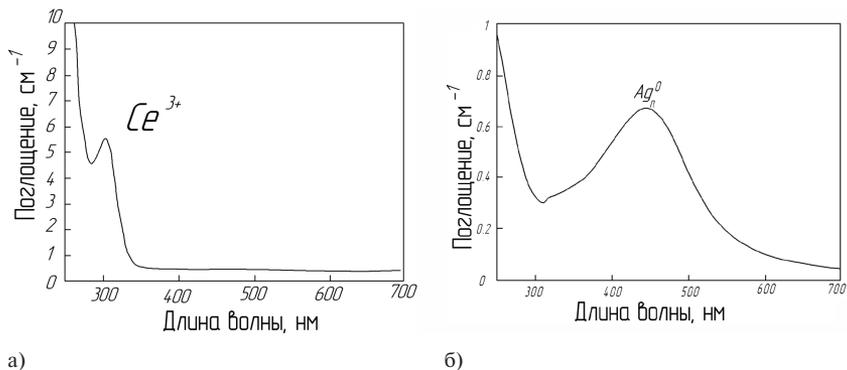
Формирование голографических элементов на ФТР-стеклах может осуществляться путем использования как классических голографических схем, основанных на интерференции объектного и опорного пучков, так и путем поэлементной или проекционной записи компьютерно-синтезированных голографических структур.

Первым шагом в процессе записи оптического элемента в ФТР-стекле является облучение стекла лазерным пучком УФ. Световой пучок может быть пространственно промодулирован, как в случае двухлучевой голографии или проекционной схемы; в случае поэлементной записи пучок фокусируется до необходимых размеров. На рис. 3.6 представлен график зависимости поглощения ФТР-стекла от длины волны освещающего пучка. Пик поглощения в УФ-области соответствует 310 нм и обусловлен наличием примесей  $\text{Ce}^{3+}$ . Соответственно длина волны освещающего пучка должна попадать в область этого пика.

Под действием УФ-облучения ионы трехвалентного церия повышают валентность и высвобождают электроны:



Порядка 20% освобожденных фотоэлектронов захватывается ионами серебра с образованием молекулярных ионных кластеров



**Рис. 3.6.** Зависимость коэффициента поглощения ФТР-стекла от длины волны падающего излучения: а) стекло до начала обработки; б) стекло после обработки

$Ag^0$ ,  $Ag_2^0$ ,  $Ag_2^+$ ,  $Ag_2^{2+}$  и т.д. Однако основная часть свободных электронов захватывается ионами сурьмы и олова с уменьшением их степени окисления:



Последующим этапом обработки ФТР-стекла является его нагрев до температуры порядка 300 °С, в результате чего сурьма и олово отдают захваченные электроны, которые захватываются ионами серебра с последующим образованием молекулярных кластеров и коллоидных частиц  $Ag_n^0$ :



На завершающей стадии температура нагрева увеличивается до величины порядка 520 °С, что приводит сначала к росту на коллоидных частицах серебра оболочки из  $AgBr$  и  $NaBr$ , а затем к росту на этой структуре кристаллической фазы  $NaF$ .

Особый интерес вызывает возможность записи голографических и оптических элементов в тонком слое с использованием

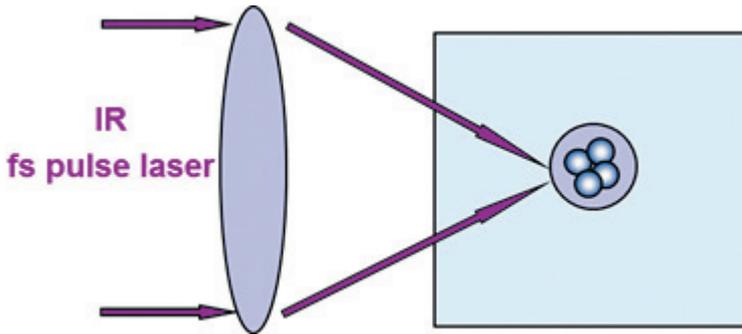


Рис. 3.7. Запись оптического элемента в тонком слое стекла фемтосекундным лазерным импульсом ближнего ИК-диапазона

фемтосекундных лазерных импульсов и нелинейного эффекта многофотонного поглощения. В работах [46, 47] показана возможность такой записи с использованием лазера ближнего ИК-диапазона ( $\sim 1$  мкм). Эффект трехфотонного поглощения, проявляющийся в данном случае, пропорционален 3-й степени интенсивности излучения. Таким образом, при фокусировке такого пучка область записи будет зависеть от каустики пучка в точке фокусировки. Величина толщины слоя записанного оптического элемента может лежать в субмиллиметровом диапазоне.

Существенными недостатками ФТР-стекол являются высокий уровень рассеяния на границе кристаллической фазы, а также большие оптические потери (более  $0,5 \text{ см}^{-1}$ ), обусловленные полосой поглощения коллоидного серебра на длине волны 450 нм (см. рис. 3.6, б). Первая проблема решается путем оптимизации состава стекла и подбора режимов обработки (экспозиция, температура, время). При этом оптические потери в видимом диапазоне могут быть снижены до  $0,01 \text{ см}^{-1}$ . С проблемой, связанной с поглощением коллоидного серебра, борются путем нелинейно-оптического обесцвечивания импульсным лазером с излучением на длине волны 532 нм [48]. Также существенным недостатком при использовании ФТР-стекол в системе голографической памяти является большое время, необходимое для термообработки, — примерно 10 часов.

## Литература

1. S. S. Orlov, W. Phillips, E. Bjornson, Y. Takeshima, P. Sundaram, L. Heselink, R. Okas, D. Kwan, and R. Snyder // *Appl. Opt.*, 43, 4902. — 2004.
2. K. Anderson, E. Fotheringham, S. Weaver, B. Sissom, and K. Curtis, *Tech. Dig. ODS*. — 2006. — TuC1. — P. 150.
3. URL.: <http://www.slavich.ru>.
4. Toishi V. Analysis of photopolymer media of holographic data storage using non-local polymerization driven diffusion model / V. Toishi, T. Tanaka, K. Watanabe, and K. Betsuyaku // *Jap. J. Appl. Phys.*, 46, 3438. — 2007.
5. Gallego S. Characterization of polyvinyl alcohol/acrylamide holographic memories with a first-harmonic diffusion model / S. Gallego, M. Ortuno, C. Neipp, A. Marquez, A. Belendez, and I. Pascual // *Appl. Opt. IP*, 44, 6205. — 2005.
6. Kim J. Analysis of thermal properties of the Dupont photopolymer for the digital holographic security card system / J. Kim, H. Lee, N. Kim, E. Kim, S. Gil // *SPIE 5363*, 192. — 2004.
7. A. M. Weber, W. K. Smothers, T. J. Trout, D. J. Mickish // *Proc. SPIE*, 1212, 30. — 1990.
8. W. K. Smothers, B. M. Monroe, A. M. Weber, D. E. Keys // *Proc. SPIE*, 1212, 20. — 1990.
9. W. K. Smothers, T. J. Trout, A. M. Weber, D. J. Mickish // *IEE Confer. Public.*, 311, 184. — 1989.
10. W. S. Colburn, K. A. Haines // *Appl. Opt.*, 10, 1636. — 1971.
11. R. H. Wopschall, T. R. Pampalone // *Appl. Opt.*, 11, 2096. — 1972.
12. B. L. Booth // *Appl. Opt.*, 14, 593. — 1975.
13. U. S. Rhee, H. J. Caulfield, C. S. Vikram, J. Shamir // *Appl. Opt.*, 34, 846. — 1995.
14. K. Curtis, D. Psaltis // *Appl. Opt.*, 31, 7425. — 1992.
15. K. Curtis, D. Psaltis // *Appl. Opt.*, 33, 5396. — 1994.
16. H. J. Zhou, V. Morozov, J. Neff // *Appl. Opt.*, 34, 7457. — 1995.
17. W. J. Gambogi, W. A. Gerstadt, S. R. Mackara, A. W. Weber // *Proc. SPIE*, 1555, 256. — 1991.
18. J. Kim, H. Lee, N. Kim, E. Kim, S. Gil // *Proc. SPIE*, 5363, 192. — 2004.
19. T. J. Trout, D. M. T. Chan, B. M. Monroe. — *US Pat.* 4,963,471.
20. A. M. Weber, W. K. Smothers, T. J. Trout, D. J. Mickish // *Proc. SPIE*, 1212, 30. — 1990.
21. S. D. Wu, E. N. Glytsis // *Opt. Soc. Amer. J. B*, 21, 1722. — 2004.
22. V. V. Smirnov, J. Y. Son, J. H. Chung, H. S. Lee, J. Bahn // *Proc. SPIE*, 3956, 199. — 2000.
23. W. J. Gambogi, S. R. Mackara, T. J. Trout // *Proc. SPIE*, 1914, 145. — 1993.

24. H. Kamogawa, et al. // Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition, Vol. 9. — 1979.
25. US 4,772,541.
26. US 4,168,982.
27. R. T. Ingwall, H. L. Fielding // Opt. Eng., 24, 808. — 1985.
28. D. A. Waldman, R. T. Ingwall, P. K. Dhal, M. G. Horner, E. S. Kolb, H.-Y. S. Li, R. A. Minns, H. G. Schild // Proc. SPIE, 2689, 127. — 1996. — P. 77–82.
29. H. E. Katz, A. L. Harris, M. L. Schilling // EP 0 824 222.
30. E. A. Chandross, M. E. Galvin-Donoghue, X. Neenan, S. Patel. — US 6,627,354.
31. L. Dhar, S. Setthachayanon, M. Schnoes, M. D. Michaels. — US 2003087104.
32. L. Dhar, A. Hale, H. E. Katz, M. L. Schilling, M. G. Schnoes — US 6,939,648.
33. E. D. Kvasnikov, V. M. Kozenkov, V. A. Barachevskii // Doklady Akademii Nauk, 237, 633 (1977) (In Russ.).
34. V. M. Kozenkov, V. G. Chigrinov, H. S. Kwok // Mol. Cryst. Liq. Cryst., 409, 251. — 2004.
35. Sazonov Yu. A. Photopolymer material for recording reflection holograms by He-Ne and Kr<sup>+</sup> lasers / Sazonov Yu. A., Shelkovnikov V. V., Pen E. F., Gerasimova T. N. // SPIE. — 2000. — 4149. — P. 100.
36. P. Cheben, T. Belenguer, A. Nunez, F. del Monte, D. Levy // Opt. Lett., 21, 1857. — 1996.
37. P. Cheben, M. L. Calvo // Appl. Phys. Lett., 78, 1490. — 2001.
38. G. Ramos, A. Alvarez-Herrero, T. Belenguer, D. Levy, F. del Monte // Proc. SPIE, 5216, 116. — 2003.
39. L. Carretero, A. Murciano, S. Blaya, M. Ulibarrena, A. Fimia // Opt. Express, 12, 1780. — 2004.
40. W. Yu, X. C. Yuan // Opt. Express, 11, 1925. — 2003.
41. S. Blaya, R. Mallavia, L. Carretero, A. Fimia, R. F. Madrigan // Appl. Phys. Lett., 73, 1628. — 1998.
42. Manukhin B. G., Chivilikhin S. A., Schelkanova I. J., Andreeva N. V., Materikina D. A., Andreeva O. V. Reversible and irreversible alterations of the optical thickness of PQ/PMMA volume recording media samples. Part I: Experiment // Appl. Opt. 56. — 7351–7357 (2017).
43. Borgman V. A. Photo-thermal refractive effect in silicate glasses / V. A. Borgman, L. B. Glebov, N. V. Nikonov, G. T. Petrovskii, V. V. Savvin, and A. D. Tsvetkov // Sov. Phys. Dokl. 34, 1011–1013. — 1989.

44. Кучинский С. А. Свойства объемных фазовых голограмм на мультихромных стеклах / Кучинский С. А., Никоноров Н. В., Панышева Е. И., Савин В. В., Туниманова И. В. // *Опт. и спектр.* — 1991. — Т. 70. — № 6. — С. 1296.
45. Иванов С. А. Голографические характеристики модифицированного фототерморефрактивного стекла / С. А. Иванов; А. И. Игнатьев; Н. В. Никоноров, В. А. Асеев // *Оптический журнал.* — 2014. — Т. 81. — № 6.
46. Klyukin D. A. Formation of luminescent and nonluminescent silver nanoparticles in silicate glasses by near-infrared femtosecond laser pulses and subsequent thermal treatment: the role of halogenides / Dmitry A. Klyukin, Victor D. Dubrovin, Alisa S. Pshenova, Sergey E. Putilin, Teimur A. Shakhverdov, Anton N. Tsytkin, Nikolay V. Nikonorov, Alexander I. Sidorov // *Opt. Eng.*, 2016. — 55(6). — 067101.
47. Efimov O. M. Interaction of photo-thermo-refractive glass with nanosecond pulses at 532 nm / Efimov O. M., Glebov L. B., Smirnov V. I. // *Proc. SPIE.* — 2003. — V. 5273. — P. 396–401.
48. Златов А. С. Влияние обесцвечивания на свойства объемных фазовых голограмм на основе силикатного фототерморефрактивного стекла / Златов А. С., Чепоров И. О., Корзинин Ю. Л., Никоноров Н. В. // *Оптический журнал.* — 2010. — Т. 77. — № 12. — С. 22–24.

## **ГЛАВА 4**

# **МЕТОДЫ И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИКО-ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АРХИВНОЙ ПАМЯТИ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНО- СИНТЕЗИРОВАННЫХ МИКРОГОЛОГРАММ ФУРЬЕ**

### **4.1. Теоретическое исследование метода получения компьютерно-синтезированных голограмм**

Основной проблемой классических систем записи голограмм страниц цифровых данных является сложность и высокие требования к эксплуатации оптической схемы записывающего устройства. В данной главе для упрощения процесса записи предложен метод, основанный на предварительном численном расчете амплитудных структур голограмм [1] и последующем их проецировании на фоточувствительный носитель с многократным уменьшением. Важно отметить, что способы синтеза голограмм, перечисленные ниже, относятся к быстрым аналитическим способам расчета, поскольку скорость синтеза является одним из факторов, определяющих скорость записи данных на носитель. Существует также ряд более вычислительно затратных итерационных методов расчета чисто фазовых или чисто амплитудных голограмм, например алгоритмы на основе метода Герберта — Секстона, а также лучевые методы, в которых объект для записи разбивается на полигоны, для каждого из которых рассчитывается распространение рассеянных лучей до плоскости голограммы. Как правило, эти методы используются для голографирования трехмерных объектов в целях наблюдения

глазом — задачи, принципиально отличающейся от задачи записи и считывания информации.

#### 4.1.1. Математические основы компьютерного синтеза голограмм и формирования восстановленных изображений

Рассмотренные ниже быстрые аналитические алгоритмы компьютерного голографического синтеза реализованы путем математического моделирования соответствующей оптической схемы, используемой при получении реальных аналогов синтезируемых голограмм. При этом за основу берутся такие понятия, как линейность и изопланарность оптических систем [2]. По определению, действие линейной оптической системы может быть описано интегралом суперпозиции:

$$g_2(x, y, z) = \iiint_{\infty} g_1(\xi, \eta, \zeta) h(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta, \quad (4.1)$$

где  $g_1(\xi, \eta, \zeta)$  — функция распределения комплексной амплитуды светового поля на входе оптической системы;  $g_2(x, y, z)$  — функция распределения комплексного светового поля на выходе системы; функция  $h(x, y, z; \xi, \eta, \zeta)$  — импульсный отклик оптической системы, соответствующий распределению поля на выходе системы в случае, когда на входе точечное возмущение. Для изопланарной (или частично изопланарной) оптической системы интеграл в (4.1) может быть записан в виде свертки:

$$g_2(x, y, z) = \iiint_{\infty} g_1(\xi, \eta, \zeta) h(x - \xi, y - \eta, z - \zeta) d\xi d\eta d\zeta. \quad (4.2)$$

Стоит отметить, что переменные  $x, y, z$  и  $\xi, \eta, \zeta$  относятся к разным пространствам, поэтому для корректного использования формулы (4.2) необходимо согласование осей координат и масштабов.

Преимуществом рассмотрения изопланарных линейных оптических систем является простота расчетов. Выражение в правой части уравнения (4.2) представляет собой математическую свертку функций  $g_1$  и  $h$ . Применяя теорему Фурье о свертке к формуле (4.2), получим, что пространственные спектры  $G_1$  и  $G_2$  светового

поля на входе и выходе оптической системы связаны простым соотношением:

$$G_2(f_X, f_Y, f_Z) = H(f_X, f_Y, f_Z)G_1(f_X, f_Y, f_Z), \quad (4.3)$$

где  $H$  — фурье-образ функции импульсного отклика системы, который может быть найден в соответствии с

$$H(f_X, f_Y, f_Z) = \iiint_{-\infty}^{\infty} h(x, y, z) \exp[i2\pi(f_X x + f_Y y + f_Z z)] dx dy dz. \quad (4.4)$$

С точки зрения описанных определений формул (4.1)—(4.4) и рис. 4.1. рассмотрим общую задачу записи плоской голограммы  $H$  объекта  $D$  в монохроматическом свете с длиной волны  $\lambda$ . Если  $E_O$  и  $E_R$  — комплексные амплитуды объектного и опорного пучков в плоскости голограммы соответственно, то амплитудный коэффициент пропускания голограммы будет пропорционален интенсивности интерференционной картины, сформированной этими пучками:

$$H(x_h, y_h, z) = |E_O(x_h, y_h, z) + E_R(x_h, y_h, z)|^2, \quad (4.5)$$

где  $x_h, y_h, z$  — координаты в плоскости голограммы.

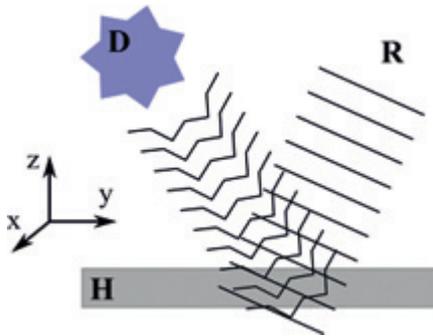


Рис. 4.1. Запись плоской голограммы  $H$  объекта  $D$  с опорным пучком  $R$

Теперь основной задачей расчета структуры плоской голограммы является нахождение значений функций комплексной амплитуды опорного и предметного пучков. Решение этой задачи в общем случае требует применения выводов строгой электромагнитной теории дифракции, что является математически сложным

подходом, требующим больших вычислительных затрат, что с точки зрения разработки системы голографической памяти является принципиальным ограничением. В силу этого необходимо ввести ряд упрощений.

В качестве первого упрощения положим, что опорным пучком является луч с плоским волновым фронтом, падающим по нормали к поверхности голограммы. Тогда его комплексная амплитуда запишется в виде

$$E_R(x_h, y_h, z) = Ae^{-ikz} + \text{к. с.}, \quad (4.6)$$

где  $k$  — волновой вектор.

Согласно (4.2) комплексная амплитуда поля предметной волны в плоскости голограммы может быть найдена в виде

$$E_O(x_h, y_h, z) = \iiint_{-\infty}^{\infty} E_O^0(x_0, y_0, z_0)h(x_h - x_0, y_h - y_0, z - z_0)dx_0dy_0dz_0, \quad (4.7)$$

где  $h(x_h - x_0, y_h - y_0, z - z_0)$  — комплексная амплитуда светового распределения в плоскости голограммы, созданного точечным источником, расположенным в точке  $(x_0, y_0, z_0)$ .

Тройной интеграл в (3.7) может быть сведен к двойному, принимая во внимание особенности поставленной задачи. В системе оптико-голографической памяти цифровые данные представляются в виде плоского объекта — двухмерной бинарной страницы [3]. Расположив страницу данных в плоскости, перпендикулярной оси  $z$ , получим следующее выражение:

$$E_O(x_h, y_h, z) = \iint E_O^0(x_0, y_0)h(x_h - x_0, y_h - y_0, z)dx_0dy_0. \quad (4.8)$$

В компьютерной голографии распространение света от поверхности объекта до поверхности голограммы подчиняется правилам скалярной теории дифракции [4, 5]. Исходя из интегральных выражений Кирхгофа — Рэлея — Зоммерфельда отклик  $h(x, y, z)$  можно представить в виде

$$h(x, y, z) = -i \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\exp\left(i2\pi \frac{z\sqrt{1 + (x^2 + y^2)/z^2}}{\lambda}\right)}{1 + \frac{x^2 + y^2}{z^2}}. \quad (4.9)$$

В качестве дальнейшего приближения положим, что геометрические размеры записываемого на голограмму объекта значитель-

но меньше расстояния от объекта до голограммы (дифракция в ближней зоне). В таком случае выражение (3.9) с точностью до фазового множителя можно упростить до

$$h(x, y, z) \propto \exp\left(i\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda z}\right). \quad (4.10)$$

Подставляя (3.10) в (3.8), получим:

$$E_O(x_h, y_h, z) \propto \iint E_O^0(x_0, y_0) \exp\left(i\pi \frac{(x_h - x_0)^2 + (y_h - y_0)^2}{\lambda z}\right) dx_0 dy_0. \quad (4.11)$$

Выражение (3.11) называется интегральным преобразованием Френеля. Используя теорему о свертке (3.3), распределение амплитуды предметной волны в плоскости голограммы можно рассчитать по формуле

$$E_O(x_h, y_h, z) \propto \tilde{F}^{-1}[\tilde{F}[E_O^0(x_0, y_0)] \cdot \tilde{F}[h(x_0, y_0, z)]]. \quad (4.12)$$

Метод расчета амплитуды поля, основанный на использовании формулы (4.12), известен как метод распространения углового спектра (УС) [2]. Далее раскроем скобки в квадратичном экспоненциальном члене и получим следующее выражение:

$$E_O(x_h, y_h, z) \propto \exp\left(i \frac{\pi}{\lambda z} (x_h^2 + y_h^2)\right) \times \iint E_O^0(x_0, y_0) \exp\left(i \frac{\pi}{\lambda z} (x_0^2 + y_0^2)\right) \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda z} (x_0 x_h + y_0 y_h)\right) dx_0 dy_0. \quad (4.13)$$

Исходя из этого также можно записать:

$$E_O(x_h, y_h, z) \propto \exp\left(i \frac{\pi}{\lambda z} (x_h^2 + y_h^2)\right) \tilde{F}\left[E_O^0(x_0, y_0) \exp\left(i \frac{\pi}{\lambda z} (x_0^2 + y_0^2)\right)\right]. \quad (4.14)$$

Метод расчета, основанный на использовании формулы (4.14), известен как метод прямого расчета (ПР) [2].

Если расстояние от объекта до голограммы таково, что выполняется условие

$$z \gg \frac{x_0^2 + y_0^2}{\lambda}, \quad (4.15)$$

то первый подынтегральный экспоненциальный член в (4.13) мало отличается от 1, а область, для которой выполняется (4.15), назы-

ваются зоной дифракции Фраунгофера. При этом выражение (4.13) сводится к

$$E_O(x_h, y_h, z) \propto \iint E_O^0(x_0, y_0) \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda z} (x_0 x_h + y_0 y_h)\right) dx_0 dy_0, \quad (4.16)$$

что является выражением для двумерного преобразования Фурье функции  $E_O^0(x_0, y_0)$ , а импульсный отклик, записанный в виде

$$f(x, y) = \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda z} (x^2 + y^2)\right), \quad (4.17)$$

известен также как ядро двумерного преобразования Фурье.

Используя известное свойство линзы как Фурье-объектива, дальнюю зону Фраунгофера можно наблюдать в фокусе линзы, что может значительно уменьшить габариты оптической схемы записи голограмм Фурье. Подробнее этот вопрос будет освещен в подразделе 4.1.4.

С точки зрения компьютерного синтеза голограмм страниц бинарных данных интерес вызывают дискретные формы уравнений (4.11) и (4.17):

$$E_O(m_h, n_h, z) = \sum_{m_0=0}^{M-1} \sum_{n_0=0}^{N-1} E_O^0(m_0, n_0) \exp\left(i\pi \frac{(m_h - m_0)^2 + (n_h - n_0)^2}{\lambda z}\right), \quad (4.18)$$

$$E_O(m_h, n_h) = \sum_{m_0=0}^{M-1} \sum_{n_0=0}^{N-1} E_O^0(m_0, n_0) \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} (m_h m_0 + n_h n_0)\right). \quad (4.19)$$

Уравнения (4.16) и (4.17) известны как дискретные преобразования Френеля и Фурье соответственно. Стоит добавить, что, используя алгоритмы быстрого преобразования Фурье (БПФ), формулы (4.16) и (4.17) можно рассчитать численно с низкими вычислительными затратами.

### 4.1.2. Компьютерный синтез голограммы Френеля

Для простоты рассмотрим схему записи голограммы Френеля страницы данных с использованием опорного пучка с плоским волновым фронтом, падающим перпендикулярно фоточувствительной пластине (рис. 4.2). Предметный (опорный луч) формиру-

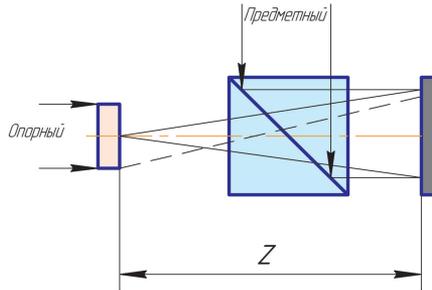


Рис. 4.2. Эквивалентная оптическая схема записи голограммы Френеля

ется частью падающей плоской волны, не рассеянной страницей данных.

В соответствии с (4.6) в плоскости пластины его интенсивность является постоянной функцией. Часть пучка, рассеянная страницей данных, формирует предметную волну, интенсивность которой может быть рассчитана в соответствии с формулой (4.11). Коэффициент пропускания пластины после проявления будет пропорционален интенсивности интерференционной картины, сформированной предметным и опорным пучками, тогда можно записать:

$$h(x_h, y_h) = |u(x_h, y_h, z) + c_z|^2 = uu^* + c_z^*u + c_zu^* + c_zc_z^*, \quad (4.20)$$

где  $c_z$  — амплитуда опорного пучка,  $u(x_h, y_h, z)$  — комплексная амплитуда светового поля, рассеянного записываемым объектом в плоскости фоточувствительной пластины,  $z$  — расстояние от объекта до фотопластины.

Обозначим оператор дискретного преобразования Френеля, представленный уравнением (4.18), в виде  $\tilde{Fr}[U(m, n)]$ . Исключив автокорреляционный множитель в (4.20) и учитывая, что  $C_z$  — матрица амплитуд плоской волны, падающей перпендикулярно поверхности голограммы, можно записать уравнение синтеза дискретной структуры амплитудного пропускания голограммы Френеля в виде

$$\begin{cases} H(m, n) = \text{Real}\{\tilde{Fr}[U(m, n, z)]\} + C_z^2 \\ C_z^2 \geq -\min[\text{Real}\{\tilde{Fr}[U(m, n, z)]\}]. \end{cases} \quad (4.21)$$

Дискретная структура голограммы и ограниченность разрешения современных ПМС накладывают значительные ограничения на размеры и количество элементов объекта, выбранного для записи. Также существенным фактором, влияющим на число отсчетов записываемого объекта, является наличие дифракционных порядков «0» и «-1», причем, как правило, порядок «-1» занимает площадь значительно большую по сравнению с полезным порядком «+1». Исходя из [4] и условия допустимости циклического сдвига допустимые параметры плоского дискретного объекта, выбранного для записи на голограмму, можно определить из соотношений

$$L \leq \frac{\lambda z}{2\Delta h}; M \leq \frac{N}{2} \left( 1 - 2 \frac{N(\Delta h)^2}{\lambda z} \right); \Delta x = \frac{\lambda z}{N\Delta h}, \quad (4.22)$$

где  $L$  — поперечный размер голографируемого объекта,  $M$  — количество дискретных отсчетов объекта,  $\Delta x$  — размер отсчета объекта,  $N$  — количество дискретных отсчетов голограммы,  $\Delta h$  — размер элемента голограммы,  $z$  — расстояние от плоскости объекта до плоскости голограммы,  $\lambda$  — длина волны излучения.

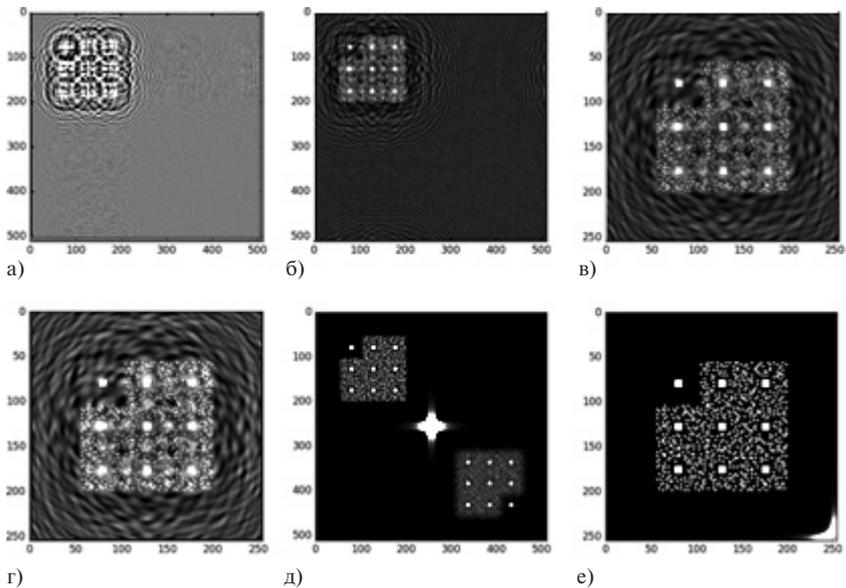
Для расчета амплитуды поля предметной волны  $U(m,n,z)$  в плоскости голограммы используют приближенные методы представления дифракции Френеля. Ранее упоминались два наиболее используемых метода, основанных на преобразовании Фурье, — метод УС (формула (4.12)) и метод ПР (формула (4.14)). Используя алгоритмы БПФ, распределение поля предметной волны можно рассчитать с незначительными вычислительными затратами. При выборе метода расчета между УС и ПР руководствуются тем условием, что в силу специфики БПФ метод УС наиболее подходит для вычисления поля в ближней зоне дифракции Френеля, в которой выполняется условие  $z < 2 \frac{\sqrt{N_1 N_2} \Delta h_1 \Delta h_2}{\lambda}$ , где  $N_1 = N_2 = N$ ,  $\Delta h_1 =$

$\Delta h_2 = \Delta h$ . Метод ПР наиболее точен для дальних зон дифракции Френеля, где  $z > 2 \frac{\sqrt{N_1 N_2} \Delta h_1 \Delta h_2}{\lambda}$  [5]. Стоит также упомянуть ме-

тоды, учитывающие особенности оптической системы [4], расчет дифракции Френеля через фрактальное фурье-преобразование [6].

Для восстановления голограмму Френеля необходимо осветить таким же световым пучком с плоским волновым фронтом, что использовался при записи или синтезе. Если параметры пучка не

менялись, то изображение записанного на голограмму планарного объекта восстановится в плоскости, отстоящей от плоскости голограммы на расстояние  $z_0$ . Интенсивность светового поля в плоскости восстановления пропорциональна преобразованию Френеля функции пропускания голограммы. На рис. 4.3 представлены результаты расчета структуры амплитудной голограммы Френеля и результаты численного восстановления рассчитанного поля при использовании методов УС и ПР. Моделирование проводилось для длины волны света  $\lambda = 632$  нм, размер пикселя голограммы



**Рис. 4.3.** а) Пример синтезированной амплитудной голограммы Френеля методом УС; б) численно восстановленное поле с голограммы, синтезированной методом УС; в) увеличенное изображение бинарной страницы данных, численно восстановленное с голограммы методом УС; г) пример синтезированной амплитудной голограммы Френеля методом ПР; д) численно восстановленное поле с голограммы, синтезированной методом ПР; е) увеличенное изображение бинарной страницы данных, численно восстановленное с голограммы методом ПР

2 мкм. В случае УС расстояние от объекта до голограммы  $z = 10$  см, в случае ПР  $z = 4$  мм.

Представленные результаты демонстрируют, что голограммы Френеля имеют ряд ограничений применения для системы голографической памяти. Среди основных недостатков голограмм Френеля можно отметить, во-первых, тот факт, что исходя из условий (4.22), число пикселей объекта всегда должно быть строго меньше половины числа пикселей голограммы  $N < M/2$  и уменьшается с уменьшением расстояния между плоскостью голограммы и плоскостью объекта. Кроме того, для корректной декодировки цифровых данных необходимо добиться формы элементов страницы данных, как можно более близкой к прямоугольной, поэтому необходимо каждый ее элемент представить двумя пикселями, что приводит к ограничению  $N < M/4$ . Вторым существенным недостатком голограмм Френеля является невозможность избавиться от массивного нулевого порядка в восстановленном голограммой поле. Тем не менее голограммы, рассчитанные методом ПР, являются вполне перспективными для использования.

### 4.1.3. Компьютерный синтез голограммы Фурье

В основе принципов синтеза голограмм Фурье лежит известное свойство сферической линзы: импульсный отклик системы на основе одной линзы, строящей изображение объекта, расположенного перед линзой, в задней фокальной плоскости линзы с точностью до фазового множителя может быть описан формулой двумерного преобразования Фурье [2].

#### 4.1.3.1. Эквивалентная оптическая схема синтеза голограммы Фурье

В качестве эквивалентной оптической схемы, использованной для разработки алгоритмов быстрого синтеза голограмм Фурье, лежит схема, представленная на рис. 4.4 [7, 8]. В представленной схеме опорный и предметный лучи формируются в одной плоскости  $(x_0, y_0)$ , являющейся передней фокальной плоскостью фурье-преобразующего объектива (ФПО) с фокусным расстоянием  $F$ , с помощью транспаранта, коэффициент пропускания которого состоит

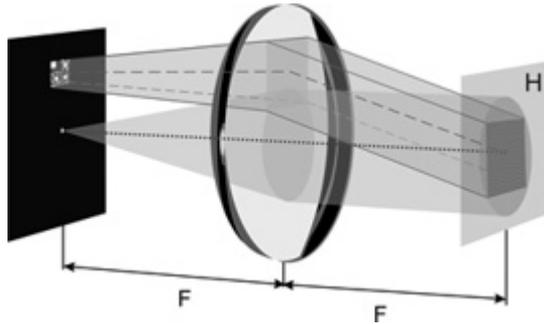


Рис. 4.4. Схема получения голограммы Фурье плоского объекта, лежащая в основе алгоритмов синтеза КСГФ

из  $\delta$ -функции, лежащей на оптической оси системы, и функции пропускания страницы данных  $d(x_0 + \Delta, y_0)$ , отстоящей на расстояние  $\Delta$  вдоль оси  $X$  от оптической оси. Пусть транспарант освещается плоской световой волной единичной амплитуды и длиной волны  $\lambda$ . Тогда в соответствии с теорией геометрической оптики в результате преобразований, производимых линзой, излучение от точечного источника преобразуется в плоскую волну — опорный пучок, распространяющийся вдоль оптической оси системы, а часть падающей волны, рассеянной транспарантом страницы данных, после прохождения линзы падает на плоскость  $(x_h, y_h)$  под углом  $\Theta = \arctan(\Delta/F)$ , формируя предметный луч. В соответствии с известным свойством линзы амплитуда светового распределения, даваемого предметным лучом в плоскости  $(x_f, y_f)$ , пропорциональна двумерному фурье-преобразованию функции  $d(x_1 + \Delta, y_1)$ .

Если в задней фокальной плоскости объектива  $(x_h, y_h)$  разместить фоточувствительную пластинку, то ее коэффициент амплитудного пропускания  $t(x_h, y_h)$  будет пропорционален суммарной интенсивности падающего излучения. В связи с этим можно записать:

$$H(x_h, y_h) = |u(x_h, y_h, z) + c_z|^2 = D^*\left(\frac{x_h}{\lambda F}, \frac{y_h}{\lambda F}\right) D\left(\frac{x_h}{\lambda F}, \frac{y_h}{\lambda F}\right) + c_z^2 + c_z D\left(\frac{x_h}{\lambda F}, \frac{y_h}{\lambda F}\right) \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda F} \Delta\right) + c_z D^*\left(\frac{x_h}{\lambda F}, \frac{y_h}{\lambda F}\right) \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda F} \Delta\right) + c_z^2, \quad (4.23)$$

где  $D(x_h, y_h)$  — фурье-образ функции  $d(x_1, y_1)$ ,  $\lambda$  — длина волны,  $c_z$  — константа.

### 4.1.3.2. Эквивалентная оптическая схема восстановления синтезированной голограммы Фурье

Для восстановления объекта фурье-голограммой, полученной в схеме с рис. 4.2, необходимо использование ФПО, а также источника когерентного излучения. Для разработки алгоритма численного восстановления компьютерно-синтезированной голограммы Фурье (КСГФ) может быть использована оптическая схема, изображенная на рис. 4.5. В схеме голограмма Н, расположенная в передней фокальной плоскости ФПО, освещается плоской когерентной волной. В задней фокальной плоскости ФПО световое распределение может быть рассчитано как двумерное фурье-преобразование от функции амплитудного пропускания голограммы в соответствии с

$$h(x_2, y_2) \sim \tilde{F}^{-1}\{H(x_h, y_h)\} = \{r \otimes r\}(x_2, y_2) + c_z r(x_2 - \Delta, y_2) + c_z r^*(x_2 + \Delta, y_2) + 2\pi c_z^2 \delta(x_2, y_2). \quad (4.24)$$

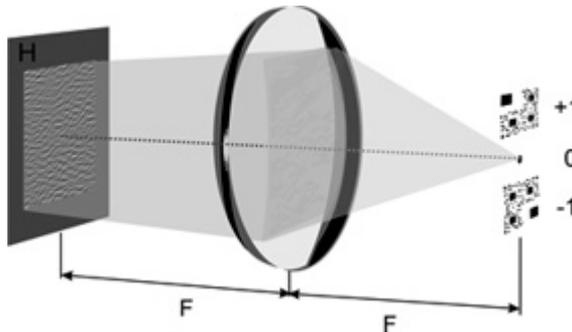


Рис. 4.5. Схема восстановления плоского объекта голограммой Фурье, лежащая в основе алгоритмов численного восстановления КСГФ

Восстановленное голограммой Фурье световое поле состоит из трех пространственно разнесенных областей: область автокорреляции записанного объекта, соответствующая 1-му слагаемому формулы (4.24), лежащей на оптической оси, яркий пик, соответствующий 4-му слагаемому, также лежащему на оптической оси, и два симметричных изображения, записанных на голограмму, отстоя-

щие на величину  $\pm\Delta$  от оптической оси вдоль оси  $X_2$ , соответствующие 2-му и 3-му слагаемым. Сопоставляя формулы (4.23) и (4.24), можно увидеть, что при численном расчете функции амплитудного пропускания голограммы автокорреляционный член, размер соответствующей области которого в задней фокальной плоскости ФПО, как правило, равен удвоенному размеру записанного на голограмму объекта, может быть исключен из формулы (4.24), так как представляет собой помеху при восстановлении объекта голограммой. Таким образом, формула синтеза фурье-голограммы (4.23) может быть представлена в упрощенном виде как

$$H(x_h, y_h) \sim \text{Re}\{\tilde{F}\{d(x_1 + \Delta, y_1)\}\} + C, \quad (4.25)$$

$$C \geq -\min(\text{Re}\{\tilde{F}\{d(x_1 + \Delta, y_1)\}\}). \quad (4.26)$$

Выражения (4.25) и (4.26) лежат в основе быстрых алгоритмов синтеза голограмм Фурье дискретных растровых объектов, таких как страницы бинарных данных, используемых в голографической памяти. Используя дискретное представление преобразования Фурье, представленное формулой (4.19), а также известные численные алгоритмы быстрого преобразования Фурье (БПФ), растровую структуру КСГФ можно рассчитать на бытовом персональном компьютере с низкими вычислительными затратами.

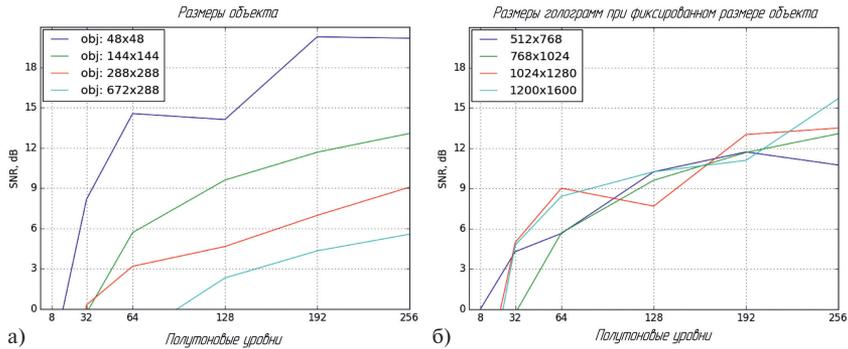
## 4.2. Свойства компьютерно-синтезированных голограмм Фурье, используемых при записи страниц бинарных данных

Большинство известных оптико-электронных устройств отображения двумерных компьютерных полутоновых изображений обладают характеристиками, принципиально ограничивающими возможности их применения для реализации синтезированных голограмм. Разрешение устройства определяет полосу пространственных частот объекта, выбранного для синтеза, что соответственно ограничивает разрешение или информационную емкость самого объекта. Динамический диапазон глубины модуляции устройств отображения определяет уровень шума в изображении объекта, восстановленного голограммой.

### 4.2.1. Ограничение динамического диапазона градаций амплитудного пропускания компьютерно-синтезированных голограмм Фурье

Известные устройства вывода изображений, такие как ПМС или микродисплеи, обладают ограниченным динамическим диапазоном квантования полутонного пропускания. Как правило, число представляемых ими уровней полутона ограничено 256 (8 бит), а в силу нелинейности передаточной характеристики эта величина получается еще меньше [9, 10]. Такая ситуация приводит к тому, что синусоидальный профиль интерференционных полос между предметным и опорным пучком аппроксимируется ступенчатой функцией. Квантование интенсивности интерференционной картины может привести к появлению пространственных шумов в восстановленном голограммой изображении и значительным его искажениям.

Объекты с закодированной информацией, используемые для голографической памяти, такие как двухмерные страницы двоичных данных, обладают широкой полосой пространственных частот. Высшие частоты пространственного спектра определяются положением, размером и формой элементарных символов (битов или пикселей) страницы данных, которые необходимо передать с максимальной возможной точностью для сохранения заложенной информации. Поскольку спектральная информация о каждом элементе объекта распределяется по всем пикселям голограммы, то при увеличении количества элементов кодируемой страницы данных возрастают требования к динамическому диапазону представления уровней полутона интерференционной структуры голограммы. Этот факт иллюстрируется изображением с рис. 4.6, а, на котором показаны графики зависимости величины отношения сигнал/шум (SNR) численно восстановленного изображения страницы данных при различных значениях разрешения страницы данных —  $144 \times 144$ ,  $288 \times 288$  и  $672 \times 288$  пикселей, и одного разрешения голограммы  $768 \times 1024$  пикселей. Отсюда видно, что приемлемое качество восстановления возможно лишь для небольшого объекта  $144 \times 144$  пикселя при сохранении не менее 128 уровней полутона голограммы. На рис. 4.6, б показаны зависимости величины SNR от числа градаций голограммы для случаев различной величины



**Рис. 4.6.** Зависимость величины отношения сигнал/шум численно восстановленного бинарного объекта от числа уровней градаций полутона синтезированных фурье-голограмм для следующих случаев: а) различные размерности кодируемой страницы данных при одном значении разрешения голограммы  $768 \times 1024$  пикселей; б) объект размерностью  $144 \times 144$  пикселей и различные значения разрешения синтезируемых голограмм

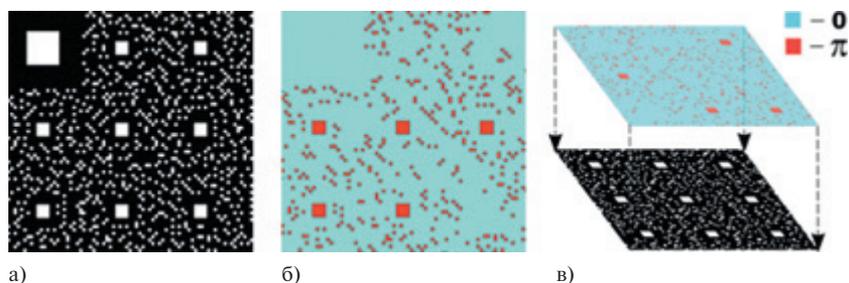
разрешения голограммы —  $512 \times 768$ ,  $768 \times 1024$ ,  $1024 \times 1280$  и  $1200 \times 1600$  пикселей при постоянном разрешении записываемого объекта  $144 \times 144$  пикселей. Из изображений 4.6, а и 4.6, б можно сделать вывод, что величина SNR сильно зависит от разрешения кодируемого объекта и слабо зависит от разрешения голограммы.

#### 4.2.2. Особенности фазового кодирования страницы бинарных данных при записи компьютерно-синтезированных голограмм Фурье

Проблема низкой эффективности голограмм, описанных в подразделе 4.2.1, объясняется тем обстоятельством, что в фурье-спектре растровых амплитудных объектов — страниц данных, имеется яркий пик нулевой частоты, а основная информация концентрируется вокруг определенных низкоконтрастных областей высокочастотной зоны. Для корректной записи такой голограммы необходимо использовать материалы с высоким динамическим диапазоном за-

писывающей среды. Во второй главе был описан классический метод «размытия» спектра записываемого объекта, основанный на использовании диффузоров. Также в работе [11] был описан способ повышения дифракционной эффективности (ДЭ) голограмм Фурье путем кодирования предметного пучка случайной фазовой маской. Для этого в классическую схему записи голограммы Фурье после транспаранта записываемого объекта размещался матричный прозрачный транспарант, элементы которого обладают случайно распределенными значениями величин фазовой задержки света  $0$  и  $\pi$ . Это привело к уменьшению интенсивности нулевого порядка и насыщению области высоких частот в фурье-спектре записываемого объекта. В случае системы голографической памяти для достижения максимального качества голограммы необходимо точно соотнести элементы записываемой страницы данных с элементами фазовой маски, что дополнительно усложняет оптическую схему формирования и записи голограмм. Аналогичный подход может быть использован и при синтезе амплитудных голограмм Фурье страниц бинарных данных [7–9].

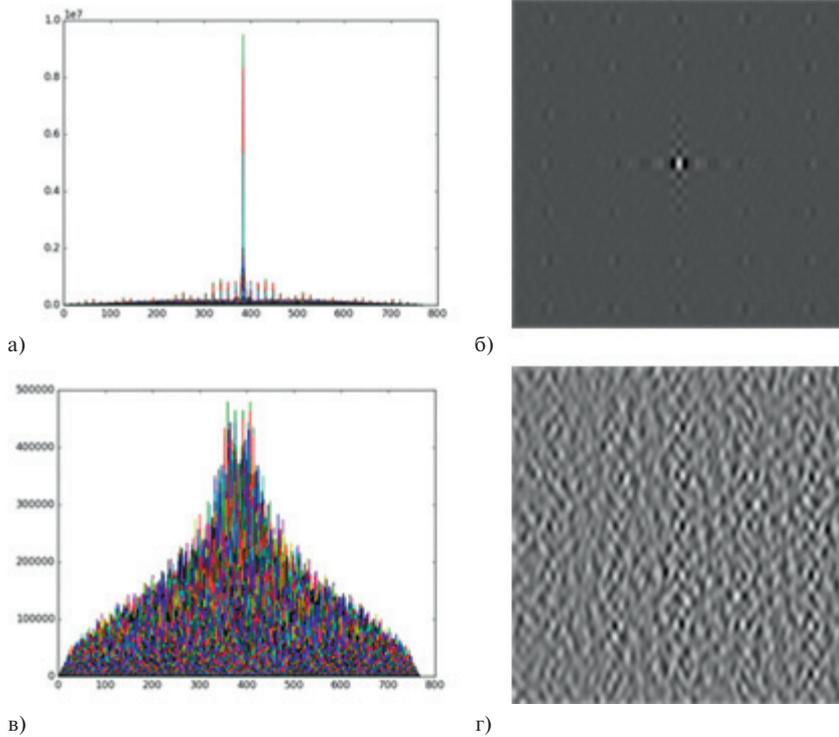
В случае компьютерного синтеза фазовая маска добавляется к объекту на стадии численного расчета структуры КСГФ (см. рис. 4.7). Также вид фазовой маски может быть скорректирован под каждый конкретный записываемый объект. Численное моделирование голограмм страниц данных с различными фазовыми масками показало, что наибольшую ДЭ имеют голограммы объектов, фазовая маска которых представлена случайно распре-



**Рис. 4.7.** Добавление двоичной фазовой маски к странице бинарных данных: а) страница данных стандарта ECMA-377; б) псевдослучайная фазовая маска; в) наложение маски на объект

деленными элементами со значениями 0 и  $\pi$  в показателе фазового аддитивного множителя. При синтезе голограммы эта операция может быть реализована путем замены значений некоторых случайным образом выбранных элементов бинарной страницы данных с 1 на  $-1$ .

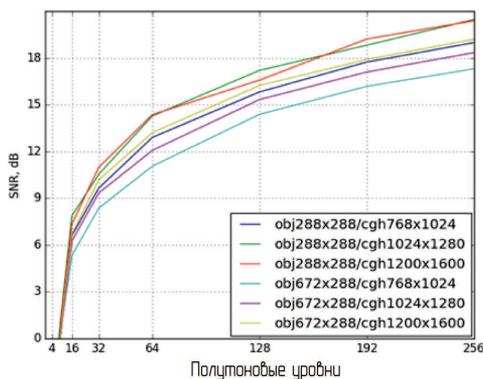
На рис. 4.8 проиллюстрирован эффект влияния случайной фазовой маски на пространственный спектр страницы данных.



**Рис. 4.8.** а) Профиль интенсивности пространственного спектра страницы данных без аддитивной фазовой маски; б) центральная область синтезированной голограммы страницы данных без аддитивной фазовой маски; в) профиль интенсивности пространственного спектра страницы данных со случайной фазовой маской; г) центральная область синтезированной голограммы страницы данных со случайной фазовой маской

В случае когда фазовая маска не используется, все значения страницы данных положительны, это приводит к появлению ярко выраженного пика в области нулевых частот в ее спектре. В высоко-частотной области спектра также имеются пики (рис. 4.8, а). Такая картина является причиной неравномерного распределения информации о странице данных по поверхности КСГФ (рис. 4.8, б). В случае использования фазовой маски пик нулевых частот вырождается, а распределение пространственной информации становится более равномерным (рис. 4.8, в, г).

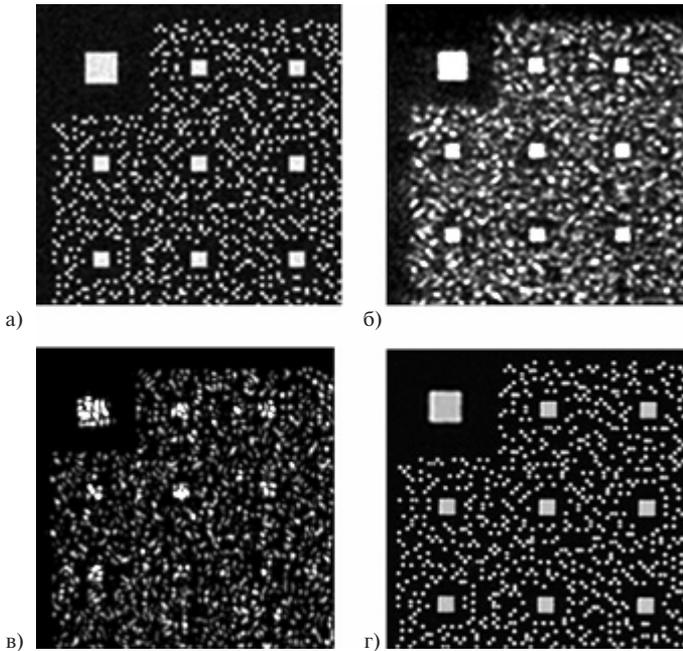
На рис. 4.9 представлены зависимости величины отношения сигнал/шум изображения страницы данных от числа уровней квантования полутонового пропускания голограммы для различных значений разрешения голограммы и страницы данных. Сравнивая графики с рис. 4.9, можно увидеть, что в случае фазово-кодированных объектов качество их восстановленных изображений одинаково слабо зависит от величин разрешения как голограммы, так и самого объекта.



**Рис. 4.9.** Зависимость величины отношения сигнал/шум изображений страниц данных от числа уровней квантования голограммы для различных значений разрешения синтезированной голограммы и разрешения кодируемой страницы данных в случае использования фазовых масок

Результаты экспериментального макетирования фурье-каскада и реализации КСГФ с помощью ПМС продемонстрировали зависимость качества восстановленных голограммой изображений от

используемой маски при синтезе. На рис. 4.10, б показано изображение страницы данных без аддитивной фазовой маски, восстановленное синтезированной голограммой на макете. Изображение имеет низкую яркость и высокий уровень шума, вызванный дискретизацией и квантованием пропускания голограммы. Рассчитан-



**Рис. 4.10.** Изображения страниц данных, восстановленных КСГФ: а) численно рассчитанное изображение страницы данных, восстановленное голограммой, представленной 256-уровневой функцией пропускания в случае, когда алгоритмы фазового кодирования объекта не применялись при синтезе КСГФ; б) экспериментально восстановленное изображение страницы данных в случае без фазового кодирования; в) изображение, экспериментально восстановленное голограммой в случае кодирования опорного объекта случайной фазовой маской; г) изображение, экспериментально восстановленное голограммой в случае кодирования опорного объекта скорректированной псевдослучайной фазовой маской

ная дифракционная эффективность в этом случае составила порядка 23%. В случае использования стандартных генераторов случайных величин для синтеза фазовой маски расчетная дифракционная эффективность голограмм достигла 47%, однако изображения, восстановленные экспериментально, оказались трудно читаемыми. Причиной этого послужил эффект интерференции, возникающий между соседними пикселями с разным значением фазы, принадлежащих одному неразрывному элементу страницы данных (рис. 4.8, в). После соответствующей корректировки фазовой маски искажения пропали, качество изображения оказалось достаточным для считывания и безошибочной цифровой декодировки (рис. 4.7, г). Расчетная дифракционная эффективность КСГФ в этом случае составила порядка 43%.

По итогам численного моделирования КСГФ было установлено, что для корректного восстановления записанного объекта голограмма, которая рассчитывалась с кодированием объекта случайной фазовой маской, может быть представлена в виде полутонного дискретного транспаранта с сохранением 16 уровней градации полутонного пропускания, в то время как в случае синтеза без применения фазовой маски количество уровней должно быть не менее 128, а при минимально возможном ограничении в 256 уровней в численно-восстановленных изображениях наблюдаются заметные искажения (рис. 4.10, а).

### **4.2.3. Ограничение плотности записи цифровой информации на компьютерно-синтезированную голограмму Фурье**

Дискретизация двумерной структуры голограммы для отображения с помощью ПМС приводит к ограничению полосы пространственных частот объекта, выбранного для записи на голограмму. Рассмотрим эту зависимость на примере одномерного аналога эквивалентной схемы получения КСГФ, представленной на рис. 4.11 [7]. Пусть страница бинарных данных реализована с помощью дискретного транспаранта с размером элементарной ячейки  $d_1$ , расположенного в передней фокальной плоскости фурье-объектива. Также пусть транспарант освещен световой волной с длиной вол-

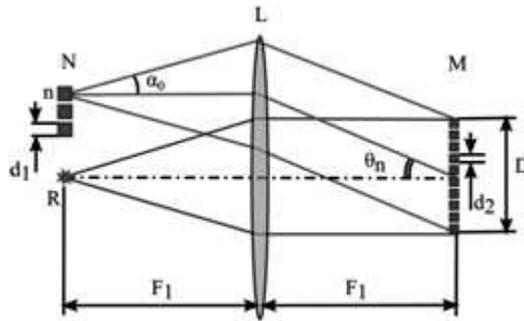


Рис. 4.11. Проекция оптической схемы получения КСГФ

ны  $\lambda$  и с плоским волновым фронтом, направленным параллельно оптической оси системы.

Световой луч, проходящий через элемент с порядковым номером  $n$ , считая от оптической оси, и размером отверстия  $d_1$  дифрагирует на апертуре этого элемента и на большом расстоянии от плоскости транспаранта, большем, чем  $z > d_1^2 / \lambda$ , преобразуется в пучок со сферическим волновым фронтом с центром кривизны, лежащим в центре элемента. Амплитуда пучка зависит от угла  $\alpha$  между нормалью к плоскости элемента и направлением луча, распространяющегося в рассматриваемую точку, в соответствии с<sup>1</sup>

$$E(\alpha) = \text{sinc}\left(\frac{\alpha d_1}{\lambda}\right). \quad (4.27)$$

Когда  $\alpha = \alpha_0 = \pm \lambda / d_1$ , амплитуда световой волны обращается в нуль. Область, в которой  $\alpha \geq \alpha_0$ , является областью второго и более высоких порядков дифракции, суммарная амплитуда которых значительно ниже амплитуды главного максимума. Основная часть световой энергии сконцентрирована в пределах области

<sup>1</sup> Поскольку в устройствах голографической памяти при считывании информации производится оцифровка изображений страниц данных, желательнее, чтобы при восстановлении изображений голограммой форма их элементов (пикселей) была приближена к квадратной или прямоугольной. Этим объясняется выбор функции **sinc** для описания светового поля, прошедшего через единичный элемент.

главного максимума, поэтому минимальный размер голографического носителя должен быть достаточен, чтобы эту область зафиксировать. Поперечный размер светового пятна в плоскости линзы  $L$  от единичного элемента транспаранта равен

$$D_L = 2F_1 \sin \alpha_0 \approx \frac{2F_1 \lambda}{d_1}. \quad (4.28)$$

Линза  $L$  преобразует сферический волновой фронт в плоский с волновым вектором, направление которого составляет с оптической осью угол, который определяется из соотношения

$$\sin \theta_n = \frac{nd_1}{F_1}. \quad (4.29)$$

В задней фокальной плоскости фурье-объектива центр главного максимума светового распределения от  $n$ -го элемента страницы данных находится на оптической оси, а размер его области, в силу планарности волнового фронта, равен

$$D = D_L = \frac{2F_1 \lambda}{d_1}. \quad (4.30)$$

Величина  $D$  определяет минимальный размер записываемой голограммы. Уравнения (4.34), (4.36) выполняются для каждого пикселя голограммы.

Цифровой синтез голограмм для вывода на ПМС подразумевает, что рассчитанная голографическая структура будет представлена в виде растрового изображения. Пусть размер элементарной ячейки голографического носителя в эквивалентной схеме рис. 4.11 равен  $d_2$ , тогда  $M = D/d_2$  — количество элементарных ячеек носителя, укладываемых по длине голограммы. Значение величины  $d_2$  определяет разрешение объекта, выбранного для записи.

В соответствии с уравнением (4.30) и рис. 4.12 наименьший период  $T_n$  интерференционной картины между опорным пучком и пучком от  $n$ -го элемента объекта определяется как

$$T_n = \frac{\lambda}{\sin \theta_n} = \frac{\lambda F_1}{nd_1}. \quad (4.31)$$

Из уравнения (4.38) следует, что величина периода  $T_n$  обратно пропорциональна расстоянию между опорным пучком и пучком

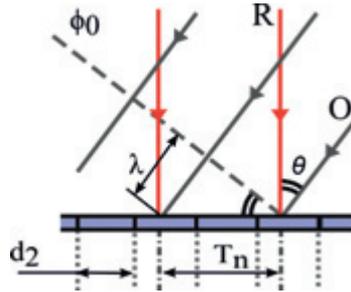


Рис. 4.12. Интерференция объектного пучка от  $n$ -го элемента  $O$  и опорного пучка  $R$  на поверхности дискретного голографического носителя  $H$ :  $\phi_0$  — поверхность постоянной фазы предметного пучка

от  $n$ -го элемента в передней фокальной плоскости фурье-объектива. Это является причиной фундаментального ограничения размера объекта, записываемого на голограмму Фурье с дискретной структурой. В соответствии с критерием теоремы Котельникова существует предел числа элементов дискретного объекта  $N_{max}$ , при котором частота интерференционной картины между опорным пучком и соответствующим элементом сравняется с размером двух элементарных ячеек носителя, т.е.  $T_n = 2d_2$ . Если страница данных будет иметь больше, чем  $N_{max}$  элементов, часть пространственной информации о ней будет утеряна. В соответствии с этим можно записать:

$$\frac{\lambda F_1}{N_{max} d_1} = 2d_2 = \frac{2D}{M}, \quad (4.32)$$

или, используя (4.37):

$$N \leq N_{max} = \frac{M}{4}. \quad (4.33)$$

В соответствии с формулой (4.33) число элементов страницы данных для записи на фурье-голограмму не может превышать четверти числа элементов синтезируемой голограммы. Этот вывод был получен исходя из одномерной модели. Однако стоит учесть тот факт, что величина  $d = d_1 n$  определяет расстояние от точечного источника до рассматриваемого прямоугольного элемента в положительном направлении — вверх по вертикали

в предметной плоскости на рис. 4.11. Аналогичные рассуждения будут также действительны для элементов, расположенных ниже точечного источника. Однако, поскольку в восстановленном амплитудной голограммой Фурье световом поле помимо изображения записанного объекта всегда присутствует сопряженное изображение, элементы с положительным смещением будут перекрываться с элементами с отрицательным смещением, делая условие (4.33) верным для одномерного случая. Однако данное обстоятельство можно учесть при переходе к двухмерной модели, когда достаточно сместиться вдоль одного направления только по вертикали или только по горизонтали в предметной плоскости. Поэтому требование к числу элементов двухмерной голограммы можно записать следующим образом:

$$N_1 N_2 \leq \frac{M_1 M_2}{8}. \quad (4.34)$$

Стоит отметить, что соотношения (4.40) и (4.41) не зависят от величин  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $F$ , и  $\lambda$  и верны для любой системы записи голограмм дискретных растровых объектов на дискретные растровые голографические носители. На практике условия (4.33) и (4.34) реализуются путем представления каждого элемента страницы данных двумя или более пикселями в одномерном случае и четырьмя или более пикселями в двухмерном случае синтеза. При этом размерность страницы данных выбирается в 2 раза меньше размерности синтезируемой голограммы.

### **4.3. Проекционный метод и одноканальная оптическая система записи двухмерных микроголограмм Фурье на фоточувствительный материал**

Возможность вывода КСГФ с помощью электронно-управляемых транспарантов по типу ЖК ПМС или OLED позволяет записывать голограммы на фоточувствительный носитель, используя простую схему оптической проекции [12]. На рис. 4.13 представлена принципиальная схема оптической проекционной записи КСГФ на

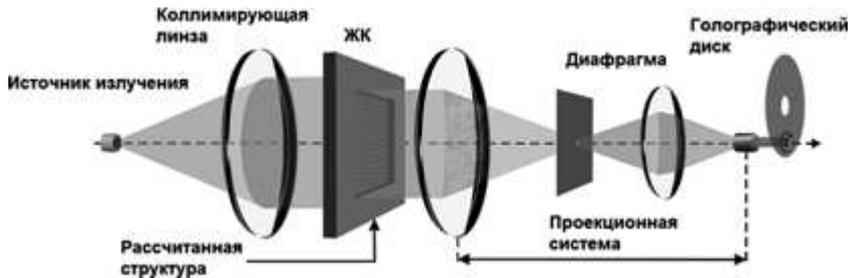


Рис. 4.13. Принципиальная схема оптической проекционной записи КСГФ на фоточувствительный носитель

фоточувствительный носитель (ФН). Схема состоит из источника излучения, коллимирующей оптики, необходимой для формирования светового пучка, равномерно освещающего апертуру транспаранта, непосредственно транспаранта, проекционной системы записи, состоящей из фурье-преобразующего объектива (ФПО), диафрагмы, фурье-восстанавливающего объектива (ФВО), а также дополнительных оптических элементов. Проекционная система предназначена для переноса структуры в плоскости транспаранта в плоскость голографического носителя с требуемым уменьшением. Для записи нескольких голограмм страниц данных голографический диск устанавливается на соответствующие устройства пространственного перемещения и поворота.

Диафрагма, расположенная в фурье-плоскости проекционной системы, предназначена для фильтрации высоких пространственных частот в спектре пространственно-дискретной структуры, выведенной на экран транспаранта. Рассмотрим параметры этой диафрагмы. ФПО производит преобразование плоскости транспаранта в свою заднюю фокальную плоскость, которое с точностью до фазового множителя может быть математически описано как двумерное преобразование фурье-функции пропускания транспаранта. Если функция пропускания транспаранта является структурой КСГФ, то световое распределение в задней фокальной плоскости будет представлять собой яркий пик на оптической оси и два центрально-симметричных относительно пика изображения страницы данных, закодированного на голограмму. Кроме того, в силу пространственно-дискретной природы транспаранта эта

картина будет периодически повторяться, представляя собой высшие зоны Найквиста, повторяющиеся с шагом

$$D = \frac{2\lambda f}{d}, \quad (4.35)$$

где  $\lambda$  — длина волны,  $f$  — фокусное расстояние ФПО,  $d$  — размер элемента дискретной структуры транспаранта. Таким образом, величина  $D$  определяет минимальные размеры апертуры диафрагмы.

### 4.3.1. Теоретическое моделирование оптической системы получения компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье

Основными источниками возникновения шумов и искажений восстановленных изображений страниц данных голограммами, записанными в проекционной схеме, являются нелинейность передаточной функции модулятора, дифракционные и абберационные искажения оптической схемы и нелинейность записывающего материала.

В качестве электронно-управляемого транспаранта для вывода рассчитанных структур КСГФ могут быть использованы пространственные модуляторы света (ПМС), такие как, например, ЖК ПМС. Одной из основных характеристик ЖК ПМС, определяющей возможности их применения для компьютерной голографии, является функция зависимости выходного уровня прозрачности (или светимости) от уровня поданного на нее полутонового сигнала — гамма-функция. От того, насколько линейна эта функция, зависит динамический диапазон модуляции пропускания модулятора. Искривления этой характеристики приводят к искажениям функции пропускания голограммы и возрастанию гармонических шумов в восстановленном голограммой световом поле. Как правило, известные ЖК-модуляторы обладают нелинейной гамма-функцией. Типичный пример гамма-функции ПМС представлен на рис. 4.14.

На рис. 4.15 представлен результат численного моделирования восстановления светового распределения КСГФ нелинейной передаточной гамма-характеристикой. Характер искажений моде-

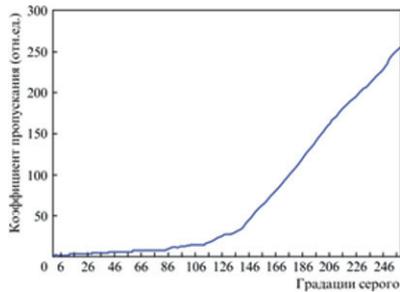


Рис. 4.14. Пример передаточной характеристики полутоновых градаций коммерчески доступного ПМС

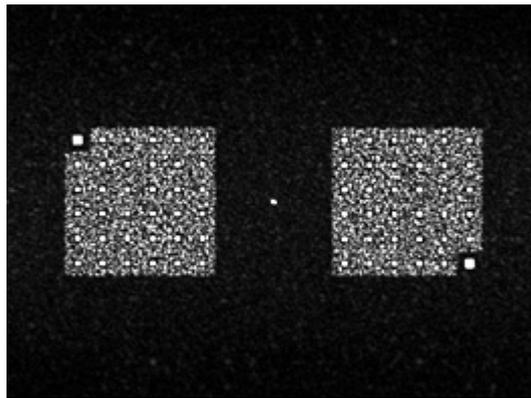


Рис. 4.15. Изображение страницы данных, численно восстановленное голограммой с сильно искаженной передаточной характеристикой

лировался исходя из известных характеристик ЖК ПМС и коммерчески доступных фоточувствительных носителей. Из представленного изображения видно, что при подобных искажениях по всему восстановленному полю появляются шумы и помехи, по размеру сопоставимые с элементами закодированной на голограмму страницы данных. Шумы представляют собой яркие локальные всплески, что указывает на их гармоническую природу. Данный



пример указывает на необходимость подробного анализа передаточной гамма-характеристики градаций функции пропускания микроголограммы, записанной проекционным методом с помощью ПМС. Зная эту характеристику, можно численно предсказать амплитудную функцию голограммы так, чтобы при записи характеристика линейризовалась. Данная операция также называется гамма-коррекцией ПМС.

Неидеальность проекционной оптической схемы устройства проекционной записи КСГФ также влияет на качество записанных голограмм. Если допустить, что проекционная оптическая система является дифракционно-ограниченной и размер изображения пикселя голограммы не превышает дифракционного предела, то ограничивающим фактором при записи голограмм проекционным методом является передаточная функция оптической системы. Если при записи используется некогерентный источник, то частотный отклик характеризует оптическая передаточная функция:

$$I(x_2, y_2) = F^{-1}\{\tilde{I}(x_1, y_1) * H(x, y)\}, \quad (4.36)$$

где  $I(x_2, y_2)$  — интенсивность изображения голограммы в плоскости фоточувствительного материала,  $\tilde{I}(x_1, y_1)$  — фурье-спектр голограммы,  $H(x, y)$  — передаточная оптическая функция. При анализе частотной характеристики оптической системы рассматривают модуль ОПФ — модуляционно-передаточную функцию. Модуляционно-передаточная функция определяет зависимость контраста гармонического объекта от его частоты. На рис. 4.16 представлен пример МПФ проекционного объектива, разработанного специально для устройства записи КСГФ. Из рисунка видно, что гармоники голограммы с высокой частотой, которые формируют точки на большем удалении от нулевого порядка, проектируются с меньшим контрастом, а следовательно, дифракционная эффективность восстановления таких точек будет меньше.

Аналогичным образом подобные нелинейности могут проявляться и в случае фотохимических процессов, происходящих во время обработки и фиксации фоточувствительного материала после записи голограммы [13].

Также существенной причиной снижения величины отношения сигнал/шум восстановленных изображений страницы данных при

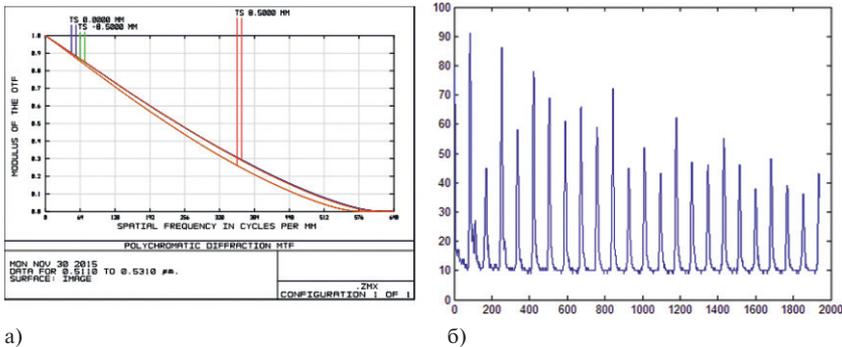


Рис. 4.16. а) Пример МПФ оптической проекционной системы; б) профиль строки бинарного изображения страницы данных, численно восстановленной голограммой с учетом влияния МПФ оптической системы

физической реализации КСГФ является тот факт, что в отличие от численных моделей, представленных ранее, где функции пропускания голограммы представлены набором дельта-функций, в реальном мире голограмма представляется дискретным набором элементов с ненулевым размером. К примеру, в случае реализации с помощью ЖК ПМС элементы микродисплея имеют прямоугольную форму, поэтому в восстановленном голограммой поле будут наблюдаться не чистые изображения закодированных объектов, а изображения, промодулированные функцией огибающей отклика одного пикселя, — функцией  $\text{sinc}\left(\frac{d_1 x}{\lambda F}\right)\text{sinc}\left(\frac{d_2 y}{\lambda F}\right)$ , как проиллюстрировано на рис. 4.17.

Для борьбы с эффектом изменения интенсивности восстановленных изображений страницы данных можно воспользоваться такими методами, как численное предсказание записываемых объектов перед записью на фотоноситель, а также постобработка восстановленных изображений страниц данных, заключающаяся в выравнивании интенсивности. Эти процедуры возможны только в случае, когда все передаточные характеристики хорошо известны.

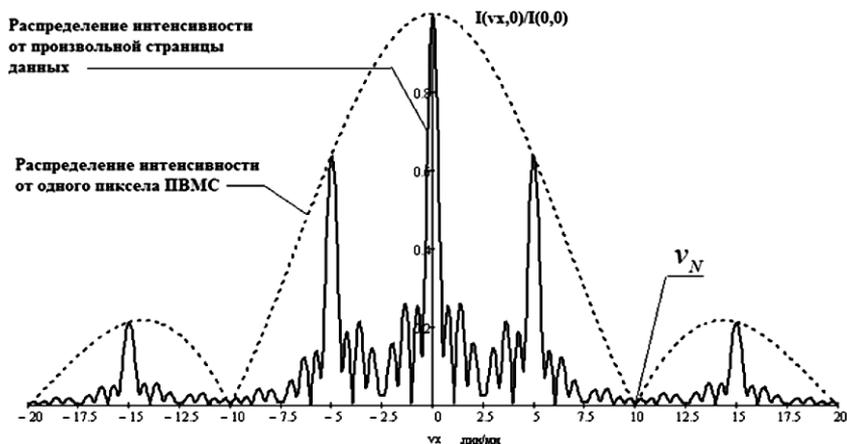


Рис. 4.17. Распределение интенсивности светового поля, восстановленного КСГФ страницы данных с учетом конечного размера элементарной ячейки ПМС, использованного для отображения голограммы

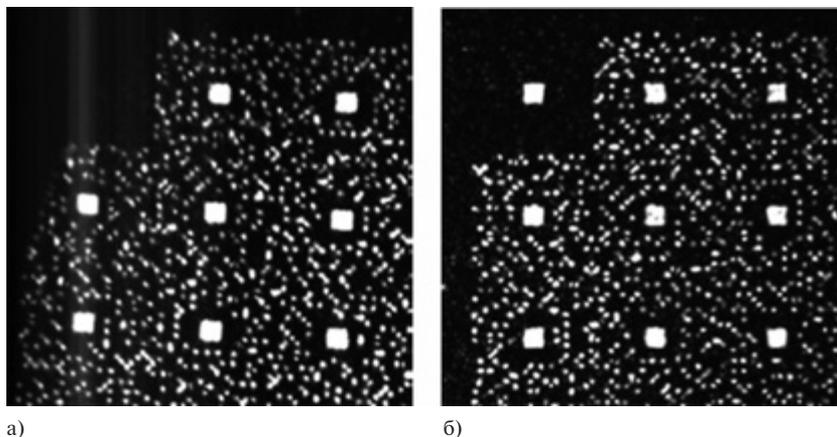
### 4.3.2. Варианты построения проекционной оптической системы записи компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье на фоточувствительный материал

Современные технологии производства микродисплеев открывают широкие возможности для вывода и оптической реализации компьютерных растровых изображений. Среди коммерчески доступных устройств наиболее перспективными для реализации в схеме проекционной записи КСГФ можно считать жидкокристаллические модуляторы, микромеханические модуляторы и микродисплеи на органических самосветящихся диодах. Ниже представлены примеры применения перечисленных устройств для записи КСГФ, перечислены их преимущества и недостатки, а также приведены схемы построения устройств проекционной записи КСГФ на их основе.

### 4.3.2.1. Источники излучения для проекционной оптической системы записи КСГФ

Традиционным источником излучения для записи голограмм по классической двухлучевой схеме является лазер. Проведенные исследования [8] демонстрируют, что для проекционной записи КСГФ может быть использован также светодиод (СД), причем его применение обладает рядом преимуществ, связанных с отсутствием спекловых шумов.

На рис. 4.18 изображены примеры страниц данных, восстановленных голограммами, записанными как в когерентной схеме записи 4.18, а, так и в некогерентной — 4.18, б. В качестве фоточувствительного носителя при проведении этих экспериментов были использованы голографические пластины ПФГ-01. Сравнительный анализ восстановленных изображений продемонстрировал, что существенного отличия в качестве изображений нет. При когерентной проекции несколько выше уровень шума, но это не мешает регистрации восстановленного изображения ПЗС-матрицей.



**Рис. 4.18.** Страница данных формата ЕСМА-377, экспериментально восстановленная с КСГФ в случаях а) когерентного источника; б) некогерентного источника

### 4.3.2.2. Особенности использования современных пространственных модуляторов света в проекционной оптической системе записи микроголограмм Фурье

На настоящий момент существует несколько типов пространственных модуляторов света, позволяющих осуществить вывод и реализацию компьютерных растровых изображений. Все эти типы имеют свои преимущества и недостатки, а также требуют специфической для каждого типа архитектуры схемы оптической проекции. Среди основных типов ПМС выделяют следующие:

- 1) жидкокристаллический (ЖК или LC) ПМС (рис. 4.19, а). Данный тип модулятора работает в режиме пропускания;
- 2) ПМС с архитектурой «жидкий кристалл на кремниевой подложке» (ЖККП или LCoS). Данный тип ПМС работает в режиме отражения (рис. 4.19, б);
- 3) микромеханический (ММ) или с деформируемым микрозеркалом (DMD — deformable micromirror device) ПМС. В устройствах этого типа элементы представлены микрозеркалами на подвижных штативах (рис. 4.19, в).

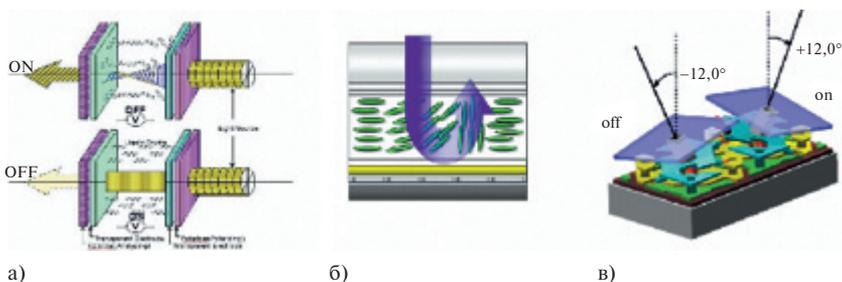


Рис. 4.19. Типы ПМС, возможных для использования в проекционной оптической схеме записи КСГФ на фоточувствительный носитель

Также к списку перечисленных устройств стоит добавить самоизлучающие микродисплеи на органических светоизлучающих диодах (OLED).

**Жидкокристаллический пространственный модулятор**

На рис. 4.20. представлена оптическая схема проекции КСГФ на голографический носитель, основанная на жидкокристаллическом пространственном модуляторе света (ЖК ПМС). Световой луч, испущенный источником 1, расширяется и пространственно фильтруется с помощью коллиматора, состоящего из микрообъектива 2, диафрагмы 3 и объектива 4. Далее луч освещает апертуру ЖК ПМС, управляемого с персонального компьютера. Поляризатор 5 и анализатор 7 установлены таким образом, чтобы изображение, выведенное на экран ПМС, наблюдалось с максимальным амплитудным контрастом. ФПО 8 и ФВО 10 формируют телескопическую оптическую систему, переносящую изображение с экрана ПМС в плоскость голографического носителя 11. Диафрагма 9, расположенная в плоскости фурье-частот телескопической системы, производит пространственную фильтрацию пространственных гармоник в фурье-спектре голограммы, вызванных дискретной структурой ПМС. Если на экран ЖК ПМС выведена структура КСГФ страницы данных, то в плоскости голографического носителя 11 появится уменьшенное изображение КСГФ, которое может быть зафиксировано фотохимическими методами.

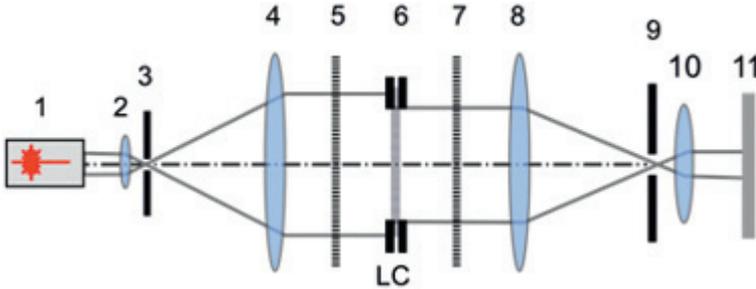


Рис. 4.20. Схема записи КСГФ на ФН, основанная на ЖК ПМС просветного типа

Величина уменьшения схемы может быть рассчитана из отношения

$$M = \frac{F_1}{F_2}, \tag{4.37}$$

где  $F_1$  и  $F_2$  — фокусные расстояния ФПО и ФВО соответственно.

Преимуществом схемы проекционной записи, основанной на амплитудном ЖК ПМС просветного типа, является удобство использования благодаря ее линейной конфигурации. Однако стоит отметить, что в силу того что ЖК ПМС работает в режиме пропуска, электроника, управляющая его элементами, находится непосредственно внутри апертуры оптического канала системы. Это обстоятельство в значительной степени влияет на фактор заполнения (fillfactor), который, как правило, не превышает 60%, а также ограничивает возможности по увеличению числа элементов экрана и по миниатюризации всего устройства в целом. Максимально доступная размерность экрана ЖК ПМС —  $1280 \times 1024$  элементов, минимальный размер элемента — 26 мкм.

***Жидкокристаллический на кремниевой подложке пространственный модулятор света***

Данный тип ПМС работает в режиме отражения, поэтому вся электроника, управляющая элементами экрана, выведена из оптического тракта. Кроме того, такая архитектура позволяет создать устройства с рекордным количеством дискретных элементов экрана. Лучшие коммерчески доступные образцы обладают порядком 10 миллионов пикселей. При этом размер одного пикселя может составлять всего 6—8 мкм. Однако у отражающей архитектуры имеется и ряд недостатков.

На рис. 4.21 представлена принципиальная схема устройства проекционной записи КСГФ, основанная на ЖККП ПМС. Световой поток, испущенный источником 1, коллимируется с помощью системы линз 2, 4 и диафрагмы 3 для обеспечения равномерной засветки апертуры ПМС 6. Сколлимированный пучок с помощью светоделительного кубика 5 направляется в плоскость ЖККП ПМС, на экран которого выводится изображение синтезированной голографической структуры. Отразившись от ПМС, промодулированный пучок сквозь светоделительный кубик направляется в проекционную схему, которая аналогично схеме на ЖК ПМС состоит из ФПО 7, ФВО 9 и диафрагмы 8. Проекционная система производит оптический перенос плоскости ПМС в плоскость голографического диска 10 с требуемым уменьшением. Для обеспечения амплитудного режима работы ЖККП ПМС грани  $a$  и  $b$  светоделительного кубика имеют поляризационное покрытие со взаимно-перпендикулярной ориентацией вектора поляризации.

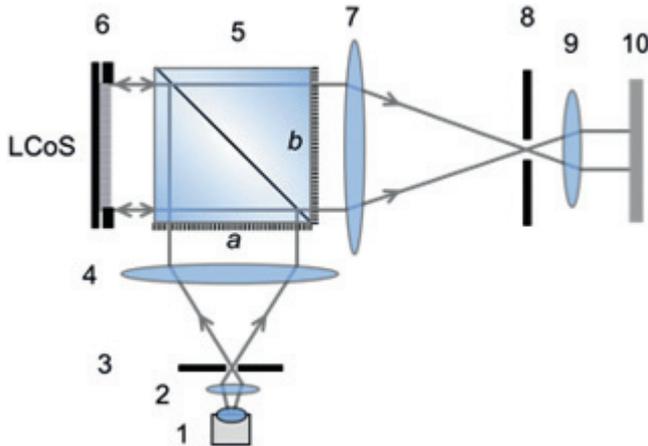


Рис. 4.21. Схема записи КСГФ на ФН, основанная на ЖККП ПМС отражающего типа

Голографический диск 10 размещается на подвижной подложке для обеспечения возможности записи КСГФ по всей поверхности диска. Уменьшение такой схемы рассчитывается в соответствии с формулой (4.37).

Недостатком схемы является необходимость использования дополнительного элемента — светоделительного кубика, из-за чего усложняется схема, а также происходит потеря светового потока. Тем не менее эта схема является одной из самых перспективных для реализации.

#### *Микромеханический пространственный модулятор света*

Особенностью устройства ММ-ПМС является представление элементов экрана с помощью микрзеркал, размещенных на наклоняющихся либо в одну, либо в противоположную сторону кронштейнах. Направление наклона зеркала зависит от поданного на этот элемент электрического сигнала. Как правило, величина угла наклона зеркала составляет порядка 10—12 градусов. Исходя из технического устройства очевидно, что ММ-ПМС является исключительно бинарным амплитудным модулятором. Однако благодаря тому, что скорость переключения элемента экрана составляет десятки или сотни килогерц, возможна передача полутоновых зна-

чений элементов выводимого изображения за счет разного числа «миганий» зеркала элемента за время экспозиции кадра. Чем выше полутоновое значение элемента, тем больше раз его микрозеркало должно перейти в открытое состояние в течение одного кадра.

На рис. 4.22 представлена принципиальная схема устройства оптической проекционной записи КСГФ на фоточувствительный носитель. Излучение источника 1 коллимируется и очищается системой из линз 2, 4 и диафрагмы 3. Сколлимированный световой пучок падает на поверхность матрицы ММ-ПМС 5 под углом, величина которого выбирается исходя из технического устройства модулятора и требования, чтобы зеркало в открытом состоянии отражало свет по нормали к плоскости экрана. Далее промодулированный пучок проецируется на фоточувствительный носитель 9 с помощью ФПО 6 и ФВО 8, а также пространственно фильтруется диафрагмой 7, расположенной в фурье-плоскости проекционной схемы. Уменьшение такой схемы рассчитывается в соответствии с формулой (4.37).

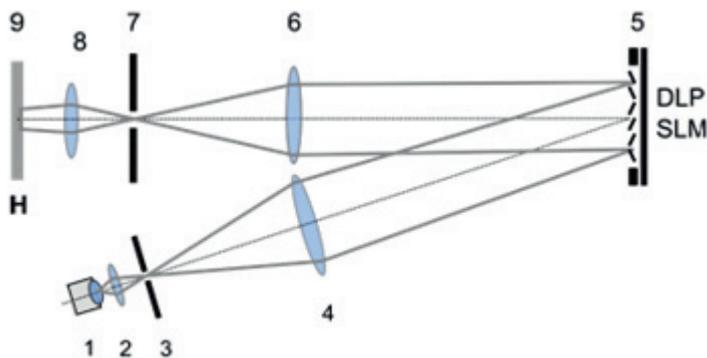


Рис. 4.22. Схема записи КСГФ на ФН, основанная на ММ-ПМС

Недостатком устройства проекционной оптической записи КСГФ, основанной на ММ-ПМС, является необходимость подбора фоточувствительного материала, способного фиксировать полутоновые элементы проецируемой структуры синтезированной голограммы в импульсном бинарном режиме во временной развертке. На настоящее время данный вопрос не исследован.

Сегодня коммерчески доступен ММ-ПМС с экраном размерности  $1920 \times 1080$  элементов и размером элемента около 10 мкм.

#### 4.3.2.3. Особенности использования современных OLED-микродисплеев в проекционной оптической системе записи микроголограмм Фурье

Применение самосветящихся микродисплеев, таких как OLED (organic light emitting diode), в схеме проекционной оптической записи КСГФ позволяет создать максимально компактное записывающее устройство за счет отсутствия необходимости использования источника света и системы коллимационных линз.

На рис. 4.23 представлена принципиальная схема построения устройства проекционной записи КСГФ на основе самосветящегося микродисплея, работающего по принципу OLED. Схема состоит из непосредственно дисплея 1 и проекционной оптической системы, состоящей из ФПО 2, диафрагмы 3 и ФВО 4, а также фоточувствительной пластины 5. Уменьшение такой схемы рассчитывается в соответствии с формулой (4.37).

Также стоит рассмотреть принципиальную схему самого ком-

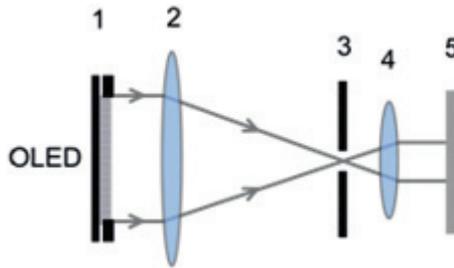


Рис. 4.23. Схема записи КСГФ на ФН, основанная на OLED-микродисплее

пактного варианта построения устройства проекционной оптической записи КСГФ на основе OLED-дисплея, представленную на рис. 4.24. В данном случае проекционная схема состоит только из одной линзы, переносящей плоскость экрана D в плоскость голо-

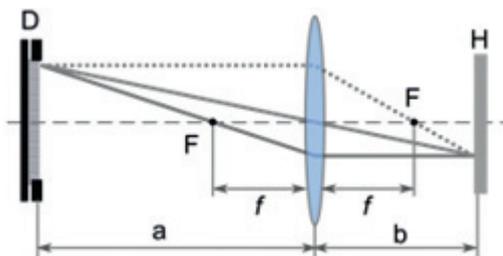


Рис. 4.24. Схема записи КСГФ на ФН, основанная на OLED-микродисплее

графического носителя *H*. В отличие от предыдущих случаев уменьшение рассчитывается исходя из формулы

$$M = \frac{a}{b}; \frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}. \quad (40.38)$$

#### 4.3.2.4. Экспериментальное макетирование устройства записи КСГФ на основе ЖК ПМС, ЖККП ПМС и OLED-дисплея в проекционной оптической системе

Для проведения экспериментального макетирования устройства проекционной записи КСГФ для системы оптической памяти были выбраны три типа микродисплеев: ЖК ПМС, ЖККП ПМС и OLED. Для каждого из устройств собирался свой макет в соответствии со схемами, изображенными на рис. 4.22, 4.23 и 4.24. В табл. 4.1 перечислены модели использованных в эксперименте микродисплеев.

Таблица 4.1. Типы исследованных микродисплеев и их характеристики

Модель	Тип	Разрешение	Размер элемента, мкм	Фактор заполнения	Контраст
Sony LCX-017	ЖК	768 × 1024	32	58%	1000:1
Pluto VIS	ЖККП	1080 × 1920	8	87%	1000:1
OLiGhTEK SVGA060	OLED	576 × 720	15	>90%	>10000:1

В экспериментальных макетах, основанных на ПМС типов ЖК и ЖККП, в качестве источника света был использован монохромный светодиод, излучающий на длине волны 532 нм. Использованный OLED-дисплей был также монохромным с максимумом длины излучения в районе 528 нм. Поскольку выбранные устройства имеют разную величину линейного размера элементарной ячейки, при конструировании макетов было выбрано различное уменьшение оптической проекционной схемы. В случае макета устройства проекционной записи на ЖК ПМС (рис. 4.20)  $F_1 = 1000$  мм,  $F_2 = 100$  мм, соответственно  $M = 10$ ; в случае макета на основе ЖККП ПМС (рис. 4.21)  $F_1 = 120$  мм,  $F_2 = 50$  мм,  $M = 2,4$ ; в случае схемы на основе OLED-дисплея (рис. 4.23)  $f = 120$  мм,  $a = 720$  мм,  $b = 144$  мм. Микроголограммы проецировались на голографические пластины типа ВРП производства АО «Компания «Славич» с разрешением 1730 линий/мм. Максимум спектральной чувствительности фоточувствительного слоя —  $525 \pm 5$  нм. Время экспозиции устанавливалось исходя из измерения светимости источника в плоскости голограммы и составило в случае модуляторов на основе ЖК и светодиода 3 секунды, а в случае OLED — 70 секунд.

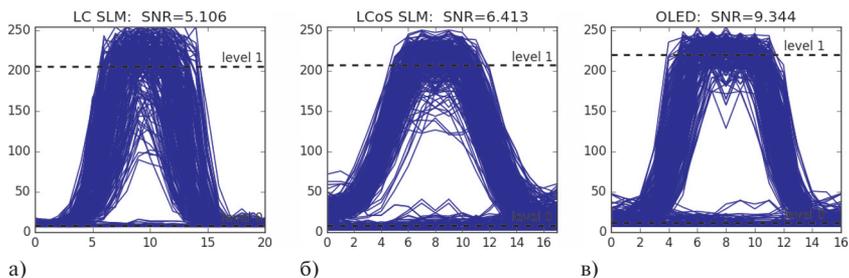
Страницы данных представляли собой случайные последовательности бинарных символов, расположенных вдоль строк. Для восстановления изображений страниц данных, закодированных на голограммах, использовался макет схемы когерентного фурье-каскада (рис. 4.5). На рис. 4.25 представлены примеры изображений, восстановленных страниц данных голограммами для всех исследуемых случаев.

Для анализа изображений страниц данных, восстановленных голограммами, может быть использован метод глазковых диаграмм (рис. 4.26), при котором декодирование бинарных символов производится в доверительном интервале, составляющем, как правило, 40% длины одного бита, а величина значения отношения сигнал/шум (SNR) рассчитывается по формуле (2.21).

В результате экспериментов установлено, что самое высокое качество декодированных бинарных последовательностей наблюдалось у страниц данных, восстановленных голограммами, записанными с помощью OLED-микродисплея. Величина отношения сигнал/шум в этом случае достигала значения порядка 9,0—9,5, однако большое время экспозиции является существенным недо-



**Рис. 4.25.** Страницы данных, восстановленные голограммами, записанными в исследуемых проекционных схемах на основе: а) ЖККП ПМС Sony LCX-01; б) ЖК ПМС Но-loeye Pluto; в) OLED OLiGHTEK SXGA060



**Рис. 4.26.** Результаты анализа глазковых диаграмм, полученных при обработке восстановленных изображений страниц данных голограммами, записанными на макетах проекционных схем записи на основе: а) ЖК ПМС; б) ЖККП ПМС; в) OLED

статком проекционной схемы на основе этого микродисплея. В случае схемы на основе ЖК ПМС величина отношения сигнал/шум составила порядка 5,1, а в случае ЖККП ПМС — 6,5. Таким образом, показано, что фактор заполнения экрана оказывает определенное влияние на качество записанных голограмм. Наибо-

лее перспективной для реализации в системе голографической памяти является схема на основе ЖККП ПМС, а также на основе высокоярких OLED-дисплеев.

## Литература

1. Brown B. and Lohmann A. Computer-generated binary holograms // IBM J. Res. Devel. (IBM), 1969. — Vol. 13. — P. 160—168.
2. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику / Дж Гудмен. — М.: Мир, 1970.
3. Standard ECMA-377: Information Interchange on Holographic Versatile Disc (HVD) Recordable Cartridges — Capacity: 200 Gbytes per Cartridge, 1st ed., Ecma International. — 2007.
4. Dallas W.-J. Computer-Generated Holograms / W.-J. Dallas // Springer-Verlag, 1980.
5. Yaroslavsky L. Introduction to Digital Holography. — Bentham Science Publishers. L., 2009.
6. David Abookasis and Joseph Rosen. Fourier, Fresnel and Image CGHs of three-dimensional objects observed from many different projections // Proceedings of SPIE, 2004. — Vol. 5531.
7. Одинокоев С. Б. Метод компьютерного синтеза и проекционной перезаписи микроголограмм в голографических системах памяти / С. Б. Одинокоев, А. Ю. Бетин, В. И. Бобринев, Н. Н. Евтихийев, А. Ю. Жердев, Е. Ю. Злоказов, Д. С. Лушников, В. В. Маркин, Р. С. Стариков, С. Н. Стариков // Квантовая электроника. — 2013. — № 43(1). — С. 87—89.
8. Betin A. Yu. Holographic memory optical system based on computer-generated Fourier holograms/ A. Yu. Betin, V. I. Bobrinev, S. B. Odinkov, N. N. Evtikhiev, R. S. Starikov, S. N. Starikov, E. Yu. Zlokazov // APPLIED OPTICS. — 20 November 2013. — Vol. 52. — № 33.
9. Evtikhiev N. N. Specificities of data page representation in projection type optical holographic memory system / Evtikhiev N. N., Zlokazov E. Yu., Starikov R. S., Starikov S. N., Bobrinev V. I. and Odinkov S. B. // Opt. Mem. Neural Networks: Inform. Opt. — 2015. — Vol. 24. — № 4.
10. Bondareva A. P. Measurement of characteristics and phase modulation accuracy increase of LC SLM / A. P. Bondareva, P. A. Cheremkhin, N. N. Evtikhiev, V. V. Krasnov, R. S. Starikov and S. N. Starikov // «Ho-лоEye PLUTO VIS» // J. Phys.: Conf. Ser. 536 012011, 2014.
11. Burckhardt C. B. Use of a Random Phase Mask for the Recording of Fourier Transform Holograms of Data Masks / C. B. Burckhardt // Applied Optics, 1970. — Vol. 9. — № 3.

12. Odinson S. B. Application of Optoelectronic Micro-Displays for Holographic Binary Data Recorder Based on Computer Generated Fourier Holograms / S. B. Odinson, E. Yu. Zlokazov, A. Yu. Betin, S. S. Donchenko, R. S. Starikov, and N. M. Verenikina // *Optical Memory and Neural Networks*, 2016. — Vol. 25. — № 4. — P. 255—261.
13. Кольер Р. Оптическая голография / Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. — М.: Мир, 1973. — 698 С.

## **ГЛАВА 5**

# **ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЗАПИСИ И СЧИТЫВАНИЯ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ С МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАННЫХ ОДНОМЕРНЫХ КОМПЬЮТЕРНО- СИНТЕЗИРОВАННЫХ МИКРОГОЛОГРАММ ФУРЬЕ**

### **5.1. Метод мультиплексирования при получении одномерных микроголограмм Фурье и оптический эквивалент системы записи**

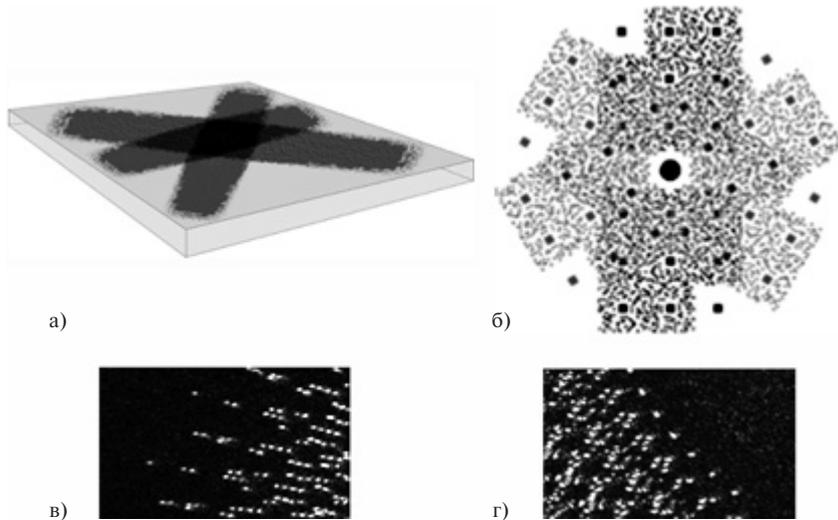
Для увеличения плотности записи информации на голографические носители в ряде статей предлагается использовать мультиплексный метод записи [1]. Мультиплексная голограмма представляет собой результат наложения на один и тот же участок голографического носителя нескольких голограмм (будем называть их субголограммами). Для того чтобы записанные таким образом субголограммы могли быть считаны отдельно, при записи каждой новой субголограммы необходимо вносить изменения в схему записи, например изменять угол между опорным и предметным лучами [2] или изменять положение плоскости, в которой находятся опорный и предметный лучи по отношению к голографическому носителю [3], а также использовать кодирование комплексной амплитуды опорного пучка [4]. Использование этих методов значительно усложняет оптическую схему устройства записи, требует применения дополнительных устройств перемещения

элементов оптической схемы, что приводит к увеличению чувствительности устройства записи к внешним воздействиям — вибрациям, изменениям температуры и др. В данной главе рассмотрена возможность мультиплексной записи и восстановления голограмм в системе голографической памяти на основе компьютерно-синтезированных амплитудных голограмм Фурье.

### **5.1.1. Проблемы мультиплексной записи и считывания цифровой информации при получении двумерных микроголограмм Фурье**

При мультиплексировании в одноканальной схеме проекционной записи КСГФ для записи каждой последующей субголограммы голографический носитель поворачивается вокруг оси, совпадающей с осью опорного луча, на некоторый угол. Данный тип мультиплексирования аналогичен известному типу — перистрофик. Структуры записываемых голограмм накладываются друг на друга, как это проиллюстрировано на рис. 5.1, а.

При считывании информации с такой голограммы одновременно восстанавливаются изображения со всех записанных в нее субголограмм, так как при их синтезе в эквивалентной схеме использовался один и тот же опорный луч, падающий нормально к голографическому носителю. Из-за перекрытия изображения страниц данных искажают друг друга и часть закодированной страницы теряется (рис. 5.1, б). Тем не менее экспериментальное моделирование записи двумерных КСГФ с наложением показало, что читаемые элементы страниц данных, восстановленных наложенными голограммами, обладают достаточным качеством для декодирования (рис. 5.1, в, г). При рассмотрении свойств голографического носителя с записанными на нем мультиплексными двумерными КСГФ можно сделать вывод, что плотность записи информации на таком носителе ограничивается необходимостью использования достаточно большого углового разделения записываемых субголограмм для того, чтобы избежать наложения друг на друга восстановленных изображений, записанных на одной мультиплексной голограмме страниц. В связи с этим интересно рассмотреть свойства мультиплексных голограмм с использованием



**Рис. 5.1.** Мультиплексирование двухмерных КСГФ: а) наложение голограмм путем поворота голографического носителя; б) восстановление наложенных двухмерных фурье-голограмм; в) пример экспериментального восстановления 20 наложенных двухмерных голограмм Фурье; г) пример экспериментального восстановления 40 наложенных двухмерных голограмм Фурье

в качестве субголограмм одномерных голограмм. Такой интерес связан с тем, что одномерные голограммы очень чувствительны к угловому повороту считывающего пучка, который формируется, используя анаморфотные оптические элементы.

### 5.1.2. Метод и алгоритм расчета одномерных микроголограмм Фурье

Идея синтеза и применения одномерных фурье-голограмм почерпнута из замечательной работы Ж.Ч. Вьено [5]. Идея заключается в том, что, используя анаморфотные оптические элементы, в частности сферическую и цилиндрическую линзы с одинаковым фокальным расстоянием, можно совместить плоскость частот

фурье-каскада в одной проекции системы с плоскостью изображения в перпендикулярной проекции. Пример эквивалентной оптической схемы одномерного преобразования Фурье представлен на рис. 5.2.

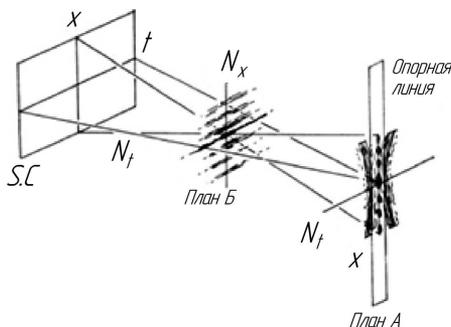


Рис. 5.2. Оптический эквивалент схемы одномерного преобразования Фурье

### 5.1.3. Эквивалентная схема восстановления изображений, закодированных на одномерных КСГФ

Для восстановления изображений, закодированных на мультиплексную одномерную микроголограмму, необходимо использовать одномерный фурье-каскад, аналогичный изображенному на рис. 5.3, содержащий сфероцилиндрический дублет. Сферическая и цилиндрическая линзы с одинаковыми фокусными расстояниями располагаются вплотную друг к другу. В передней фокальной плоскости сферической линзы находится голограмма, в задней фокальной плоскости сферической линзы — плоскость восстановления изображения страницы данных.

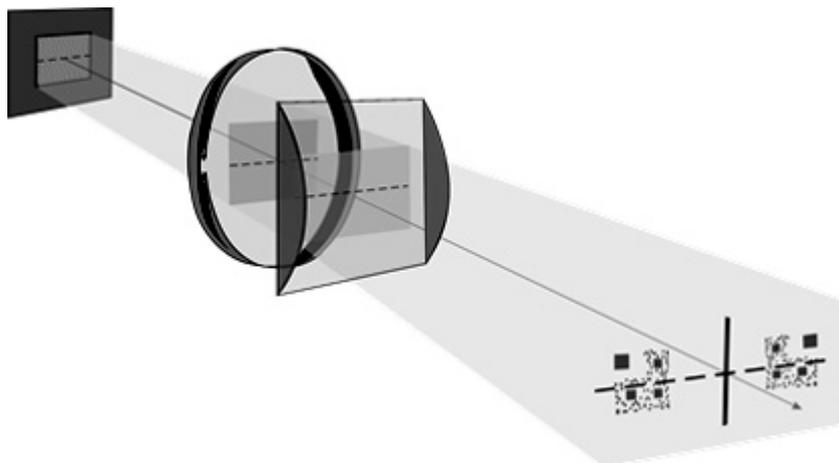


Рис. 5.3. Эквивалентная оптическая схема восстановления мультиплексных одномерных КСГФ

#### 5.1.4. Эквивалентная схема восстановления изображений, закодированных на одномерных КСГФ

Страница цифровых данных, кодированная по стандарту ЕСМА-378, представляет собой цифровые данные в виде последовательности битов «1» и «0» так, чтобы на одной странице данных их количество по столбцам и строкам было примерно одинаково. Кроме того, исключаются случаи возникновения протяженных линий из битов «1», что увеличивает дифракционную эффективность голограммы и уменьшает разброс интенсивности восстановленных информационных изображений с мультиплексированных голограмм.

Однако для синтеза одномерных голограмм Фурье и их построчного считывания стандарт ЕСМА-378 мало подходит, так как один информационный блок представлен 16 пикселями в виде квадрата  $4 \times 4$  пикселя. Декодирование информации невозможно, пока не будут считаны 4 строки, формирующие субстраницу. Кро-

ме того, в стандарте ЕСМА-378 используются протяженные реперные элементы, которые снижают дифракционную эффективность восстановленных строк.

Для того чтобы увеличить скорость считывания, необходимо декодировать информацию при считывании каждой отдельной строки, для этого был предложен бинарно-строковый способ представления информации. Информация кодируется 8-битными числами, в которых 1 пиксель представляется линией шириной в два пикселя модулятора и реперными точками шириной четыре пикселя для раздельного считывания 8-битовых чисел (рис. 5.4).

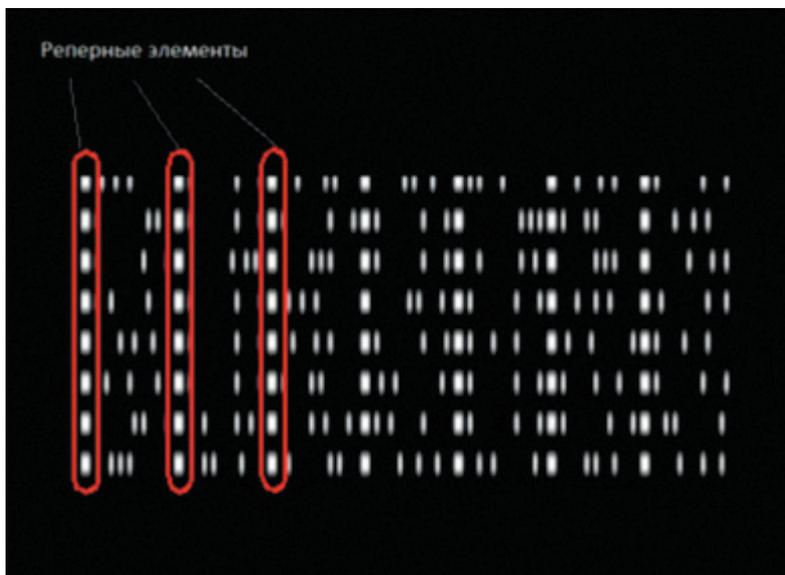


Рис. 5.4. Кодирование информации для синтеза одномерных голограмм Фурье

## 5.2. Принципы построения оптических систем устройств записи мультиплексированных одномерных компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье и считывания с них цифровой информации

Данная глава посвящена технической реализации схем мультиплексной записи одномерных КСГФ и восстановления с них цифровых страниц данных, в основе которых лежит эквивалентная схема, представленная на рис. 5.3.

### 5.2.1. Проекционная оптическая схема записи одномерных 1D-микроголограмм Фурье с мультиплексированием типа «угловой поворот»

Компьютерно-синтезированная в соответствии с описанным оптическим эквивалентом голограмма выводится на апертуру ПМС ЖК-транспаранта, входящего в состав оптической системы, обеспечивающей проекцию голограммы с требуемым уменьшением ее размеров. Это позволяет повысить плотность записи информации на голографическом носителе по сравнению с плотностью на ПМС.

В горизонтальной плоскости расположены сформированные на ПМС линейные голограммы, параллельные между собой. При этом размер восстановленного изображения голографической структуры уменьшается по сравнению с размером исходного объекта в соответствии с формулой

$$l_{im} = l_{ob} \frac{F_2}{F_1}, \quad (5.1)$$

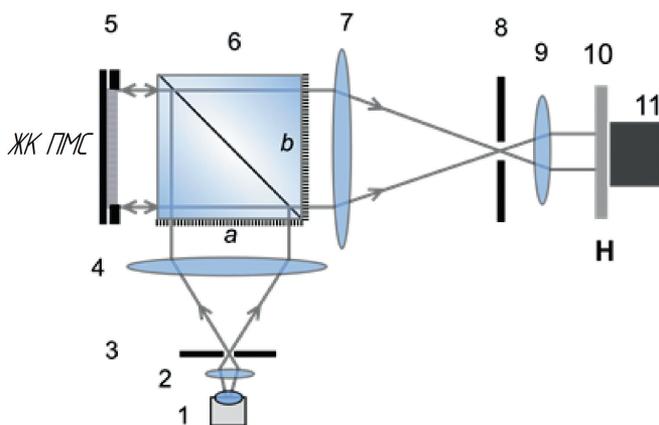
где  $F_1$  — фокусное расстояние сферической линзы в эквивалентной оптической схеме записи, а  $F_2$  — фокусное расстояние ФПО

(сферическая линза) в оптической системе записи голограмм проекционного типа.

Размер спроецированных голограмм соответствует формуле

$$H_{out} = D \frac{F_3}{F_2}, \quad (5.2)$$

где  $F_3$  — фокусное расстояние ФВО телескопической системы (рис. 5.5).



**Рис. 5.5.** Структурно-функциональная схема устройства записи мультиплексированных одномерных голограмм Фурье

Проекционная оптическая система записи компьютерно-синтезированных голограмм на регистрирующую среду является центральной частью устройства записи информации.

Полная схема устройства записи информации на голографический носитель включает в себя:

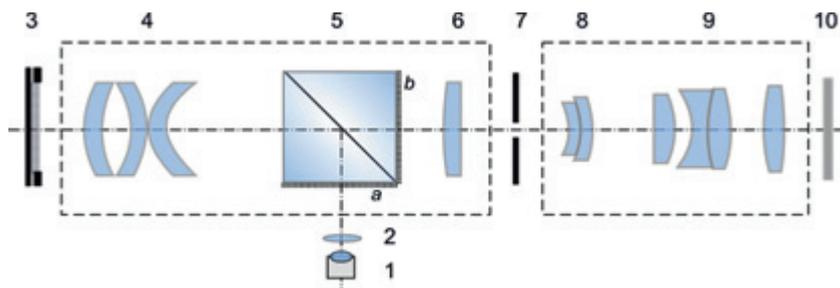
- источник информации, которую необходимо записать на голографический носитель;
- компьютер, синтезирующий голограмму вводимой страницы информации и выводящий ее на апертуру ПМС;
- лазерный источник света и оптические элементы, формирующие световой пучок с необходимыми для освещения апертуры ПМС параметрами;

— механические узлы, обеспечивающие мультиплексную запись нескольких голограмм на один участок голографического носителя, а также перемещение носителя для записи мультиплексных голограмм на другие участки носителя.

Ранее в главе 4 было показано, что проекционная схема устройства записи КСГФ, основанная на ЖККП ПМС, является наиболее перспективной. На рис. 5.5 представлена структурно-функциональная схема устройства записи мультиплексированных одномерных голограмм Фурье. Схема состоит из излучателя 1, в качестве которого может выступить монохромный светодиод (СД), коллимирующей системы, состоящей из объективов 2, 4 и диафрагмы 3, ЖККП ПМС 5, светоделительного кубика 6, проекционной схемы, состоящей из ФПО 7, диафрагмы 8 и ФВО 9, фоточувствительной пластины 10, расположенной на блоке подвижек 11, предназначенном для линейного перемещения пластины в плоскости, перпендикулярной оптической оси, и вращения вокруг оптической оси.

Для технической реализации устройства проекционной записи [6] одномерных КСГФ был выбран ЖККП ПМС Holoeye Pluto с разрешением  $1920 \times 1080$  элементов, размером экрана  $15,36 \times 8,64$  мм и размером элемента 8 мкм. В качестве источника излучения использовался СД с центральной длиной волны излучения 521 нм и шириной спектра 20 нм.

При разработке оптической системы устройства проекционной записи на специализированных элементах была проведена оптимизация по следующим критериям: система должна быть компактной, иметь разрешение не менее 300 лин/мм, в качестве источника использовать светодиод с шириной спектра 40 нм. Для максимально возможной пространственной частоты интерференционной картины  $62 \text{ мм}^{-1}$ , выведенной на экран выбранной модели ЖККП ПМС и СД с длиной волны  $521 \pm 10$  нм, была рассчитана схема устройства проекционной записи с 5-кратным уменьшением (см. рис. 5.6). Излучение источника 1 коллимируется линзой 2 и группой линз 4 для равномерной засветки отражающего экрана ЖККП ПМС. 5 — поляризационный светоделительный кубик. Группа линз 4 представляет собой ФПО. Линзы 6 и 8 используются для компенсации искажений, вызванных хроматической и сферической аберрациями системы. Группа линз 9 формирует систему ФВО-схемы. Параметры



**Рис. 5.6.** Оптическая схема специального объектива: 1 — СД, 2 — коллимирующий объектив, 3 — ЖККП ПМС, 4 — система линз ФПО, 5 — поляризационный светоделительный кубик, 6 — корректирующая линза, 7 — диафрагма, 8 — корректирующая линза, 9 — система линз ФВО, 10 — фоточувствительная пластина

ФПО-схемы:  $f' = 100,195$  мм,  $S_F = -32,24$  мм,  $S_{F'} = 52,2$  мм; параметры ФВО-схемы:  $f' = 20,65$  мм,  $S_F = -3,34$  мм,  $S_{F'} = 28,87$  мм. Мультиплексирование голограмм производится путем поворота голографической пластины вокруг оптической оси системы.

Оценка качества разработанной оптической системы была проведена по функции распределения энергии (ФРЭ) и модулю передаточной функции (МПФ). Моделирование представленной схемы в системе Zemax показало, что для максимальной частоты изображения  $312,5$  мм<sup>-1</sup> величина МПФ составила порядка 0,31, что удовлетворяет критерию оценки качества по МПФ, согласно которому контраст должен быть не менее 0,3 на максимальной частоте (рис. 5.7).

Для проверки характеристик спроектированного объектива был проведен эксперимент по проекционной оптической записи решеток с пространственными частотами 312,5, 164,25 и 82,125 мм<sup>-1</sup> и измерению их контраста. В качестве фоточувствительного носителя использовались голографические пластины типа ПФГ, а также набор SM6 для проявления. Для максимальной частоты 312,5 мм<sup>-1</sup> измеренный контраст составил 0,3, что соответствует результатам теоретического моделирования схемы. На рис. 5.8, а представлена фотография записанной решетки с пространственной частотой линий 312,5 мм<sup>-1</sup>.

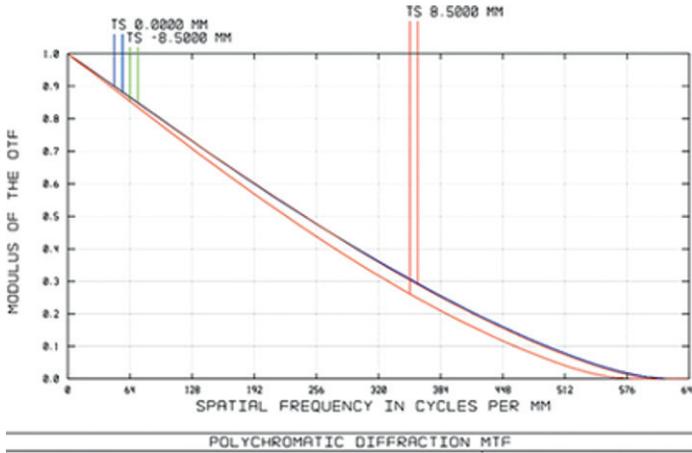


Рис. 5.7. График МПФ специально разработанной схемы записывающего устройства

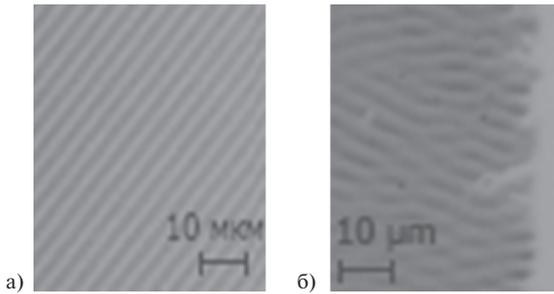


Рис. 5.8. Фотографии записанных структур: а) решетка с пространственной частотой  $312,5 \text{ мм}^{-1}$ ; б) КСГФ

Также была произведена запись синтезированных структур КСГФ на фоточувствительный носитель (рис. 5.9) на разработанном макете опико-электронного прибора (ОЭП).

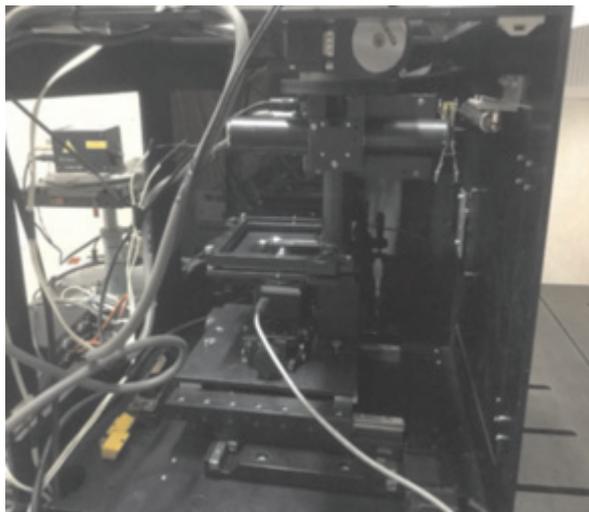


Рис. 5.9. Внешний вид макета ОЭП для записи микроголограмм Фурье

### 5.2.2. Исследование режимов экспонирования и химической обработки фотопластин ВРП для определения их линейного участка и динамического диапазона

Количество света, подействовавшее на фоточувствительный материал, принято оценивать экспозицией [7]

$$H = E \cdot t, \quad (5.3)$$

где  $H$  — экспозиция,  $E$  — освещенность,  $t$  — время экспозиции.

Чем больше экспозиция на участке фотоматериала, тем меньше коэффициент пропускания материала в этом участке. При проекционной записи на фоточувствительный материал записывается распределение коэффициента пропускания амплитудной голограммы, следовательно, на фотоматериале градации будут передаваться модуляцией коэффициента пропускания. Подбор экс-

позиции для фотоматериала должен проводиться совместно с подбором проявителя, поскольку он также непосредственно влияет на величину коэффициента пропускания.

К проявителю и процессу проявления предъявляются следующие требования:

- большой динамический диапазон показателя пропускания,
- линейный отклик показателя пропускания,
- малозумящая характеристика показателя пропускания,
- время проявления образца не должно составлять больше 6 минут.

Для выбора более подходящего проявителя с помощью макета ОЭП получения микроголограмм Фурье (МГФ) были записаны образцы, содержащие набор изображений; пример изображения приведен на рис. 5.10.

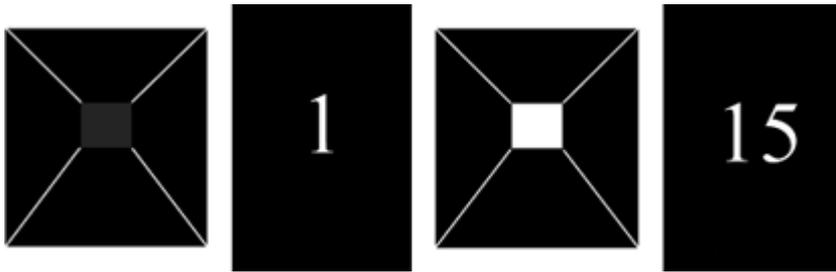


Рис. 5.10. Исходное записываемое изображение

Это изображение состоит из 15 отдельных полей, каждое из которых соответствует эквидистантному значению яркости (градации серого) в промежутке от 17 до 255 с разницей 17.

В экспериментах использовались фотопластинки ВРП с разрешением не менее 1700 лин/мм (контраст записываемого синусоидального распределения показателя пропускания амплитудной голограммы с периодом 588 нм — не менее 0,3).

Фотографии записанных образцов с расчетным дискретным распределением коэффициента пропускания приведены на рис. 5.11.

У полученных образцов измерялось пропускание, результаты приведены на рис. 5.12.

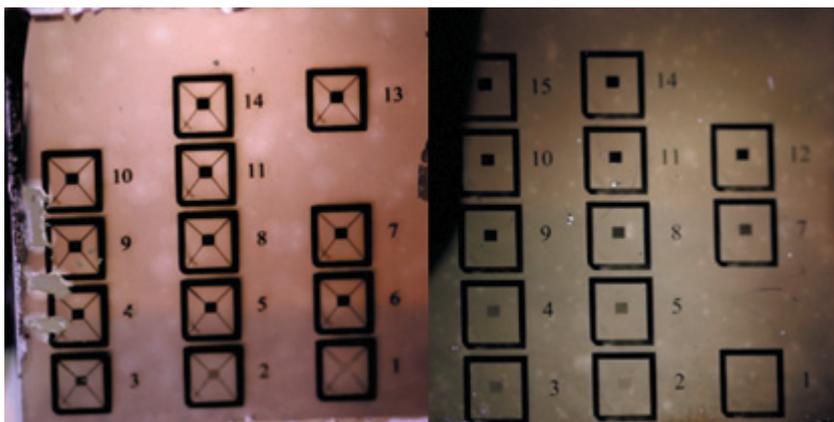


Рис. 5.11. Фото образцов для исследования химических процессов

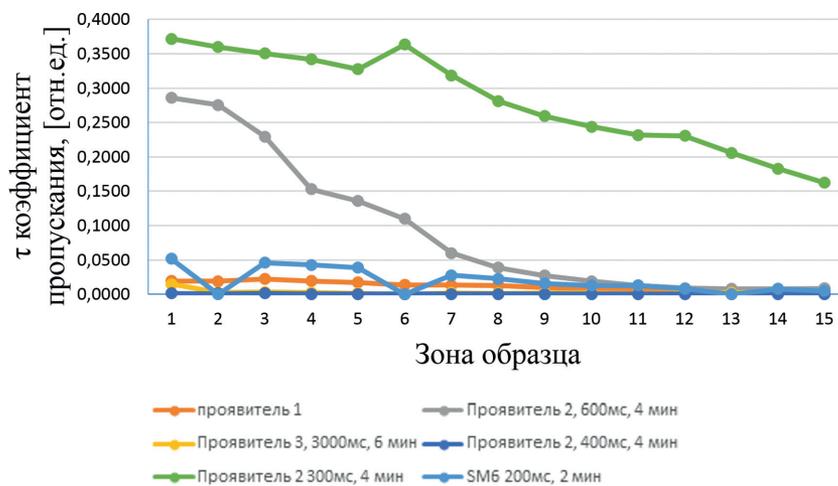


Рис. 5.12. Характеристики пропускания фотоматериала ВРП для разных проявителей

В соответствии с графиком, представленным на рис. 5.12, а также требованиями, приведенными выше, в качестве наиболее подходящего проявителя был выбран проявитель SM6 при времени экспозиции образца ~100 мс.

После проявления фотопластинки необходимо отбелить, чтобы получить фазовую МГФ и увеличить дифракционную эффективность. Самый большой вклад в искажение записываемых спектральных отсчетов вносит процесс отбеливания, который переводит распределение показателя пропускания одномерной МГФ в фазовое, где величина экспозиции пропорциональна изменению показателя преломления среды.

Искажения, возникающие при нелинейной записи одномерных фурье-голограмм на материал, аналогичны искажениям при выводе голографической структуры ЖК ПМС с нелинейной характеристикой. Однако в отличие от ПМС устранить или учесть эти искажения сложнее.

### **5.2.3. Варианты построения системы считывания мультиплексных одномерных микроголограмм Фурье**

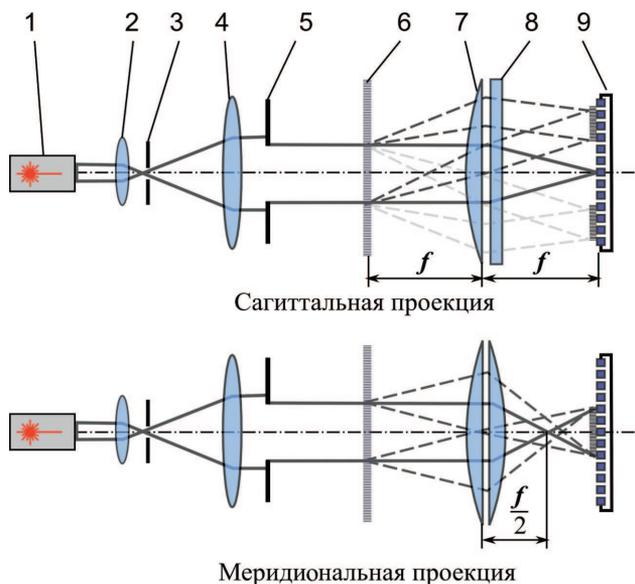
Мультиплексированные одномерные микроголограммы Фурье могут быть восстановлены в когерентной схеме считывания, формирующей в одном сечении спектр микроголограммы Фурье, а в другом — изображение строки по аналогии со схемой на рис. 5.2.

В частности, ее полным аналогом является схема устройства постраничного считывания одномерных КСГФ. Добавив в эту схему дополнительные анаморфотные элементы и электрооптический дефлектор, можно сконструировать схему постраничного считывания голограмм [8—10].

#### **5.2.3.1. Оптическая система с постраничным считыванием мультиплексных одномерных микроголограмм Фурье**

На рис. 5.13 представлена принципиальная схема устройства постраничного считывания мультиплексированных одномерных микроголограмм Фурье. Поскольку схема включает в себя как сферические, так и цилиндрические линзы, то ход лучей приведен в сагиттальной и меридиональной проекциях.

В качестве источника света используется лазер 1. Излучение от источника коллимуруется и фильтруется с помощью системы



**Рис. 5.13.** Принципиальная схема устройства постраничного считывания мультиплексированных одномерных микрограмм Фурье: 1 — лазер, 2 — микрообъектив, 3 — диафрагма, 4 — объектив, 5 — диафрагма, 6 — одномерная голограмма, 7 — ФПО с фокусом  $f$ , 8 — цилиндрическая линза с фокусом  $f$ , 9 — КМОП-матрица

линз 2, 4 и диафрагм 3, 5 для формирования плоского пучка с равномерным распределением интенсивности, освещающим голограмму по нормали. Линза 7 играет роль ФПО-схемы. Голограмма 6 находится в передней фокальной плоскости ФПО. Цилиндрическая линза 8, расположенная сразу за ФПО, не оказывает влияния на ход лучей в сагиттальной проекции, в то время как в меридиональной уменьшает общий фокус дублета в 2 раза. Таким образом, плоскость пространственных частот в сагиттальном сечении совпала с плоскостью изображения в меридиональной, обеспечив условия восстановления одномерных КСГФ. В задней фокальной плоскости ФПО расположена матрица КМОП-камеры 9 для регистрации изображений восстановленных

страниц данных. Считывание мультиплексных голограмм производится за счет поворота цилиндрической линзы вокруг оптической оси системы до совпадения направления оси цилиндра с направлением строк одной из субголограмм.

Экспериментальное макетирование схемы и анализ декодированных данных показали, что величина отношения сигнал/шум находилась в пределах 4,2–6,4 для одиночных голограмм и порядка 3,8 для мультиплексированных (до девяти штук). Пример восстановленного изображения страницы данных с постобработкой представлен на рис. 5.14.



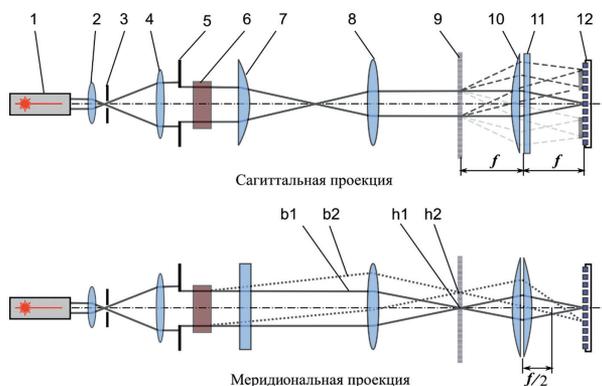
Рис. 5.14. Пример изображения страницы данных восстановленной одномерной КСГФ, записанной с помощью разработанного макета устройства проекционной записи голограмм

### 5.2.3.2. Оптическая система с построчным считыванием мультиплексированных одномерных микроголограмм Фурье

Полезным свойством одномерных голограмм является возможность отдельного восстановления строк записанной страницы информации. Для этого на голограмму направляется считывающий пучок света, сформированный из пучка с плоским волновым фронтом с помощью цилиндрической линзы. При этом на голограмму падает пучок света, имеющий форму тонкой линии с постоянной фазой световой волны вдоль этой линии.

При такой организации системы освещения голограммы можно восстановить изображение только с той строки одномерной голограммы, которая освещается считывающей волной в виде полосы. Поскольку другие строки этой страницы не освещены, то их изображения не восстанавливаются. Если направление записанной строки не совпадает с направлением считывающей световой линии, то интенсивность восстановленного с нее изображения существенно снижается, что положительно сказывается на отношении сигнал/шум. Например, если строка голограммы длиной 1 мм состоит из 1000 пикселей, то при повороте считывающего луча на 2 градуса на голограмме будет освещено приблизительно 30 пикселей. Это приведет к ухудшению разрешающей способности примерно в 30 раз, и во столько же раз уменьшится яркость восстановленного изображения, а также понизится контраст его элементов. Селективность при считывании позволяет увеличить количество субголограмм, записываемых в одну мультиплексную голограмму, и плотность записи информации на носителе.

Принципиальная схема устройства построчного считывания одномерных КСГФ представлена на рис. 5.15. Данная схема отли-



**Рис. 5.15.** Принципиальная схема устройства построчного считывания одномерных КСГФ: 1 — лазер, 2 — микрообъектив, 3 — диафрагма, 4 — объектив, 5 — диафрагма, 6 — акустооптический дефлектор, 7 — цилиндрическая линза, 8 — сферическая линза, 9 — одномерная голограмма, 10 — ФПО с фокусом  $f$ , 11 — цилиндрическая линза с фокусом  $f$ , 12 — КМОП-матрица

чается от схемы постраничного считывания тем, что в ней используются дополнительные цилиндрическая 7 и сферическая 8 линзы, формирующие считывающий когерентный луч, а также акустооптический дефлектор 6, позволяющий сканировать строки голограммы считывающим лучом. Ориентация дополнительной цилиндрической линзы 7, используемой в системе формирования считывающего луча, должна быть перпендикулярна ориентации цилиндрической линзы 11, используемой в системе восстановления. Считывание строк мультиплексированных голограмм производится за счет поворота голограммы вокруг оптической оси.

Экспериментальное макетирование схемы и восстановление записанных мультиплексных голограмм, тех же, что были использованы при исследовании схемы постраничного считывания, показало, что величина отношения сигнал/шум в схеме постраничного считывания оказалась порядка 6,4—6,8, что выше, чем в случае постраничного считывания. На рис. 5.16 представлен пример восстановленной строки страницы данных, состоящей из случайного бинарного кода и реперных элементов.

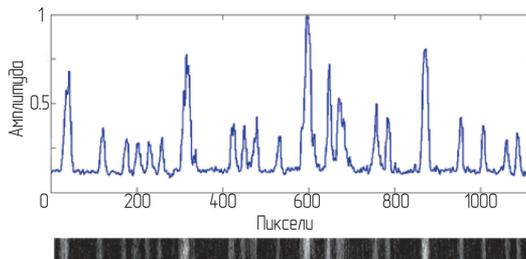


Рис. 5.16. Результат восстановления строки данных на макете построчного считывания

В качестве недостатка схемы построчного считывания стоит отметить, во-первых, необходимость использования нескольких цилиндрических линз, что влечет за собой возрастание требований к юстировке схемы. Во-вторых, в случаях когда ширина строки одномерной КСГФ при уменьшении в проекционной схеме составляет порядка нескольких микрометров, значительно возрастают требования к качеству изготовления компонентов для формирования считывающего пучка.

#### **5.2.4. Синтез оптической системы с постраничным считыванием мультиплексированных одномерных микроголограмм Фурье**

Исходными данными для расчета параметров специализированного объектива системы считывания являются: размер микроголограммы на регистрирующей среде  $3,1 \times 1,7$  мм<sup>2</sup>, размер одного элемента структуры голограммы  $3,2 \times 3,2$  мкм<sup>2</sup>, КМОП-камера 13R-5100LC-U с матрицей размером  $5,7 \times 4,3$  мм и размером пикселя  $2,2 \times 2,2$  мкм, а также длина волны источника излучения лазерного диода 0,65 мкм. Для максимального числа информационных точек в строке  $N_{\max} = 480$  и количества пикселей фотоприемной матрицы  $k_p = 5$ , приходящихся на одну информационную точку, фурье-восстанавливающий объектив должен иметь в сагиттальном сечении фокусное расстояние, равное 13 мм, а в меридиональном сечении — 6,5 мм.

На рис. 5.17 представлена оптическая схема устройства считывания мультиплексированных одномерных микроголограмм Фурье в сагиттальном и меридиональном сечениях.

Схема позволяет считывать изображения страниц данных, закодированных на голограммы в отраженном свете. Схема состоит из цилиндрической линзы 4, ФВО 6, составленного из 5 сферических линз, и разделительного кубика 5 размером  $20 \times 20$  мм для ввода освещающего пучка.

Расчеты МПФ системы, параметры которой представлены на рис. 5.18, показали, что разрешающая способность для осевого пучка составляет 290 лин/мм, что соответствует разрешающей способности выбранного приемника излучения КМОП-камеры 13R-5100LC-U.

Внешний вид макета ОЭП для восстановления цифровой страницы данных с матриц МГФ приведен на рис. 5.19.

При проведении экспериментальных исследований свойств разработанной системы считывания одномерных микроголограмм использовались голограммы, записанные в устройстве записи. Восстановленные изображения страниц данных, полученные с помощью КМОП-камеры, передавались для предобработки и декодирования в память персонального компьютера.

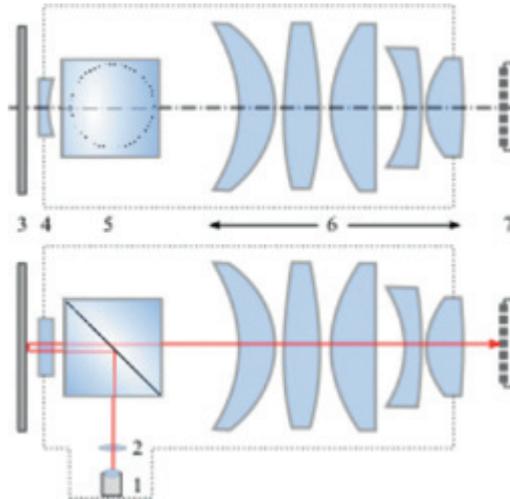
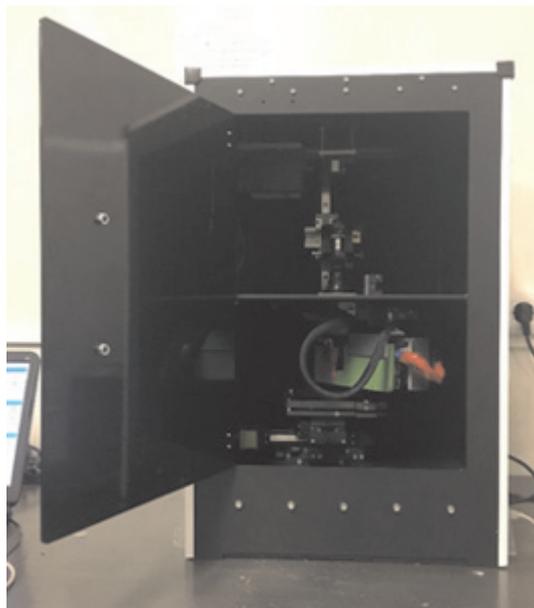


Рис. 5.17. Оптическая схема устройства считывания мультиплексированных одномерных микроголограмм Фурье: 1 — лазер, 2 — коллиматорная линза, 3 — голографический диск, 4 — цилиндрическая линза, 5 — светоделительный кубик, 6 — набор линз ФВО, 7 — матрица КМОП-камеры

Surf>Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard	Infinity	1.000		1.768
1*	Standard	Infinity	1.000	LE_TP3 S	2.400 U
2*	Toroidal	10.000	0.500		2.400 U
3*	Standard	Infinity	8.000	1.72,29.6	4.000 U
4*	Standard	Infinity	6.400		4.000 U
5*	Standard	-10.428 V	1.000	LE_TP3 S	6.200 U
6*	Standard	-9.893 V	0.800		7.000 U
7*	Standard	74.410 V	3.100	LE_F1 S	7.000 U
8*	Standard	-23.345 V	0.600		7.000 U
9*	Standard	11.074 V	3.400	LE_CTK19 S	7.000 U
10*	Standard	83.193 V	2.700		7.000 U
11*	Standard	-8.247 V	1.300	LE_K8 S	5.000 U
12*	Standard	-32.267 V	0.400		5.000 U
13*	Standard	5.796 V	3.000	LE_CTK19 S	4.000 U
14*	Standard	-140.125 V	3.500		4.000 U
IMA	Standard	Infinity	-		1.045

Рис. 5.18. Параметры линз оптической схемы устройства считывания мультиплексированных одномерных микроголограмм Фурье (без канала ввода излучения)



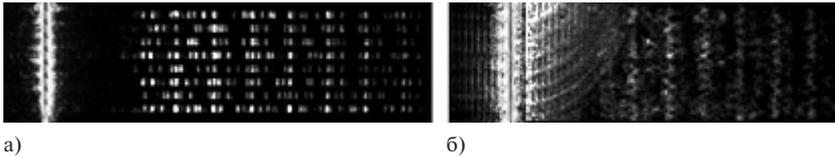
**Рис. 5.19.** Внешний вид макета ОЭП для восстановления цифровой страницы данных с матриц МГФ

#### **5.2.4.1. Наведение оптической системы на мультиплексированные одномерные голограммы при считывании**

При изменении ориентации анаморфотного фурье-объектива относительно мультиплексированных МГФ возможны два состояния: образующая объектива сонаправлена с элементарными одномерными МГФ и рассогласована (см. рис. 5.20).

Из анализа изменения структуры восстановленного изображения при вращении оптической системы вокруг оси можно сделать следующие выводы:

- снижается контраст изображения;
- прежде всего нарушается структура страницы данных по столбцам;



**Рис. 5.20.** а) Результат восстановления при наведенной оптической системе с нулевым порядком в кадре, б) результат восстановления при рассогласованной оптической системе с нулевым порядком в кадре

— допуск на несовпадение страницы данных составляет примерно  $0,2^\circ$ , что означает возможность наведения в режиме непрерывного вращения поворотной платформы, следовательно, уменьшается время на наведение оптической системы.

Для поиска кадров, соответствующих наведенному состоянию оптической системы, подходят алгоритмы, которые определяют контраст изображения, ищут по восстановленному изображению элементарные участки (корреляция).

Контраст изображения — это отношение яркостей различных участков (пикселей) изображения; контраст является безразмерной величиной.

Контраст изображения определяется следующим образом:

$$K = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} (B_{ij} - \bar{B})^2}, \quad (5.4)$$

где  $K$  — контраст средний квадратический,  $M, N$  — размеры изображения,  $B_{ij}$  — координаты текущего пикселя,  $\bar{B}$  — средняя яркость изображения.

Алгоритм работает следующим образом: для каждого снимка составляется ряд, членами которого являются максимальные контрасты соседних столбцов, рассчитанные по (5.4). Затем находится среднее арифметическое ряда, которое и является критерием для выбора снимка из серии. Полученный ряд критериев нормируется, по граничному значению критерия выбираются максимумы, которые и являются номерами кадров наведенной оптической системы (ОС).

Исследование показало, что для поиска кадров наведенной ОС также может быть использован анализ яркости изображения. В алгоритме вместо расчета максимальных контрастов соседних столбцов можно искать в каждом столбце максимально яркий пиксель. Этот метод неэффективен, когда в кадре присутствует нулевой порядок, но для серий без нулевого порядка он также позволяет с помощью алгоритма находить кадры наведенной ОС.

Результат работы алгоритма наведения на мультиплексированные одномерные голограммы приведен на рис. 5.21. Наведенному состоянию системы соответствуют глобальные максимумы на графике.

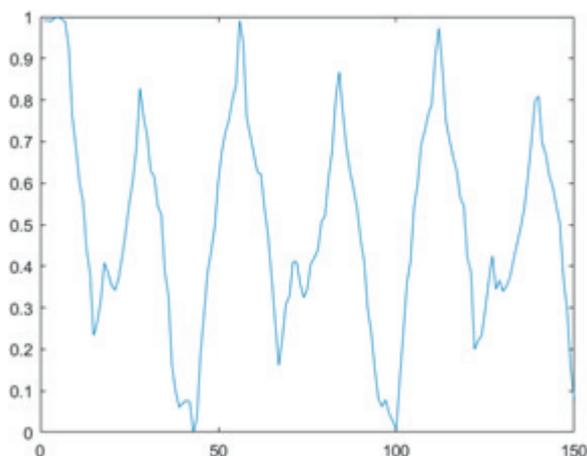


Рис. 5.21. Зависимость контраста от номера кадров

### 5.3. Декодирование цифровой информации с восстановленных изображений страниц данных

Предварительная обработка изображения включает в себя выравнивание яркости изображения по полю и выравнивание положения страницы данных по горизонтали на изображении (см. рис. 5.22).

Для выравнивания яркости используется алгоритм на основе Single Scale Retinex (SSR) [11]. Любое изображение неравномерно



Рис. 5.22. Блок-схема, демонстрирующая принцип работы алгоритма

освещенного объекта можно представить как произведение распределения интенсивности самого объекта и распределение интенсивности освещенности кадра. Используя этот подход, можно выровнять освещенность объекта по полю  $I(i, j)$ . В алгоритме SSR для получения распределения освещенности изображения кадра применяется фильтр Гаусса  $G(i, j)$ :

$$\tilde{I}(i, j) = G(i, j) * I(i, j). \quad (5.5)$$

Исправленное распределение  $R(i, j)$  интенсивности объекта рассчитывается по формуле

$$R(i, j) = \log I(i, j) - \log \tilde{I}(i, j). \quad (5.6)$$

Отличие используемого алгоритма от алгоритма SSR заключается в том, что для получения распределения освещенности вместо фильтра Гаусса используется усредняющий фильтр. Экспериментальные исследования показали, что его применение дает лучший результат при предобработке изображения. После обработки изображения алгоритмом выравнивания яркости производится его нормировка.

Алгоритм выравнивания яркости нелинейно снижает зашумленность изображения в случае попадания в кадр нулевого порядка дифракции при восстановлении голограммы, а также компенсирует спад интенсивности информационных точек, наиболее удаленных от нулевого порядка дифракции.

Пример работы алгоритма выравнивания яркости с фильтрацией шумов приведен на рис. 5.23.

Наиболее распространенным методом поиска на изображении известных распределений интенсивности является корреляционный метод. Для его реализации анализируется кросс-корреляция между исходным изображением и фрагментом, который необходимо найти на кадре.

Для поиска координат отсчетов необходимы какие-то опорные элементы на кадре. Зная их координаты и общую структуру изображения, можно легко решить эту задачу. В данном случае в качестве опорных элементов выступают столбцы реперных точек.

Структура реперных столбцов известна, так как она задается кодировкой информации в исходном информационном объекте. Следовательно, можно на основе геометрических параметров кадра и



а)



б)

**Рис. 5.23.** Пример использования методов предварительной обработки изображения: а) изображение до предварительной обработки; б) изображение после предварительной обработки

масштаба восстановленного изображения создать реперную маску, дублирующую эту структуру. Рассчитывая кросс-корреляционную функцию между кадром и реперной маской, можно найти координаты реперных точек и на их основе — координаты отсчетов.

Для поиска реперных точек требуется создать маску, которая будет повторять структуру реперного столбца. Для создания такой маски необходимо определить ее параметры, основываясь на исходном изображении (на кодировке). Структурно маска (рис. 5.24) состоит из чередующихся элементов с яркостью, равной 255 и 0 соответственно. Яркий элемент при этом соответствует реперу в реперном столбце.

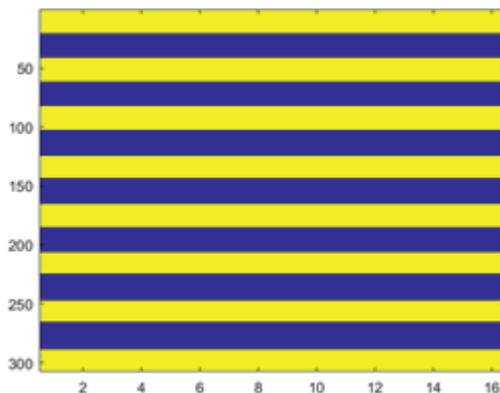


Рис. 5.24. Реперная маска столбца

Для создания маски необходимо знать период следования реперных точек в реперном столбце, а также их длину и ширину. Учитывая, что кодировка страницы данных известна, можно определить масштаб страницы данных на изображении по сравнению с исходной, что требуется для вычисления габаритов реперной точки.

Получить параметры маски из изображения можно с помощью анализа автокорреляционной функции (АКФ) сечений кадра. Автокорреляционная функция показывает зависимость между сигналом и его сдвинутой копией в зависимости от величины сдвига. Она помогает находить повторяющиеся участки в сигнале, анализировать его периодическую структуру.

Для автокорреляционного анализа находится сумма отсчетов кадра по горизонтали и по вертикали (рис. 5.25) и рассчитывается ее автокорреляционная функция (рис. 5.26).

Для нахождения координат столбцов с реперными точками в зарегистрированном изображении восстановленной страницы данных используется метод кросс-корреляции. Кросс-корреляционная функция (КК-функция) для двухмерного случая — это матрица кросс-корреляционных коэффициентов, каждый из которых находится следующим образом:

$$c(i, j) = \iint f(x, y) \cdot h(i + x, j + y) dx dy, \quad (5.7)$$

где  $f(x, y)$  — отсчеты кадра,  $h(x, y)$  — отсчеты маски.

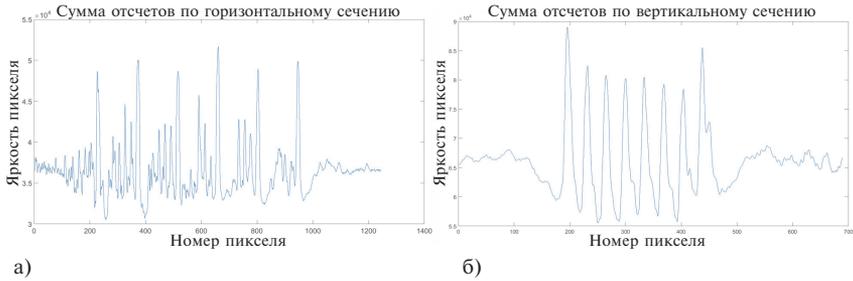


Рис. 5.25. Зависимость яркости пикселя от его номера: а) сумма отсчетов по горизонтальному сечению изображения, б) сумма отсчетов по вертикальному сечению изображения

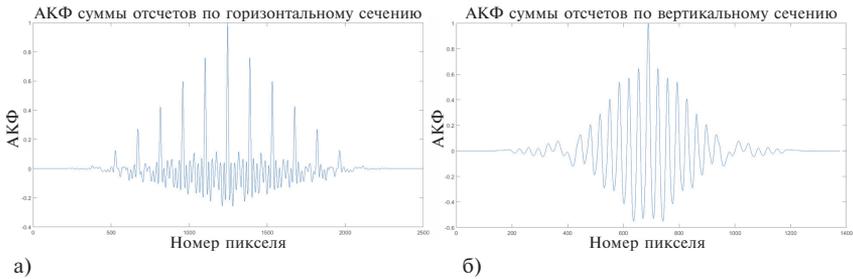


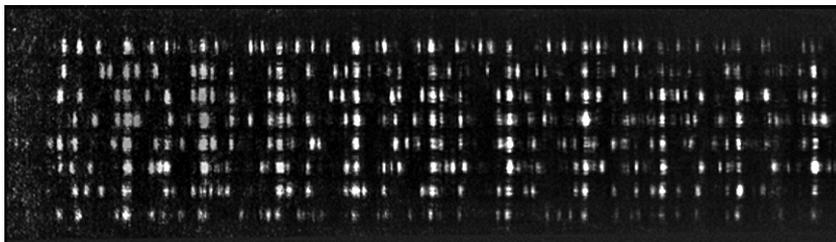
Рис. 5.26. Зависимость АКФ от номера пикселя: а) АКФ суммы отсчетов по горизонтальному сечению изображения, б) АКФ суммы отсчетов по вертикальному сечению изображения

В дискретном виде автокорреляционную функцию можно записать как

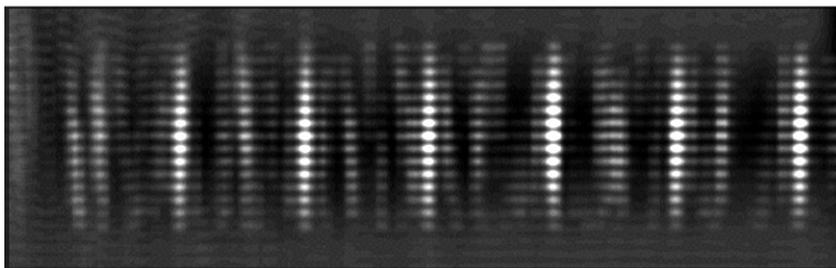
$$c(k, l) = \sum_{m=0}^{M-1-N-k} \sum_{n=0}^{N-1-l} X(m, n)H(m - k, n - l). \quad (5.8)$$

Максимумы матрицы кросс-корреляционных коэффициентов позволяют вычислить местоположение координатных столбцов с реперными точками. Для получения точных координат реперов используются данные, полученные на этапе подготовки реперной маски, то есть период между реперными столбцами и габариты реперных точек.

Зная структуру страницы данных, масштабный коэффициент и координаты центров реперных точек, можно выделить символы (on- и off-pixel) и найти их центр яркости, установив координаты центров отсчетов (on- и off-pixels). Фрагмент страницы данных и кросс-корреляционная функция представлены на рис. 5.27.



а)



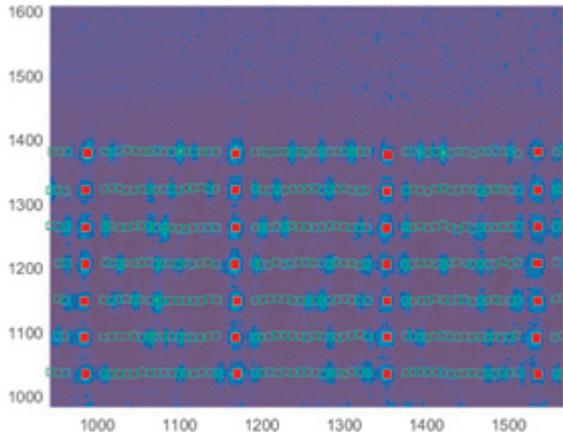
б)

**Рис. 5.27.** а) Исходный кадр после предобработки; б) КК-функция

На рис. 5.28 показаны найденные реперные элементы и символы на кадре.

На финальном этапе декодирования производится бинаризация данных путем анализа областей кадра, содержащих кодовые символы. Анализ ведется на основе трех свойств областей нахождения отсчета:

- значение яркости самого яркого пикселя в области;
- сумма яркостей всех пикселей в области;
- положение центра тяжести области относительно геометрического центра области.



**Рис. 5.28.** Результат поиска координат реперных точек на изображении — красные метки, результат поиска элементов бинарного кода — зеленые

Критерии вводятся следующим образом: выбирается отдельно взятая строка отсчетов, находятся значения трех свойств для каждого из отсчетов. Далее отсчеты в строке сортируются в порядке убывания в зависимости от значения суммы яркостей всех пикселей в области. Затем в отсортированной последовательности отсчеты поочередно, начиная с первого, проходят проверку по критериям, связанным с двумя другими свойствами. На этом этапе используются пороговые методы обработки изображений, причем порог для значения яркости самого яркого пикселя в области задается адаптивно для каждой строки, а границы по координатам  $X$  и  $Y$  для разницы между центром тяжести и геометрическим центром области являются общими для всех строк.

Результатом бинаризации данных является двухмерный массив, содержащий координаты символов (рис. 5.29). На финальном этапе декодирования информации используется словарь символов. Путем сравнения каждой строки получившейся матрицы со словарем символов производится подбор закодированных в строках символов.

В качестве критерия оценки качества записи и восстановления голограмм были выбраны значения величины отношения сигнал/шум (SNR) и величины вероятности символьной ошибки (SER) и

	12			13			14			15			16		
1	4	10	12	7	9	13	1	3	8	4	9	12	1	11	16
2	1	11	16	1	11	16	12	14	16	1	6	8	5	9	12
3	7	9	11	1	11	16	3	12	15	8	10	12	8	13	16
4	2	5	8	8	10	15	1	11	16	4	8	11	2	12	16
5	3	8	11	1	11	16	1	6	11	3	7	16	1	7	12
6	1	7	9	2	5	15	1	11	16	1	8	13	1	11	16
7	7	10	15	1	4	11	1	11	16	1	11	16	3	5	15
8	2	11	13	6	10	14	3	6	15	6	8	12	6	11	15

Рис. 5.29. Найденные координаты символов страницы данных

величины вероятности битовой ошибки (BER). Величина сигнал/шум рассчитывалась по формуле

$$SNR = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_0^2}}, \quad (5.9)$$

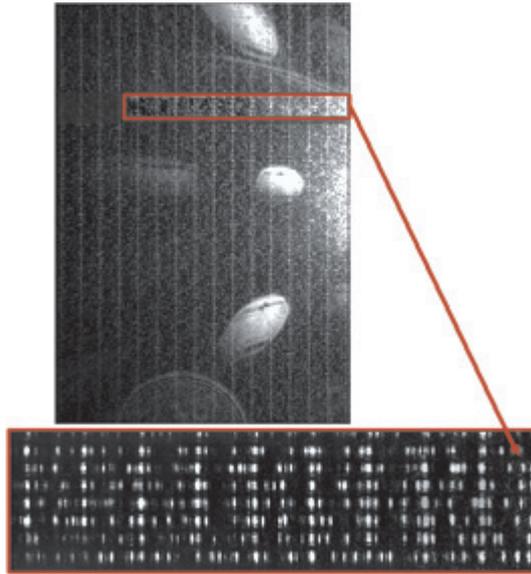
где  $\mu_1$  — математическое ожидание распределения яркости «1» в странице данных,  $\mu_0$  — математическое ожидание распределения яркости «0» в странице данных,  $\sigma_1$  — среднее квадратическое отклонение распределения яркости «1» в странице данных,  $\sigma_0$  — среднее квадратическое отклонение распределения яркости «0» в странице данных. Используя SNR, можно определить вероятность символьных ошибок по формуле

$$SER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{SNR}{\sqrt{2}}\right), \quad (5.10)$$

где  $\operatorname{erfc}(x)$  — функция ошибок (функция Лапласа).

Так как 16 символов кодируют 1 байт и при этом возможны случаи, когда несколько неправильно декодированных символов приходится на 1 байт, то некоторые комбинации неправильно декодированных символов можно скорректировать на основе таблицы кодирования. Поэтому величина вероятности битовых ошибок меньше величины символьных ошибок. Итоговая величина вероятности битовых ошибок оценивается численно на основе экспериментальных данных.

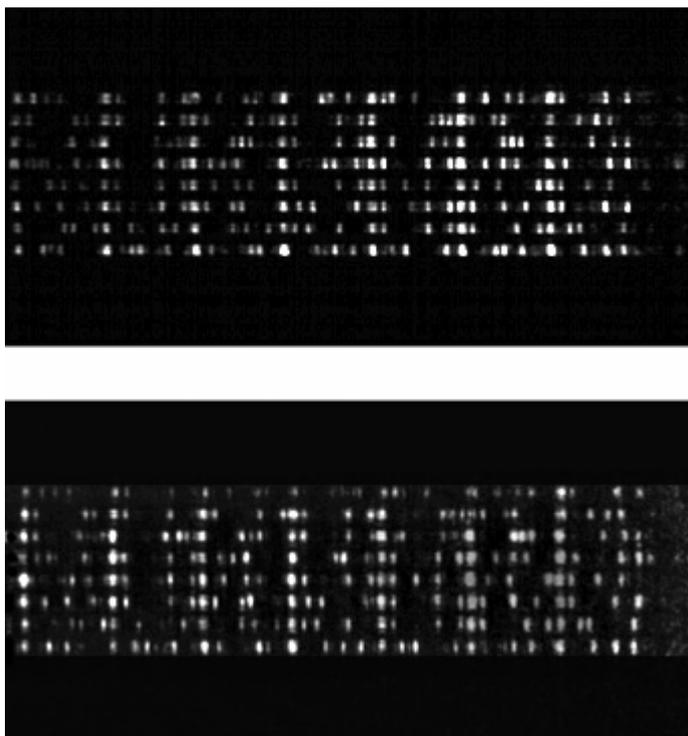
Результат регистрации бинарных изображений цифровой страницы, восстановленной с двухмерной МГФ, приведен на рис. 5.30.



**Рис. 5.30.** Внешний вид бинарного изображения цифровой страницы данных, восстановленной с двухмерной МГФ

На рис. 5.31 представлены примеры изображений, полученных при записи и считывании одномерных микроголограмм Фурье в разработанных устройствах системы голографической памяти с использованием фоточувствительных пластин на основе ВРП-эмульсии. В случае записи единичных голограмм (рис. 5.31, а) анализ восстановленного изображения показал величину отношения сигнал/шум порядка 5,2 ( $SER \approx 10^{-4}$ ). В случае мультиплексированных голограмм (рис. 5.16, б) величина вероятности символьной ошибки составила  $SER = 10^{-4}$ , битовой ошибки  $BER = 10^{-6}$ .

Пример разработки устройств записи и считывания одномерных КСГФ, представленный в главе, показывает потенциальные возможности по созданию компактной системы архивной памяти на основе методов компьютерного голографического синтеза. Стоит отметить, что, используя эмульсии типа ПФГ и некогерентные источники света, элементы мультиплексированных голограмм записывают на один и тот же слой носителя. Данное обстоятельство сильно ограничивает количество возможных мультиплексиро-



**Рис. 5.31.** Изображения страниц полученных в устройствах записи и считывания одномерных микроголограмм Фурье после обработки: а) исходная голограмма без мультиплексирования ( $\text{SNR} = 5,2$ ); б) исходная голограмма состоит из двух мультиплексированных субголограмм ( $\text{SNR} = 4,1$ )

ваний. Экспериментально подтверждена возможность наложения до девяти субголограмм, с использованием эмульсий ПФГ, однако величина отношения сигнал/шум в лучших случаях не превышала 3,8. Для увеличения количества мультиплексированных голограмм необходимо использовать методы, позволяющие осуществить послойную запись, например запись оптических элементов в ФТР-стеклах на основе эффектов многофотонного поглощения [12].

## Литература

1. Mikaelian A. L. The multiplexed recording on hologram of many images / A. L. Mikaelian, V. I. Bobrinev, L. Z. Sokolova // Reports of Academy of Science of USSR. — 1970. — Vol. 191(4).
2. Mikaelian A. L. Holographic memory devices with bulk recording of information / A. L. Mikaelian, V. I. Bobrinev, A. A. Aksel'rod, S. M. Naumov, M. M. Koblova, E. A. Zasovin, K. I. Kushtanin, and V. V. Kharitonov // Sov. J. Quantum Electron. — 1971. — № 1. — 55—59.
3. Odinson S. B. Research of a method and optical system for record multiplex holograms in system of holographic memory / S. B. Odinson, E. A. Usovich, N. M. Verenikina, V. V. Markin, A. S. Goncharov, D. S. Lushnikov, A. S. Kuznetsov, A. Y. Pavlov, A. I. Nikolaev, and O. V. Andreeva // Proc. SPIE 7358, 735816. — 2009.
4. Horimai H. and Tan X. Collinear technology for a holographic versatile disk. Appl. — 2016. — Opt. 45. — P. 910—914.
5. Jean-Charles Vienot, Jacques Duvernoy and Gilbert Tribillon. Problemes du traitement optique de l'information: (Considerations sur des systemes mettant en oeuvre les hologrammes et les concepts de bandes spectrales et de ressemblance des formes). Nouv. Rev. Optique appliquee. — 1971. — № 2(5). — P. 269—278.
6. Zlokazov E.Yu. Development of projection type optical scheme for computer generated Fourier holograms recorder / E. Yu. Zlokazov, S. B. Odinson, N. M. Verenikina, S. S. Donchenko // Chinese Optics Letters. — 2017. — Vol. 15. — Issue 4. — 040903.
7. Редько А. В. Основы химических фотопроцессов, Учеб. пособие. Серия «Учебники для вузов. Специальная литература». — СПб.: Издательство «ЛАНЬ». — 1999. — 512 с.
8. Betin A. Yu. Holographic memory system based on projection recording of computer-generated 1D Fourier holograms / A. Yu. Betin, V. I. Bobrinev, S. S. Donchenko, S. B. Odinson, N. N. Evtikhiev, R. S. Starikov, S. N. Starikov, and E. Yu. Zlokazov // Appl. — 2014. — Opt. 53. — P. 6591—6597.
9. Бетин А. Ю. Метод проекционной мультиплексной записи компьютерно-синтезированных одномерных голограмм Фурье для систем голографической памяти: математическое и экспериментальное моделирование / А. Ю. Бетин, В. И. Бобринев, Н. М. Вереникина, С. С. Донченко, Н. Н. Евтихийев, Е. Ю. Злоказов, С. Б. Одиноков, С. Н. Стариков, Р. С. Стариков // Квант. электроника — 2015. — № 45 (8). — С. 771—775.

10. Donchenko Sergey S. Read-out optical schemes for holographic memory system based on multiplexed computer generated 1D Fourier holograms / Sergey S. Donchenko, Sergey B. Odinokov, Vladimir I. Bobrinev, Alexandr U. Betin, Evgenii Y. Zlokazov // Proc. SPIE 9508, Holography: Advances and Modern Trends IV, 95080A (May 8, 2015).
11. William K. Pratt. Digital image processing. — A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2007.
12. Klyukin D. A. Formation of luminescent and nonluminescent silver nanoparticles in silicate glasses by near-infrared femtosecond laser pulses and subsequent thermal treatment: the role of halogenides / Dmitry A. Klyukin, Victor D. Dubrovin, Alisa S. Pshenova, Sergey E. Putilin, Teimur A. Shakhverdov, Anton N. Tsyarkin, Nikolay V. Nikonorov, Alexander I. Sidorov // Opt. Eng. — 2016. — № 55 (6). — 067101.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной книге были исследованы и получены следующие результаты:

1. Проанализированы основные типы оптических систем памяти цифровой информации на оптических однослойных CD/DVD/BR-дисках (называемых также двумерными 2D-дисками), а также многослойные диски (называемые часто трехмерными 3D-дисками) с побитовой записью и считыванием; рассмотрены принципы создания терабайтных оптических систем архивной памяти типа 3D с побитовой записью (компания Panasonic) и считыванием цифровой информации в объеме регистрирующей среды.
2. Рассмотрены методы и устройства оптико-голографических систем архивной памяти типа 3D с записью в объеме регистрирующей среды. Исследовано страничное представление и кодирование цифровой информации для систем голографической памяти, методы фазового кодирования объектного пучка с помощью фазовых масок и диффузоров, методы мультиплексирования микроголограмм Фурье при записи на фоточувствительные материалы и регистрирующие среды. Проведен сравнительный анализ известных голографических методов записи и восстановления цифровых страниц данных большого объема информации (до единиц ТБ на диск). Приведен обзор основных типов фоточувствительных материалов и регистрирующих сред, используемых при записи мультиплексных микроголограмм Фурье, включая возможности новых фототерморефрактивных стекол для многослойной записи микроголограмм Фурье.
3. Рассмотрены новые методы и принципы построения систем и устройств ОГП на основе компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье. В качестве альтернативы классическому двухлучевому методу записи голограмм предлагается использование методов их компьютерного синтеза. В этом случае цифровая страница информации с помощью численных расчетов кодируется, формируется в виде компьютерно-синтезированной голограммы Фурье (или Френеля), а затем выводится на про-

пространственный модулятор света (ПМС) в оптическую систему, в которой с помощью специализированной оптической системы перезаписывается на фоточувствительный материал, преобразуемый после соответствующей фотохимической обработки в микроголограмму Фурье. Показано, что использование компьютерно-синтезированных голограмм и проекционной оптической системы (фотолитографии) приводит к снижению массогабаритных параметров оптических систем, увеличению скорости записи информации и значительному снижению стоимости аппаратуры ОГП. Исследовано влияние параметров фазовой маски, количества уровней квантования и размерности цифровой страницы данных на качество двумерных и одномерных КСГФ, а также разработан критерий качества КСГФ, характеризующий вероятность битовых и символьных ошибок при получении мультиплексированных микроголограмм Фурье (МГФ) и восстановлении с них цифровых страниц данных.

4. Рассмотрен оригинальный метод и оптико-электронные устройства для записи и считывания цифровой информации с мультиплексированных одномерных компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье как с построчным, так и с постраничным считыванием информации. Приведены параметры и особенности применения ПМС на основе жидких кристаллов для ввода в оптический канал компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье. Предложен новый метод синтеза одномерных МГФ для ГЗУ-записи, учитывающий параметры дискретизации СЦИ и фазовой маски, нелинейности модуляционной характеристики ПМС, МПФ некогерентной проекционной оптической системы, что позволило получить МГФ на фоторегистрирующей среде с расчетными параметрами и повышенной дифракционной эффективностью.
5. Разработана некогерентная оптическая схема ОЭП для получения мультиплексированных одномерных МГФ проекционным методом и проанализировано влияние параметров и нелинейной характеристики пространственного модулятора света на жидких кристаллах (ПМС-ЖК), модуляционной передаточной функции оптической системы на критерий качества при получении МГФ. Впервые предложен метод записи одномерных микроголограмм Фурье в проекционной некогерентной оптической системе с угловым мультиплексированием, что позволило

отказаться от классической двухлучевой интерференционной схемы получения микроголограмм Фурье и в несколько раз повысить допуск на амплитуду вибрации при экспонировании.

6. Впервые предложены когерентные анаморфотные оптические системы для отдельного считывания одномерных мультиплексированных МГФ, что позволило уменьшить величину BER на 2 порядка по сравнению с устройствами ГЗУ-считывания, построенными по классической схеме. Разработана когерентная оптическая схема ОЭП для восстановления цифровых страниц данных с мультиплексированных одномерных МГФ и проведен математический анализ преобразования оптических полей в когерентной оптической системе восстановления.
7. Проведены экспериментальные исследования ОЭП для получения мультиплексированных одномерных МГФ и ОЭП для восстановления с них бинарных изображений кодированных цифровых страниц данных, для которых были достигнуты следующие параметры:
  - метод синтеза одномерных голограмм Фурье позволяет увеличить дифракционную эффективность на 6–10% МГФ, полученных на фоточувствительной регистрирующей среде, за счет учета параметров дискретизации СЦИ и фазовой маски, нелинейности модуляционной характеристики ПМС, МПФ некогерентной проекционной оптической системы;
  - метод записи с угловым мультиплексированием одномерных МГФ в некогерентной проекционной оптической системе позволяет уменьшить габаритные размеры ГЗУ-записи до 10 раз, массу — до 50 раз, повысить допуск на амплитуду колебаний в 4 раза и получить плотность записи  $\sim 0,03$  Гбит/мм<sup>2</sup> для голографического диска на основе галогенидосеребряных фоточувствительных регистрирующих сред;
  - использование анаморфотной оптической системы со специальными пространственными фильтрами в ГЗУ-считывании позволяет восстанавливать бинарные изображения СЦИ с одномерных мультиплексированных МГФ количеством до 40 штук и обеспечивает вероятность битовой ошибки BER  $\sim 10^{-6}$ , что подтверждается результатами экспериментальных исследований.

**Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»**

**ОСНОВНЫЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ  
НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**1. Обеспечение задач технологий безопасности:**

— разработка, исследование и создание оптико-электронных приборов и устройств для экспертно-криминалистического и оперативного контроля подлинности защитных голограмм и идентификации документов строгой отчетности (пропускных документов, паспортов, банковских векселей, таможенных и бухгалтерских документов, государственных документов строгой отчетности и др.).

**2. Создание нового поколения микрооптических деталей, голограммных и дифракционных оптических элементов для оптических и оптико-электронных систем:**

— разработка и создание оптических приборов визуального наблюдения, индикаторов знако-символьной информации, очков дополненной реальности на основе голограммной и дифракционной оптики;

— разработка, исследование и создание голограммных и дифракционных оптических элементов, обеспечивающих минимальные массогабаритные параметры сверхкомпактных оптических систем нового поколения;

— разработка, исследование и создание оптико-голографических объективов для формирования сложных 2D- и 3D-изображений;

— разработка и создание датчиков волнового фронта на основе компьютерно-синтезированных голограммных оптических элементов.

**3. Обеспечение задач по созданию новейших систем архивной оптической памяти и хранения цифровой информации сверхвысокой емкости:**

— разработка, исследование и создание малогабаритных оптико-голографических модулей систем записи больших объемов цифровой информации (до 300 Гб на диск) и их сверхскоростного считывания на основе компьютерно-синтезированных голограмм и микро-, нано-, оптоэлектронной элементной базы.

Производство книг на заказ  
Издательство «ТЕХНОСФЕРА»  
125319, Москва, а/я 91  
тел.: (495) 234-01-10  
e-mail: knigi@technosphera.ru

**Реклама в книгах:**

- модульная
- статьи

**Подробная информация о книгах на сайте**  
<http://www.technosphera.ru>

**Методы и устройства  
оптико-голографических  
систем архивной памяти**  
Под ред. С.Б. Одинокова

Компьютерная верстка – В.Ю. Кознов  
Корректор – Н.А. Шипиль  
Дизайн книжных серий – С.Ю. Биричев  
Дизайн – Н.И. Семячкина  
Выпускающий редактор – С.Ю. Афанасьева  
Ответственный за выпуск – С.А. Орлов

---

Подписано в печать 10.05.18  
Формат 60×90/16  
Гарнитура «Ньютон»  
Печ.л. 14,5. Тираж 200 экз. Зак. № Т-507  
Бумага офсет № 1, плотность 80 г/м<sup>2</sup>

---

Издательство «ТЕХНОСФЕРА»  
Москва, ул. Краснопролетарская, д. 16, стр. 2

---

Отпечатано в полном соответствии с качеством  
предоставленного электронного оригинал-макета  
в типографии АО «Т 8 Издательские Технологии»  
109316, г. Москва, Волгоградский проспект, д. 42