

M. K. BAXODIRXONOV, N. F. ZIKRILLAYEV,
X. M. ILIYEV

YARIMO'TKAZGICHLAR FIZIKASI

O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI
OLIV VA O‘RTA MAXSUS TA‘LIM VAZIRLIGI

M. K. BAXODIRXONOV, N. F. ZIKRILLAYEV, X. M. ILIYEV

YARIMO‘TKAZGICHLAR
FIZIKASI

*O‘zbekiston Respublikasi Oliy va o‘rta maxsus ta‘lim
vazirligining Muvofiqlashtiruvchi kengashi tomonidan bakalavrlar va
magistrlar uchun darslik sifatida tavsiya etilgan*

“TAFAKKUR” NASHRIYOTI

TOSHKENT – 2020

UO'K: 821.512.133-32

KBK: 84(50')6

Yarimo'tkazgichlar fizikasi [Matn] darslik M. K. Baxodirxonov, N. F. Zikrillayev, X. M. Iliyev. – Toshkent: Tafakkur, 2020. 480 bet.

Darslik fanning asosiy bo'limlarini aks ettirgan holda, XII bobdan tashkil topgan. Birinchi bobda yarimo'tkazgich materiallariga mansub bo'lgan qattiq jismlar kristall tuzilishi haqida asosiy tushunchalar berilgan. Ikkinchi bobda qattiq jismlarda elektronlarning energetik holatlari keltirilgan. Uchinchi bobda yarimo'tkazgich materiallarida kristall panjara nuqsonlari, yarimo'tkazgich materiallariga kirishma atomlarining diffuziyasi va ularning eruvchanligi ko'rib chiqilgan. To'rtinchi bobda yarimo'tkazgich materiallarida elektr o'tkazuvchanlik mexanizmi, xususi va kirishmali yarimo'tkazgichlarda zaryad tashuvchilar statistikasi keltirilgan. Beshinchi bobda yarimo'tkazgichlarda fotoelektrik hodisalar ko'rib chiqilgan. Oltinchi – sakkizinchi boblarda yarimo'tkazgichlarda kinetik hodisalar, metall – yarimo'tkazgich kontakti va p – n o'tish sohasidagi fizik jarayonlar, tranzistorlarning tuzilishi va ishlashi yoritib berilgan. To'qqizinchi – o'n ikkinchi boblarda mikroelektronikaning rivojlanishida texnologiyaning o'rni, nanoelektronika fizikasi, nanoelektronika fizikasi va ular asosida fizik kattaliklarni o'lchovchi datchiklarni yaratish imkoniyatlari ko'rib chiqilgan. Darslik texnika oliy o'quv yurtlari talabalari, doktorantlari va pedagoglariga mo'ljallangan.

Ushbu darslik O'zR Oliy va o'rta maxsus ta'lim vazirligining Xalqaro Rivojlantirish Assotsiyatsiyasi ishtirokida Oliy ta'lim moddiy-texnika bazasini mustahkamlash AIF-2/7 innovatsion loyihasi doirasida tayyorlangan.

Taqrizchilar:

Nazirov D.E. – *f.-m.f.n., dotsent. O'zMU "Yarimo'tkazgichlar va polimerlar fizikasi" kafedrasida dotsenti;*

Yusupov D.B. – *f.-m.f.d., professor. TDTU "Lazer texnologiyalari va optoelektronika" kafedrasida mudiri.*

UO'K: 821.512.133-32

KBK: 84(50')6

ISBN: 978-9943-24-215-9

© "Tafakkur" nashriyoti, 2020

ANNOTATSIYA

Darslikda qattiq jismlar kristall tuzilishi, kristall panjara nuqsonlari, elektronlarning energetik holatlari, kirishma atomlari diffuziyasi va eruvchanligi, yarimo'tkazgich materiallarida elektr o'tkazuvchanlik mexanizmi, xususiy va kirishmali yarimo'tkazgichlarda zaryad tashuvchilar statistikasi, yarimo'tkazgich materiallarining fotoelektrik xossalari, yarimo'tkazgichlarda kinetik hodisalar, metall – yarimo'tkazgich kontakt sohasi va $p - n$ o'tish sohasidagi fizik jarayonlar, tranzistorlarning tuzilishi va ishlashi. nanoelektronika fizikasi ko'rib chiqilgan.

АННОТАЦИЯ

В учебнике приведены основные понятия о кристаллической структуре твердых тел, дефекты кристаллической решётки, энергетические состояния электронов в полупроводниках, диффузия примесных атомов и их растворимость в полупроводниковых материалах, механизмы электропроводности, статистика электронов и дырок в собственных и примесных полупроводниках, фотоэлектрические свойства полупроводниковых материалов, кинетические явления, физические процессы в контактах металл – полупроводник и в $p - n$ переходах, структура и принцип действия транзисторов, физика нанoeлектроники.

ANNOTATION

The textbook contains basic notions about crystal lattice structure of solid states, defects of crystal lattice, the energy states of electrons in semiconductors, diffusion of impurity atoms and their solubility in semiconductors, the mechanisms of conductivity, the statistics of electrons and holes in the intrinsic and extrinsic semiconductors, the photovoltaic properties of semiconductor materials, kinetic phenomena, physical processes in the metal – semiconductor contact and $p - n$ junction, the structure and operation of the transistors, the physics of nanoelectronics.

KIRISH

Butun dunyoda fan va texnikaning rivojlanishida, ayniqsa, hozirgi nanotexnologiya va nanoelektronika asrida yoshlar orasida elektronika faniga qiziqish tobora ortmoqda. Shuning uchun elektronika fanining asosi bo'lgan "Yarimo'tkazgichlar fizikasi" fanida qiziqarli, tushunarli va sodda yozilgan adabiyotlarga talab ortib bormoqda. Ushbu darslik oliy o'quv yurtlarida fizika va elektronika sohasi bo'yicha ta'lim olayotgan bakalavr va magistr'larga mo'ljallangan. Darslikda elektronika va mikroelektronikaning asosi bo'lgan yarimo'tkazgichlar fizikasining qattiq jismlar, qattiq jismlarda elektronlarning energetik holatlari, yarimo'tkazgich materiallar, yarimo'tkazgichlarda zaryad tashuvchilar statistikasi, yarimo'tkazgichlarda fotoelektrik hodisalar, yarimo'tkazgichlarda kinetik hodisalar, metall – yarimo'tkazgich kontakti va $p - n$ o'tish fizikasi, tranzistorlar, mikroelektronikaning rivojlanishida texnologiyaning o'rne, nano o'lchamli yarimo'tkazgichlar fizikasi, kremniyda chuqur energetik sath hosil qiluvchi kirishma atomlar asosida kuzatilgan fizik hodisalar, kompensatsiyalangan kremniy asosida fizik kattaliklarni o'lchovchi datchiklar boblarida nazariy va ko'proq fizikaviy tushunchalar yoritilgan. Har bir bob so'ngida mavzularni chuqurroq o'zlashtirish maqsadida nazariy savollar berilgan hamda nazariy bilimlarni amaliyotda qo'llash uchun masalalar taqdim etilib, ularni yechish namunalari keltirilgan. Darslik lotin grafikasida sodda va tushunarli qilib yozilganligi hamda bu kabi darsliklarning deyarli mavjud emasligi darslikka bo'lgan talabni oshiradi.

1.QATTIQ JISMLAR

1.1. Qattiq jismlar fizikasining asosiy tushunchalari

Qattiq jism – aniq shaklga ega bo'lgan va uni tashkil etgan atomlar o'zining muvozanat holati atrofida mavjud haroratga mos doim tebranishga ega bo'lgan modda holatiga aytiladi.

Qattiq jismlar atom tuzilishiga qarab 3 turga bo'linadi:

1. Monokristallar – qattiq jismni tashkil etgan atomlar o'zaro tartibli va davriy joylashgan holatda bo'lib, bunda qattiq jism qanday o'lchovda bo'lishidan qat'iy nazar undagi har qanday atom o'zining yaqin va uzoq atomlar bilan bir xil tartib va davriy tuzilishga ega bo'ladi. Tabiatda monokristallar (olmos, kvars) kam uchraydi. Odatda ular sun'iy usulda olinadi.

2. Polikristallar – o'lchovlari $1\div 100$ mkm li monokristall donachalardan tashkil topgan qattiq jismdir. Bunda monokristall atomlarning tartibli va davriy tuzilishi buzilishdan tashqari ular o'rtasida ma'lum bo'shliq hosil bo'ladi.

3. Amorf jismlar – bunday qattiq jismlarda atomlarning yaqin qo'shni atomlar bilan tartibli va davriy joylashishi mavjud bo'lsa ham, undan uzoqlashgan sari atomlarning davriy tartibli joylashishi buzila boradi. Masofa uzoqlashgan sari bunday buzilish kuchli namoyon bo'ladi. Shuning uchun ilmiy tilda atomlar joylashishida yaqin tartib mavjud, ammo uzoq tartib bo'lmagan qattiq jismlarga amorf jismlar deb nom berilgan.

Qattiq jismlar elektr va issiqlik o'tkazuvchanligiga qarab quyidagi turlarga bo'linadi:

Metallar – yuqori elektr va issiqlik o'tkazuvchanlikka ega, harorat pasayishi bilan o'tkazuvchanligi ortib boradigan, yuqori

plastik xossaga ega bo'lgan qattiq jismdir. Ko'pchilik metallar o'ta past haroratda ($t = 0.1 + 23 K$) o'ta o'tkazuvchanlik xossasiga ega bo'ladi.

Yarimo'tkazgichlar – elektr o'tkazuvchanligi metallarnikidan ancha kam ($\sigma = 10^3 + 10^{-10} (Om/sm)^{-1}$), kirishma atomlar konsentratsiyasiga o'ta sezgir, harorat pasayishi bilan elektr o'tkazuvchanligi eksponensial qonuniyat bilan kamayadigan, past haroratlarda ($t = 1 + 2 K$) dielektrik xossasiga ega bo'lgan qattiq jismlardir.

Dielektriklar – elektr va issiqlik o'tkazuvchanligi juda kam va tashqi elektr maydoni ta'sirida qutblanishga ega bo'lgan qattiq jismlardir.

Segnetoelektriklar – bunday kristallar tashqi ta'sirga o'ta sezgir dielektriklar bo'lib, ma'lum harorat oralig'ida o'z-o'zidan poliyarizatsiyalanadi.

Ferromagnitlar – bunday qattiq jismlarda Kyuri haroratidan past haroratlarda ion yoki atomlar magnit momentlarining (metall bo'lmagan qattiq jismlarda) yoki jamlangan elektronlar magnit momentlarining (metallarda) tartibli bo'ladi.

Kompozitsion materiallar – alohida texnologiya asosida aniq miqdorda olingan, fizik xossalari har xil bo'lgan moddalar aralashmasidan iborat qattiq jismdir. Kompozitsion materiallarning fizik xossalari ularni tashkil etgan moddalar xossalaridan tubdan farq qiladi.

O'ta o'tkazuvchan materiallar – ma'lum kritik haroratdan past haroratlarda qarshiligi yo'qoladigan, ya'ni o'tkazuvchanligi cheksiz bo'ladigan materiallar.

Quyidagi jadvallarda ba'zi o'tkazgichlarning ayrim fizik xossalari keltirildi:

1.1-jadval
O'tkazgichlarning solishtirma qarshiligi

№	O'tkazgichlar		ρ – solishtirma qarshilik xona haroratida $T=300\text{ K}$	
	Element va birikmalar	Nomlanishi	$\text{Om}\cdot\text{mm}^2/\text{m}$	$\text{Om}\cdot\text{m}$
1	Al	Alyuminiy	0.027	$2.7\cdot 10^{-8}$
2	W	Volfram	0.055	$5.5\cdot 10^{-8}$
3	C	Grafit	8.0	$8.0\cdot 10^{-6}$
4	Fe	Temir	0.1	$1.0\cdot 10^{-7}$
5	Au	Oltin	0.022	$2.2\cdot 10^{-8}$
6	Ir	Iridiy	0.0474	$4.74\cdot 10^{-8}$
7	Cu+Ni+Mn	Konstantan	0.50	$5.0\cdot 10^{-7}$
8	Fe	Quyma po'lat	0.13	$1.3\cdot 10^{-7}$
9	Mg	Magniy	0.044	$4.4\cdot 10^{-8}$
10	Cu+Mn+Ni	Manganin	0.43	$4.3\cdot 10^{-7}$
11	Cu	Mis	0.0172	$1.72\cdot 10^{-8}$
12	Mo	Molibden	0.054	$5.4\cdot 10^{-8}$
13	Cu+Ni+Zn	Neyzilber	0.33	$3.3\cdot 10^{-8}$
14	Ni	Nikel	0.087	$8.7\cdot 10^{-8}$
15	Ni+Cr	Nixrom	0.092	$1.12\cdot 10^{-6}$
16	Sn	Qalay	0.12	$1.2\cdot 10^{-7}$
17	Pt	Platina	0.107	$1.07\cdot 10^{-7}$
18	Hg	Simob	0.96	$9.6\cdot 10^{-7}$
19	Pb	Qo'rg'oshin	0.208	$2.08\cdot 10^{-7}$
20	Ag	Kumush	0.016	$1.6\cdot 10^{-8}$
21	Fe+C	Cho'yan	1.0	$1.0\cdot 10^{-6}$
22	Zn	Rux	0.059	$5.9\cdot 10^{-8}$

**Moddalarning o'ta o'tkazuvchanlik holatiga o'tish harorati va
kirishma atomlari**

N_a	Element	Nomlanishi	Kritik harorat T_c K	H_c Gs
1	Al	Aluminiy	1,196	99
2	Cd	Kadmiy	0,56	30
3	Ga	Galliy	1,091	51
4	Hf	Gafniy	0,09	—
5	Hg α (romboedr)	Simob	4,15	411
6	In	Indiy	3,4	293
7	Ir	Iridiy	0,14	19
8	La α	Lantan	4,9	798
9	Mo	Molibden	0,92	98
10	Nb	Niobiy	9,26	1980
11	Os	Osmiy	0,655	65
12	Pa	Protaktiniy	1,4	—
13	Pb	Qo'rg'oshin	7,19	803
14	Re	Reniy	1,698	198
15	Ru	Ruteniy	0,49	66
16	Sn	Qalay	3,72	305
17	Ta	Tantal	4,48	830
18	Tc	Texnetsiy	7,77	1410
19	Th	Toriy	1,368	162
20	Ti	Titan	0,39	100
21	Tl	Talliy	2,39	171
22	U α	Uran	0,68	—
23	U γ	Uran	1,8	—
24	V	Vanadiy	5,3	1020
25	W	Volfram	0,012	1
26	Zn	Rux	0,875	53
27	Zr	Sirkoniy	0,65	47

Eng asosiy yarimoʻtkazgich materiallarning parametrlari

	Ge	Si	GaAs	GaP	CdS	CdTe	ZnS	ZnS
Atomlar soni (sm^{-3})	$4,42 \cdot 10^{22}$	$5,0 \cdot 10^{22}$	$4,42 \cdot 10^{22}$	$5,02 \cdot 10^{22}$	$4 \cdot 10^{22}$	$1,46 \cdot 10^{22}$	$5 \cdot 10^{22}$	
Atom massasi (g/mol)	72,60	28,09	144,63	100,7	144,46	240	97,45	
Teshilish kuchlanishi (V/sm)	$\sim 10^5$	$\sim 3 \cdot 10^5$	$\sim 4 \cdot 10^5$					
Kristall strukturasi	D	D	Z	Z	W	Z	Z	W
Zichligi (g/sm^3)	5,3267	2,328	5,32	4,07	4,82	5,86	4,09	4,10
Solishtirma dielektrik singdiruvchanligi	16,0	11,9	13,1	11,1	5,4	10,2	5,2	
Oʻtkazuvchanlik sohasida effektiv holatlar zichligi N_c (sm^{-3})	$1,04 \cdot 10^{19}$	$2,8 \cdot 10^{19}$	$4,7 \cdot 10^{17}$	$8,6 \cdot 10^{19}$	$1,04 \cdot 10^{19}$	$2,1 \cdot 10^{19}$	$2,9 \cdot 10^{19}$	$2,9 \cdot 10^{19}$
Valent sohasida effektiv holatlar zichligi N_v (sm^{-3})	$6,0 \cdot 10^{18}$	$1,04 \cdot 10^{19}$	$7,0 \cdot 10^{18}$	$5,2 \cdot 10^{19}$	$8,32 \cdot 10^{19}$	$9,6 \cdot 10^{19}$	$1,42 \cdot 10^{19}$	$1,42 \cdot 10^{19}$
Elektronlar effektiv massasi, m^*/m_0	$m_1^* = 1,64$ $m_1^* = 0,08$ 2	$m_1^* = 0,98$ $m_1^* = 0,19$	0,067	0,82	0,21	0,096	0,27	
Kovaklar effektiv massasi	$m_{lh}^* = 0,04$ 4 $m_{hh}^* = 0,28$	$m_{lh}^* = 0,16$ $m_{hh}^* = 0,49$	$m_{lh}^* = 0,08$ 2 $m_{hh}^* = 0,45$	0,60	0,80	0,35	0,58	
Elektronning atomga birikish jarayonida ajralib	4,0	4,05	4,07					

chiqadigan energiya (eV)												
Taqqiqlangan soha kengligi ($T=300\text{ K}$), (eV)	0,67	1,12	1,424	2,26	2,42	1,56	3,68		3,74			
Xususiy konsentratsiya (sm^{-3})	$2,4 \cdot 10^{13}$	$1,45 \cdot 10^{10}$	$1,79 \cdot 10^6$	6,7	0,299	$4,03 \cdot 10^6$	$2,02 \cdot 10^{12}$					
Debay uzunligi (mkm)	0,68	24	2250									
Xususiy yarimo'tkaz- gichning solishtirma qarshiligi ($\Omega \cdot \text{sm}$)	47	$2,3 \cdot 10^3$	10^8	$4,16 \cdot 10^{15}$	$5,26 \cdot 10^{16}$	$1,4 \cdot 10^9$	$1,8 \cdot 10^{27}$					
Panajara doimiysi (Å)	5,64613	5,43095	5,6533	5,451	4,13 (a) 6,75 (c)	6,48	5,41		3,82 (a) 6,26 (c)			
Chiziqli kengayishning harorat koeffitsiyenti, $\Delta L/L\Delta T$, ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	$5,8 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$6,86 \cdot 10^{-6}$	$4,7 \cdot 10^{-6}$	$5,7 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$6,2 \cdot 10^{-6}$					
Eriş harorati T , ($^{\circ}\text{C}$)	958	1415	1240	1477	1748	1092	1020		1780			
Asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning yashash vaqti, s	10^{-3}	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$\sim 10^{-8}$									
Dreyf tezligi, $\text{sm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$	3900	1500	8500	110	340	1050			165			
Elektronlar	1900	450	400	75	50	100			5			
Kovaklar												
Optik fononlar energiyasi E_n , (eV)	0,037	0,063	0,035									
Fononlarning o'rtacha	105	76	58									

erkin yugurish masofasi (A)		(elektron) 55 (kovak)						
Solishirma issiqlik, Dj/(g.°C)	0,31	0,7	0,35					
Issiqlik o'tkazuvchanlik (300 K), Wt/(sm.°C)	0,6	1,5	0,46	0,2	0,075	0,026		
Issiqlik diffuziya koeffitsiyenti (sm ² /s)	0,35	0,9	0,44					
Bug'lar bosimi (Pa)	1=1330 °C da 10 ⁻⁶ =760 °C da	1=1650 °C da 10 ⁻⁶ =900 °C da	100=1050 °C da 1=900 °C da	3,8—enish temperatu rasida	0,23=erish temperatu rasida	3,7—erish temperatu rasida		

D – olmos, W – vyursit, Z – rux obmankasi.

Yarimo 'tkazgich materiallar

Material	Element yoki birikmalar	Nomlanishi	Kristall strukturas	Panjara doimiysi (Å) 300 K da
Element	C	Uglerod	D	3,56683
	Ge	Germaniy	D	5,64613
	Si	Kremniy	D	5,43095
	Sn	Qalay	D	6,4892
IV-IV	SiC	Kremniy karbidi	W	a=3,086; c=15,117
III-V	AlAs	Alyuminiy arsenidi	Z	5,6605
	AlP	Alyuminiy fosfidi	Z	5,451
	AlSb	Alyuminiy antimonidi	Z	6,1355
	BN	Bor nitridi	Z	3,615
	BP	Bor fosfidi	Z	4,538
	GaAs	Galliy arsenidi	Z	5,6533
	GaN	Galliy nitridi	W	a=3,189; c=5,185
III-V	GaP	Galiy fosfidi	Z	5,4512
	GaSb	Galiy antimonidi	Z	6,0959
	InAs	Indiy arsenidi	Z	6,0584
	InP	Indiy fosfidi	Z	5,8686
II-VI	InSb	Indiy antimonidi	Z	6,4794
	CdS	Kadmiy sulfidi	Z	5,832
	CdS	Kadmiy sulfidi	W	a=4,16; c=6,756
	CdSe	Kadmiy selenidi	Z	6,05
	CdTe	Kadmiy telluridi	Z	6,482
	ZnO	Rux oksidi	R	4,58
	ZnS	Rux sulfidi	Z	5,42
II-VI	ZnS	Rux sulfidi	W	a=3,82; c=6,26

IV-VI	PbS	Qo'rg'oshin sulfidi	R	5,9362
	PbTe	Qo'rg'oshin telluridi	R	6,462
	PbSe	Qo'rg'oshin selenidi	R	6,12

D – olmos, W – vyursit, Z – rux obmankasi, R – osh tuzi.

1.5-jadval

Dielektriklar

Dielektriklar	Solishtirma elektr qarshiligi ρ ($\text{Om} \cdot \text{m}$) ($T=300\text{K}$)	Dielektriklar	Solishtirma elektr qarshiligi ρ ($\text{Om} \cdot \text{m}$) ($T=300\text{K}$)
Bakelit	10^{16}	Pleksiglas	10^{13}
Benzol	$10^{15} \dots 10^{16}$	Polistirol	10^{16}
Qog'oz	10^{15}	Polixlorvinil	10^{13}
Distrlangan suv	10^4	Polietilen	$10^{10} \dots 10^{13}$
Dengiz suvi	0,3	Silikon yog'	10^{14}
Quruq daraxt	$10^9 \dots 10^{13}$	Slyuda	10^{11}
Nam yer	10^2	Shisha	$10^{10} \dots 10^{13}$
Kvars shisha	10^{16}	Transformator yog'i	10^{14}
Kerosin	$10^{10} \dots 10^{12}$	Chinni	10^5
Mramor	10^8	Shifer	$10^{16} \dots 10^{18}$
Parafin	$10^{14} \dots 10^{16}$		
Parafin yog'	10^{14}		

1.6-jadval

Ba'zi kimyoviy moddalarning fazaviy o'tish harorati

Moddalar	Kimyoviy formulasi	Fazaviy o'tish harorati T (°C)	Maksimal spontan qutblanish P (mkKl·sm ⁻²)	Simmetriyalar-ning nuqtaviy guruhlari	
				Qutb-siz faza	Qutbli faza
Bariy titanati	BaTiO ₃	133	25	m3m	4mm
Tuz segneti	KNaC ₄ H ₄ O ₆ · 4H ₂ O	-18-24	0.25	222	2
Triglitsinsulfat	(NH ₂ CH ₂ COOH) 2 H ₂ SO ₄	49	2.8	2/m	2
Kaliy digidrofosfati	KH ₂ PO ₄	-150	5.1	m	2
Kaliy dideyterofosfati	KD ₂ PO ₄	-51	6.1	m	2
Litiy niobati	LiNbO ₃	1210	50	m	3m
Ammoniy fluorberillati	(NH ₄) ₂ BeF ₄	-97	0.15	mmm	2
Godolin molibdati	Gd ₂ (MoO ₄) ₃	159	0.18	m	2
Vismut titanat	BiTi ₃ O ₁₂	675	-	4/mmm	M

**Ferromagnetiklar uchun ferromagnit Kyuri
haroratining qiymatlari**

Modda	Kyuri haroratida T_c, (°C)	Modda	Kyuri haroratida T_c, (°C)
RbNiF ₃	139	GdFe ₂	789
CsNiF ₃	150	Fe ₃ O ₄	858
Gd ₃ Fe ₅ O ₁₂	564	SmCO ₂	1020
MgFe ₂ O ₄	713		

1.2. Qattiq jismlarning kristall panjaralari

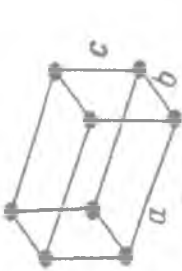
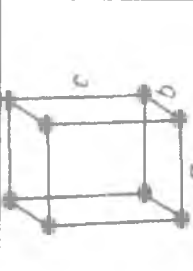
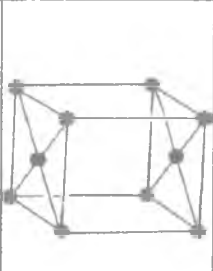
Kristall deganda, qattiq jismni tashkil etgan atomlarning tartibli va davriy joylashganini tushunamiz. Bunda atomlar fazoda bir-birlari bilan har xil burchaklardagi 3 ta yoʻnalish boʻylab davriy joylashgan boʻladi. Kristallardagi xohlagan atomni olib, eng yaqin qoʻshni atomlar asosida tuzilgan (a, b, c) hajmga ega geometrik shakl – kristallning elementar yacheykasi, deb ataladi.

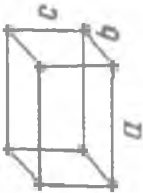
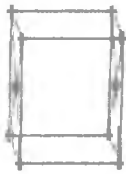
Demak, elementar yacheykani a, b, c yoʻnalishlar boʻyicha koʻchirish hisobiga xohlagan oʻlchovdagi kristall hosil qilish mumkin. Kristallning eng kichik boʻlinmaydigan holati bu elementar yacheyka boʻlib xizmat qiladi.

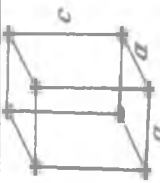
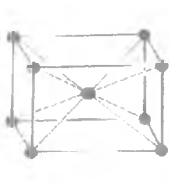
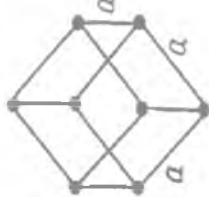
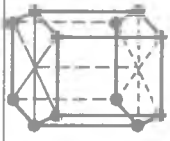
Kristall panjara doimiysi – bu kristall panjarani tashkil etgan atomlar orasidagi masofa boʻlib, odatda kristall tuzilishiga qarab $3,5 \div 6 \text{ \AA}$ oraligʻida boʻladi.

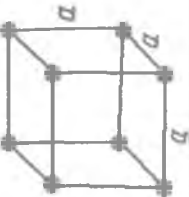
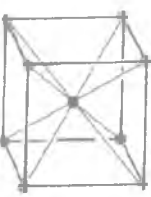
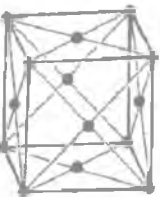
Kristall panjara atomlarining a, b, c yoʻnalishlari orasidagi burchaklar (α, β, γ) va a, b, c yoʻnalishlar qiymatiga qarab, kristall panjaralar tuzilishini 14 xilga boʻlish mumkin. Ular **Brave elementar panjaralari** deb ataladi. Bu 14 xil kristall panjaralar 7 ta guruhga ajratiladi.

Panjara turlari – Brave panjaralari

uz Triklin panjara ru. Триклинная решётка en. Triclinic lattice	To'g'ri burchakdan bo'lmagan, qirra uzunliklari turlicha bo'lgan geometrik shakldagi panjara.	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	
uz Monoklin panjara ru. Моноклидная решётка en. Monoclinic lattice	Qirra uzunliklari (a, b, c) turlicha bo'lgan, a va c hamda b va c tomonlar o'rtasidagi burchak 90° , ammo a va b tomon orasidagi burchak 90° ga teng bo'lmagan panjara.	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$	
uz Asosi markazlashgan monoklin panjara ru. Базис-центрированная моноклидная решётка en. Basecentered monoclinic lattice	Monoklin panjaraning asoslari markazlarida atom joylashgan bo'ladi.	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$	

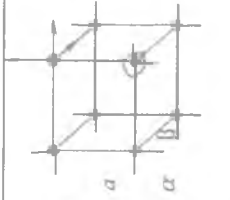
uz Rombik panjara ru Ромбическая решётка en (Ortho)rhombic lattice	Shakli to'g'ri burchakli parallelepipeddan iborat panjara	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
uz Asosi markazlashgan rombik panjara ru Базо-центрированная ромбическая решётка en Base centered rhombic lattice	Rombik panjaraning asoslan markazlarida atom joylashgan bo'ladi	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
uz Hajmi markazlashgan rombik panjara ru Объёмно-центрированная ромбическая решётка en Body-centered rhombic lattice	Rombik panjaraning markazida atom joylashgan bo'ladi	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
uz Tomonlari markazlashgan rombik panjara ru Гране-центрированная ромбическая решётка en Facecentered rhombic lattice	Rombik panjaraning tomonlan markazlarida atom joylashgan bo'ladi	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	

uz Tetragonal panjara ru Тетрагональная решётка en Tetragonal lattice	Asosi kvadrat bo'lgan to'g'ri burchakli parallelepiped shaklidagi panjara.	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
uz Hajmi markazlashgan tetragonal panjara ru Объёмно-центрированная тетрагональная решётка en Body-centered tetragonal lattice	Tetragonal panjaraning markazida atom joylashgan bo'lati	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
uz Romboedrik panjara (Trigonal panjara) ru Ромбоэдрическая (Тригональная) решётка en Rhombohedral (trigonal) lattice	Tomonlari bir-biriga teng, burchaklar ham bir-biriga teng va 90° ga teng bo'lmagan geometrik shaklidagi panjara yoki asoslan va tomonlari romblardan iborat bo'lgan panjara.	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
uz Geksagonal panjara ru Гексагональная решётка en Hexagonal lattice	Asosi to'g'ri olti burchakli prizma shaklidagi panjara	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$	

uz. Kubik panjara (Oddiy kubpanjara) ru. Кубическая решетка en. Cubic lattice	Shakli kub ko'rinishidagi panjara. Kubik panjaraning uch xil ko'rinishi mavjud: oddiy, hajmi markazlashgan va tomonlari markazlashgan.	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
uz. Hajmi markazlashgan kub ru. Объемно-центрированная кубическая решетка en. Body-centered cubic lattice	Shakli kub ko'rinishida ammo markazida bitta atom joylashgan panjara.	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
uz. Tomonlari markazlashgan kub ru. Гране- центрированная кубическая решетка en. Face-centered cubic lattice	Shakli kub ko'rinishidagi ammo kubning olti tomonlan o'rtalarida bittadan atom joylashgan panjara.	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	

Elementar yacheykalar o'z ichiga olgan atomlar soniga qarab, oddiy va murakkab (atomlar zich joylashgan) turlarga bo'linadi Ular 1 9-jadvalda keltirilgan.

(Oddiy va murakkab elementar yacheykalar

uz. Elementar kristall panjara ru. Элементарная кристаллическая решётка en. Elementary crystal lattice	Kristall panjara doimiy (a, b, c)lar asosida qunlgan eng kichik panjaradir. Elementar kristall panjarani 3 xil yo'nalishga o'z-o'ziga mos ravishda siljitish orqali xohlagan o'lchamdagi kristalini olish mumkin.	
uz. Murakkab kristall panjara ru. Сложная кристаллическая решётка en. Complex lattice	Elementar panjaraning nafaqat tugunlarda, balki (uning yon tomonida va ichida) tugunlararo va hajmda atomlar joylashgan bo'ladi. Masalan, oddiy kub panjaraga bitta atom tegishli bo'lsa, hajmi markazlashgan panjaraga 2 ta atom, tomonlar markazlashgan panjaraga 4 ta atom tegishli bo'ladi. Panjarada atomlar son $N = \frac{A}{8} + \frac{B}{4} + \frac{C}{2} + D$ formula bilan aniqlanadi. Bu yerda, A – panjara tugunlaridagi, B – qirralaridagi, C –tomonlaridagi, D – hajmidagi atomlar soni.	

Elementar yacheyka o'z ichiga olgan atomlar soni quyidagicha hisoblab topiladi:

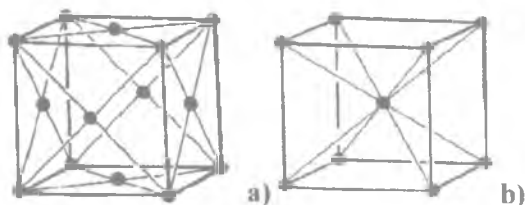
Masalan, kub elementar yacheykada har bir tugunda joylashgan atom bir vaqtning o'zida xuddi shunday 8 ta elementar yacheyka tuzilishida ishtirok etganligi uchun tugunda joylashgan atomlar soni A ni topish uchun 8 ga bo'lish lozim. $A/8$ bo'ladi.

Demak, tugunda joylashgan atomning $1/8$ qismigina shu elementar yacheykaga taalluqli bo'ladi.

Agar atomlar kub yacheykaning qirralari orasida joylashgan bo'lsa, undagi atomlarning $1/4$ qismigina shu elementar yacheykaga tegishli bo'ladi. Qirradagi atomlar soni B bo'lsa, unda bu yacheykaga tegishli atomlar soni $B/4$ bo'ladi.

Agar kub yacheyka tomonlari markazlashgan bo'lsa (1.1-rasm, a), unda tomonlarda turgan atom 2ta shunday elementar yacheyka tuzilishida qatnashayotgani uchun undagi atomlar soni C ning yarmi, ya'ni $C/2$ ko'rilayotgan elementar yacheykaga tegishli bo'ladi.

Agar kub panjara hajmiy markazlashgan bo'lsa, (1.1-rasm, b), uning hajmidagi atom faqat shu yacheykaga tegishli bo'ladi.



1.1-rasm. Tomonlari markazlashgan kub yacheyka (a), hajmiy markazlashgan kub yacheyka (b)

Shunday qilib, har qanday elementar yacheykaga tegishli atomlar sonini quyidagicha aniqlash mumkin:

$$N = \frac{A}{8} + \frac{B}{4} + \frac{C}{2} + D \quad (1.1)$$

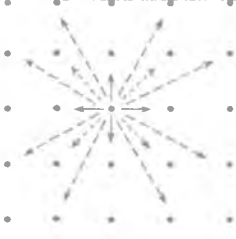
Kristallarda yana **koordinatsion son** degan tushuncha mavjud. Bu kristalldagi xohlagan atomning eng yaqin qo'shni atomlari sonini ko'rsatadi.

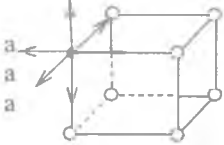
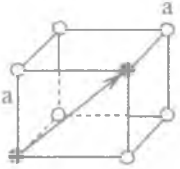
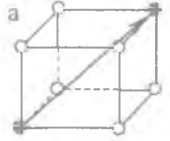
Bunday qo'shni atomlar ko'rilayotgan atomga nisbatan yaqin, uzoq va yanada uzoqroq joylashishiga qarab koordinatsion son har xil tartibga ega bo'ladi. Masalan, kub kristallda 1– tartibli koordinatsion son bu ko'rilayotgan atomning eng yaqin qo'shni atomlar sonini. 2– tartibli koordinatsion son undan keyinroq masofada joylashgan qo'shni atomlar sonini, 3– tartibli koordinatsion son 2– tartibli koordinatsion sondan keyingi masofada joylashgan atomlar soni. Bu tartib kristallarda $1+n$ gacha davom etishi mumkin, ya'ni koordinatsion sonlar N – tartibli bo'lishi mumkin. Shuni ta'kidlash lozimki, kristallarda xohlagan atom uchun $1, 2, 3, \dots, n$ tartibli koordinatsion soni va ko'rilayotgan atom bilan xohlagan koordinatsion sondagi masofa o'zgarmas bo'ladi. Bu degani kristallarda hamma vaqt yaqin va uzoq tartib mavjud bo'ladi.

Ular haqidagi ma'lumotlar 10-jadvalda keltirilgan:

1.10-jadval

Koordinatsion son. Yaqin va uzoq tartib

uz.Koordinatsion son ru.Координационное число en.Coordination number	Kristalldagi har qanday atomning eng yaqin qo'shnilar soni. Qo'shnilar ko'rilayotgan atomga nisbatan yaqin, uzoq va yanada uzoq bo'lishi mumkin. Bunday qo'shnilar soni va ular o'rtasidagi masofa kristalldagi barcha atomlar uchun doimo bir xil bo'ladi. Bunday qo'shnilar $1, 2, 3, \dots, n$ – tartibli qo'shnilar yoki $1, 2, 3, \dots, n$ – tartibli koordinatsion sonlar deyiladi. Har bir koordinatsion tartibli koordinatsion qo'shni soni va ular o'rtasidagi masofa hamma atom uchun bir xil va o'zgarmas bo'ladi. Bu kristall asosi hisoblanadi.	
---	--	--

uz.1-tartibli koordinatsion son ru.Координа- ционное число первого порядка en Coordina- tion number of firstorder	Kub kristall panjarada 1-tartibli koordinatsion sonlar soni 6 ta bo'lib, ular orasidagi masofa $d = a$, ya'ni panjara doimiysiga teng.	
uz.2-tartibli koordinatsion son ru.Координа- ционное число второго порядка en Coordina- tion number of second order	Kub kristall panjarada 2 – tartibli koordinatsion sonlar soni 12 ta va ular orasidagi masofa $d = a\sqrt{2}$ ga teng.	
uz.3-tartibli koordinatsion son ru.Координа- ционное число третьего порядка en.Coordina- tion number of third order	Kub kristall panjarada 3 – tartibli koordinatsion sonlar soni 8 ta bo'lib, ular orasidagi masofa $d = a\sqrt{3}$ ga teng.	

Kristallardan farqli holda amorf moddalarda yaqin tartib mavjud bo'lib, uzoq tartib buziladi.

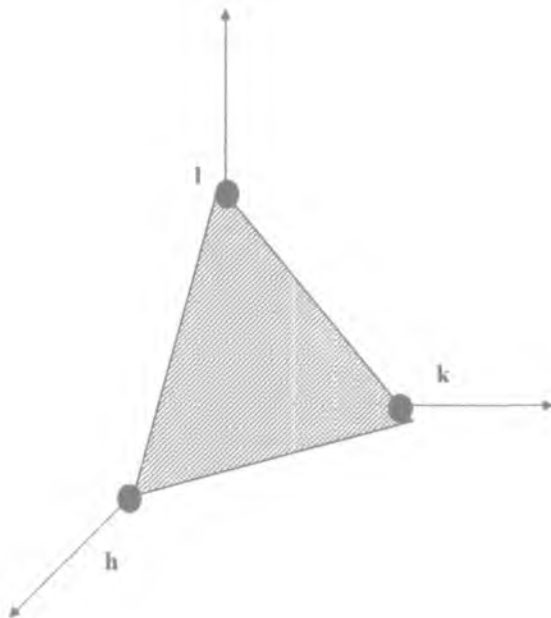
1.3. Miller indekslari

Kristallar tabiiy bo'lsin, yoki sun'iy yo'l bilan olingan bo'lsin, ular bir xil atomlardan (*olmos*, *Ge*, *Si*) yoki ikki-uch xil atomlardan tuzilgan bo'ladi (*NaCl*, *LiF*, *GaAs*). Demak, kristallar monoatomlik yoki murakkab atomlik kristallarga bo'linadi. Kristallarda atomlar joylashgan tekislik va uning yo'nalishini aniqlash nafaqat kristallning fizik xossalariga balki, ular asosida yaratiladigan elektron asboblarning xossalariga ham ta'sir etadi.

Kristall panjara tekisliklari odatda **Miller indekslari (belgilari)** bilan aniqlanadi.

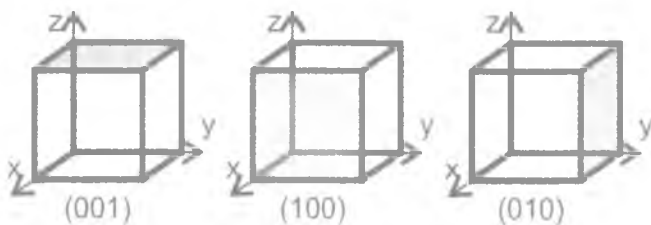
Bunda ko'rilayotgan tekislikning koordinata o'qlari bilan kesishgan nuqtalarini x_0, y_0, z_0 deb belgilab olsak va bu x_0, y_0, z_0 larning panjara doimiysiga taqsimoti $\frac{x_0}{a}, \frac{y_0}{b}, \frac{z_0}{c}$, (a, b, c panjara doimiylari) qandaydir butun son qiymatlarini beradi. Masalan, $2; 4; 1$. Endi bu sonlarning teskari qiymatlarini olib, $\frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{1}$ ularni shunday kichik butun songa bo'laylikki, chiqqan natijalar butun son shaklida ifodalansin. Masalan $\frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{1}$ (bularning hammasiga bo'linadigan eng kichik butun son 4 bo'ladi).

Bunda $(2; 4; 1)$ Miller indekslari hisoblanadi. Odatda ular (h, k, l) bilan belgilanadi. Bu Miller indekslari alohida yoki o'zaro parallel bo'lgan tekisliklar majmuasini ifoda etadi.



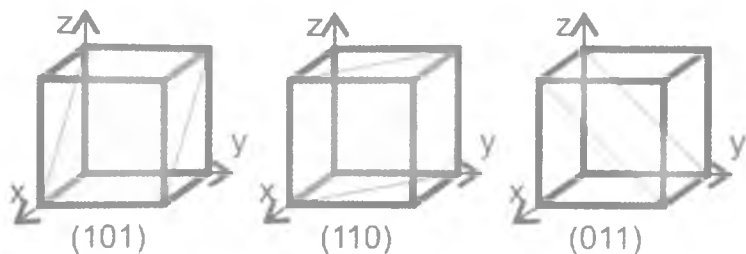
1.2-rasm. Miller indekslari

x o'qiga perpendikular bo'lgan tekisliklar $(1;0;0)$ belgisi bilan, y o'qida esa $(0;0;1)$ indekslari bilan ifodalanadi.



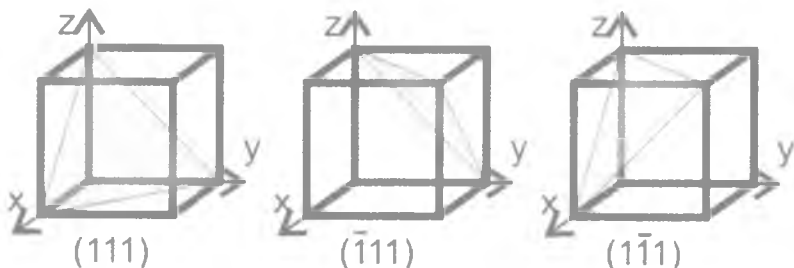
1.3-rasm. x , y va z o'qlariga perpendikular bo'lgan tekisliklar

Agar indeks $(1;1;0)$ bo'lsa, z o'qiga parallel ammo, x va y o'qlarini bir xil masofada kesgan tekisliklarni ifodalaydi. Xuddi shunday $(0;1;1)$ yoki $(1;0;1)$ tekisliklar ham mavjud bo'ladi.



1.4-rasm. Bitta o'qga parallel, qolgan o'qlarni bir xil masofada kesgan tekisliklarning ko'rinishi

Agar tekislik uchala koordinata o'qi x, y, z ni bir xil masofada kesgan bo'lsa, bunday tekislik $(1; 1; 1)$ bilan ifodalanadi.



1.5-rasm. Tekislik uchala koordinata o'qi x, y, z ni bir xil masofada kesgan tekisliklarning ko'rinishi

Agar tekisliklar koordinata o'qlarining manfiy tomonini kesgan bo'lsa, unda ularning indeksleri ustiga manfiy belgi qo'yiladi. Masalan, x o'qining manfiy qiymatini kesgan tekislik (h^-, k, l) yoki x, y, z o'qlarining manfiy qiymatlarini kesgan tekislik (h^-, k^-, l^-) deb belgilanadi.

Shunday qilib, Miller indekslari yoki belgilari kristall panjaradagi har xil tekisliklar joylashishini ko'rsatadi. Odatda kristall o'stirilayotganda oldindan qanday tekislik va yo'nalish bo'yicha o'stirishi aniqlanadi va shunga mos yo'nalishga ega bo'lgan diametri o'ta kichik monokristall (zatravka)dan foydalaniladi.

1.4. Teskari elementar panjara

To'g'ri elementar panjarani aks ettiruvchi asosiy vektorlar $\vec{a}$, $\vec{b}$, $\vec{c}$ bo'lib, bular asosida xohlagan kattalikdagi kristall panjarani hosil qilish mumkin. Buning uchun vektorlarni o'z yo'nalishlari bo'yicha ko'chirilganda hosil qilingan kristall panjara hajmi quyidagicha ifodalanadi:

$$V = n\vec{a} \cdot m\vec{b} \cdot d\vec{c} \quad (1.2)$$

Bu yerda. n, m, d – butun sonlar.

Kristallardagi elektronlarning energetik holatini to'laroq tasavvur qilish uchun hamda kristallarda rentgen nurlarining difraksiyasini chuqurroq tushunish uchun **teskari elementar panjara** tushunchasi kiritilgan.

Teskari panjaraning asosiy vektorlari quyidagicha aniqlanadi:

$$\vec{A} = 2\pi \frac{\vec{b} \times \vec{c}}{\vec{a} \cdot \vec{b} \times \vec{c}}; \quad \vec{B} = 2\pi \frac{\vec{a} \times \vec{c}}{\vec{b} \cdot \vec{a} \times \vec{c}};$$

$$\vec{C} = 2\pi \frac{\vec{a} \times \vec{b}}{\vec{c} \cdot \vec{a} \times \vec{b}} \quad (1.3)$$

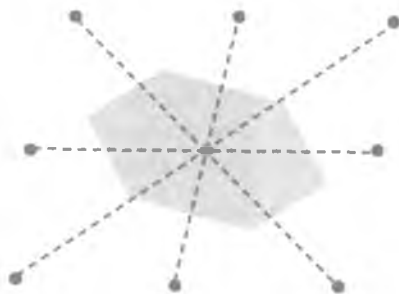
bundan ko'rinib turibdiki, teskari panjara vektorlari $\vec{A}$ va $\vec{B}$ esa $\vec{a}$ va $\vec{c}$ ga, $\vec{C}$ esa $\vec{a}$ va $\vec{b}$ larga perpendikulyar holda bo'ladi. Bunda teskari elementar panjara hajmi

$$V = \frac{(2\pi)^3}{V_{\text{to'g'ri}}} \quad (1.4)$$

ga teng.

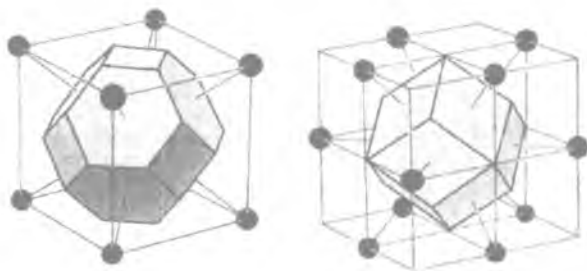
Agar biz tomonlari a ga teng bo'lgan kub kristall panjarani olsak, unga teskari panjara tomonlari (1.3) ifodaga asosan, $A = \frac{2\pi}{a}$ bo'ladi va bunday teskari panjara ham oddiy kub panjara bo'ladi.

Teskari elementar panjarani Vigner-Zeyts usuli bilan shakllantirish mumkin. Bunda Brave panjarasidagi ixtiyoriy tugundan to'g'ri chiziq orqali yaqin tugunlar birlashtiriladi. Undan so'ng bu chiziqlarni teng ikkiga bo'ladigan va ularga perpendikulyar chiziqlar o'tkaziladi. O'sha chiziqlar kesishgan yuzalarda hosil bo'lgan shakl **Vigner – Zeyts yacheykasi** deb ataladi.



1.6-rasm. Ikki yoqlama Brave panjarasi uchun Vigner – Zeyts yacheykasi

Teskari elementar panjara Brave panjarasidagi barcha simmetriya elementlarini o'z ichiga oladi. Shuning uchun ham teskari elementar panjara ichida elektron o'zining barcha energetik holatlariga ega bo'ladi va bu panjara bilan chegaralangan hajm birinchi **Brillyuen sohasi** deb ataladi.



a) b)

1.7-rasm. Vigner – Zeyts yacheykalari
(kesilgan (a) oktaedrik va (b) rombik dodekaedrik ko‘rinishi)

1.5. Qattiq jismlarda kimyoviy bog‘lanish

Qattiq jismlarni tashkil etgan atomlarni qanday kuchlar o‘zaro bog‘lab turadi, bu kuchlarning tabiati qanaqa? Qattiq jismlarda kimyoviy bog‘lanish tabiatiga ko‘ra, asosan, 4 xilga bo‘lishi mumkin: metall bog‘lanishlar, ion bog‘lanishlar, kovalent bog‘lanishlar va Van-der-Vaals bog‘lanishlar.

Kimyoviy bog‘lanishlarning tabiati shuni ko‘rsatadiki, qanday turdagi kimyoviy bog‘lanish bo‘lishidan qat‘iy nazar, qattiq jismni tashkil etgan atomlar kimyoviy bog‘lanish natijasida o‘zining tashqi elektron qobiqlarini elektron bilan to‘ldiradi, ya‘ni VIII guruh elementlari, inert gaz atomlari kabi bo‘ladi.

Metall bog‘lanish – asosan kristallda davriy joylashgan musbat ionlar bilan umumlashgan erkin valent elektronlari orasidagi o‘zaro elektrostatik ta‘sir kuchlaridan iborat bo‘ladi.

Masalan, eng yaxshi metallar Cu , Ag va Au ni oladigan bo‘lsak, ularning tashqi elektron qobiqlari $3d^{10}4s^1$, $4d^{10}5s^1$, $5d^{10}6s^1$, ya‘ni ularda d -elektron qobig‘i to‘lgan shuning uchun s^1 -elektronlar erkin holga o‘tib, elektron gazi yoki elektron bulutini hosil qiladi. Bunda

elektronlar konsentratsiyasi atomlar konsentratsiyasiga teng bo'lib, elektronlar metallarda yuqori elektr o'tkazuvchanlikni ta'minlaydi.

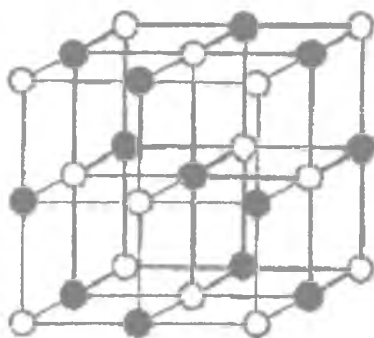


1.8-rasm. Metall bog'lanish

- – erkin elektronlar,
- ⊕ – kristall panjara tugunlarida joylashgan ionlar

Ion bog'lanishda – kristallni tashkil etgan atomlarning biri o'zining elektronlar bilan to'ldirish mumkin bo'lmagan tashqi valent elektronini ikkinchi atomga berish yo'li bilan musbat ionga aylanib, elektron qobig'ini to'ntaradi. Ikkinchi atom esa, olgan elektron hisobiga o'zining tashqi elektron qobig'ini to'ldiradi va manfiy ionga aylanadi.

Masalan, NaCl Na – atomining elektron qobig'i $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$, Cl– atomining elektron qobig'i $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5$. Demak, Na atomidan bitta elektron Cl atomiga o'tishi bilan Na atomi $1s^2 2s^2 2p^6$ va Cl da ham $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$ tashqi qobig'i to'lgan. NaCl kristallida manfiy va musbat ionlar ketma-ket joylashgan bo'ladi.

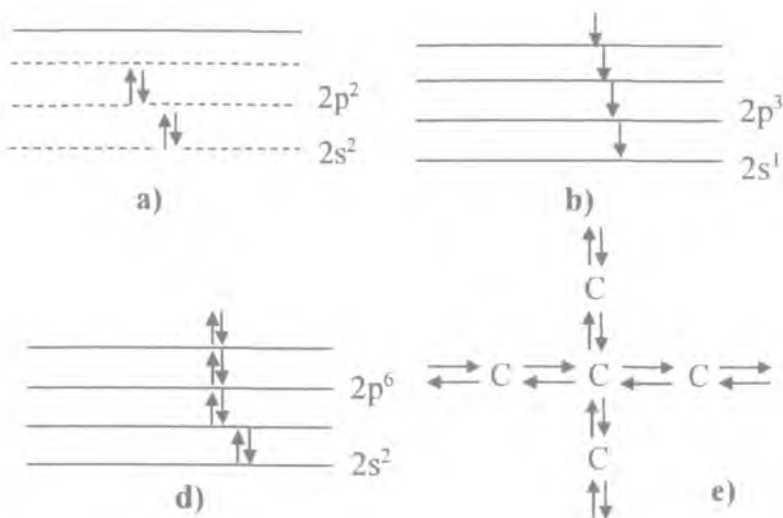


1.9-rasm. Ion
bog'lanish

- -Na (Natriy) ioni
○ -Cl (Xlor) ioni

Kovalent bog'lanish – buni gomopolyar bog'lanish deb ham atashadi. Bunday bog'lanishda kristaldagi qo'shni atomlar qarama-qarshi spinga ega bo'lgan valent elektronlar ikkita atom orasida umumiy bo'lishi bilan elektron qobiqlar to'ladi.

Elektronlar bunda bir atomdan ikkinchi atomga to'liq o'tmaganligi uchun bunday bog'lanishda musbat yoki manfiy ionlar hosil bo'lmaydi, hamma atomlar elektroneytral holda bo'ladi, valent elektronlar kimyoviy bog'lanishida qatnashadi va natijada erkin elektronlar paydo bo'lmaydi. Shuning uchun ham kovalent bog'lanishga ega bo'lgan kristallarning elektr o'tkazuvchanligi metallarga nisbatan juda kam bo'ladi. Misol uchun, uglerod atomlaridan tashkil topgan olmos kristalli kovalent bog'lanishning eng ideal turi hisoblanadi. Bunda uglerod atomlari alohida qaralganda uning tashqi elektron qobig'ida elektronlar $2s^2 2p^2$ holatda joylashgan bo'ladi (1.10-rasm, a), uglerod kristallida esa, kristall panjara potensial maydoni ta'sirida valent elektronlar boshqacha joylashadi (1.10-rasm, b).



1.10-rasm. Kovalent bog'lanish

Endi bu atom o'zining to'lmagan $2s$ va $2p$ sathlarida spinlari qarama-qarshi bo'lgan to'rt qo'shnisidan elektronlar olish yo'li bilan o'zining tashqi elektron qobig'idagi elektronlar sonini 8 taga yetkazadi, ya'ni $2s^2 2p^6$ (1.10-rasm, d) ko'rinishda bo'ladi. Bunday kovalent bog'lanishda qatnashayotgan barcha atomlarning tashqi elektron qobig'lari to'ladi va uglerod atomlarining barcha valent elektronlari kimyoviy bog'lanishda ishtirok etadi. Bunday bog'lanish kuchli bog'lanish bo'lishi bilan erkin elektronlar yo'qligi tufayli dielektrik xossasiga ega bo'ladi.

Van-der-Vaals bog'lanishlar boshqa bog'lanishlarga nisbatan o'ta kuchsiz bog'lanish bo'lib, bunday bog'lanish o'ta past haroratlarda va yuqori bosim ostidagi inert gaz atomlari hosil qilgan kristallarda yuzaga keladi. Bunda atomlardagi elektronlar o'ta kichik vaqt ichida o'z yadrosi bilan dipol hosil qilishi natijasida qolgan atomlarning polyarizatsiya qilinishiga va natijada atomlar o'zaro bog'lanib, kristall hosil bo'lishiga olib keladi.

Ma'lum kristallarning erish harorati

Element	He	Ar	Kr	Xe
Harorat T , K	24.5	83.8	115.9	161.2



1.11-rasm. Van-der-Vaals bog'lanish

1.6.Kristall panjara nuqsonlari

Kristall panjara nuqsonlari — bu kristallardagi atomlarning davriy va tartibli joylashishining buzilishidir.

Nuqsonlarni ularning geometrik o'lchovlariga ko'ra uch turga bo'lish mumkin: nuqtaviy, chiziqli va hajmiy.

Nuqtaviy nuqsonlarga geometrik o'lchovlari panjara doimiysidan uncha katta bo'lmagan nuqsonlar kiradi.

Nuqtaviy nuqsonlar o'z tabiatiga ko'ra yana bir necha xilga bo'linadi.

1. *Kristalldagi kirishma atomlari*, ya'ni kristall panjarani tashkil etgan asosiy atomlardan boshqa har qanday atomlar nuqsonidir. Chunki, o'zlarining atom radiusi va massasi bilan asosiy atomlardan farq qilgani uchun ular hatto panjaradagi asosiy atom o'rnini egallagan bo'lsa ham uning atom radiusi farqi tufayli panjara doimiysini o'zgartiradi, ya'ni davriylik buziladi.

Odatda eng toza metall kristallar (tozaligi 99.999 %) bo'lganda undagi kirishma atomlar soni kamida $10^{-3}\%$, ya'ni $(5 \div 10) \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}$ miqdorda bo'ladi.

2. *Vakansiya* – kristall panjara tugunidagi atomning bo'shab qolgan o'rnini. Har qanday haroratda (faqat $T=0\text{K}$ dan boshqa) atomlar kinetik energiyasi ($E_k=kT$) tufayli hamma vaqt o'z muvozanat holati atrofida tebranib turadi. Bunday atomlarning o'z o'rnidan ketib, tugunlar orasiga joylashishi hisobiga vakansiya paydo bo'ladi.

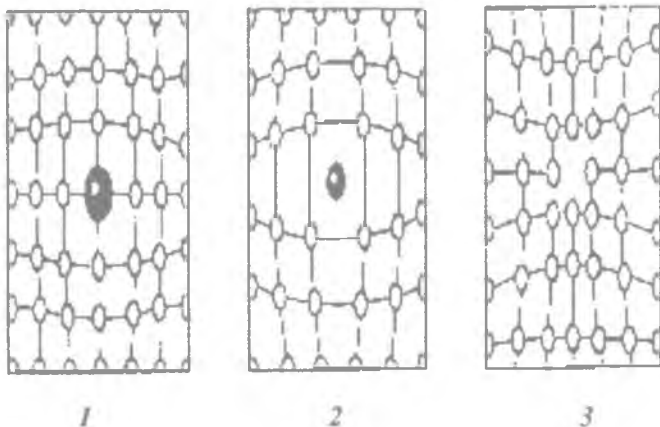
Bunday vakansiyalarning berilgan haroratdagi konsentratsiyasi

$$N_V = N_s \cdot e^{-\frac{E_V}{kT}} \quad (1.5)$$

ifoda bilan aniqlanadi. Bunda N_s – kristallardagi atomlar konsentratsiyasi, E_v – vakansiya paydo bo'lishi uchun kerak bo'lgan energiya. E_v ning qiymati kristallar tabiati, kimyoviy bog'lanishlar turiga qarab $E=1 \div 5 \text{ eV}$ atrofida bo'ladi. Ion kristalllarda (NaCl) vakansiyalar qaysi atom o'rniga paydo bo'lishiga qarab, ularning tabiati 2 xil bo'ladi, ya'ni anion vakansiyasi (musbat zaryadli) yoki kation vakansiya (manfiy zaryadli).

3. Kristallarga katta energiyaga ega bo'lgan radiatsion nur (α , β , γ)lar ta'sir qilganda ham nuqtaviy nuqsonlar hosil bo'ladi. Bunday nuqsonlar *radiatsion nuqsonlar* deb ataladi. Bunda energiyasi atomlarning kristalldagi bog'lanish energiyasidan juda katta bo'lgan elektron, neytron yoki γ nurlari atomlar bilan to'qnashib, ularni o'z joyidan chiqarib tashlaydi. Bunday atomlar tugunlar orasiga joylashishi mumkin. Natijada, vakansiya va tugunlararo atomlar paydo bo'ladi. Bular *birlamchi radiatsion nuqsonlar* deb ataladi. Radiatsiya ta'siri uzoq bo'lgan holatlarda vakansiya va tugunlararo atomlar konsentratsiyasi ko'payishi natijasida ular o'zaro uchrashib, divakansiya yoki ko'proq vakansiyalar to'planishi hisobiga *ikkilamchi radiatsion nuqsonlar*ni hosil qiladi.

Radiatsion nuqsonlarning turlari, konsentratsiyasi va kristalldagi taqsimoti radiatsion nurlarning energiyasi va kristallga ta'sir qilish vaqtiga bog'liq bo'ladi.

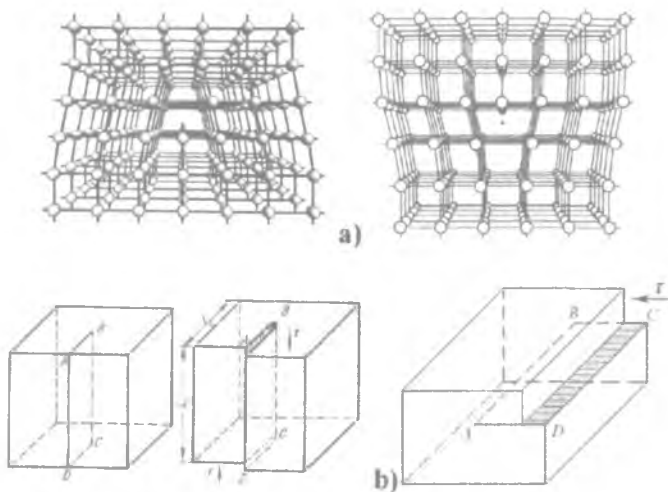


1.12-rasm. Nuqtaviy nuqsonlar: 1 – tugunlarning biriga va 2 – tugunlar oralig'iga begona atom joylashishi, 3 – vakant joy

Chiziqli nuqsonlar – kristall panjaraning bir chiziq bo'yicha buzilishidir (chiziq albatta to'g'ri chiziq bo'lishi shart emas). Chiziqli nuqsonlarning eni bir yoki bir necha panjara doimiysidan ortiq bo'lmagan holda, uzunligi butun kristall uzunligi bo'yicha bo'lishi ham mumkin. Bunday nuqsonlar **dislokatsiya** deb ataladi.

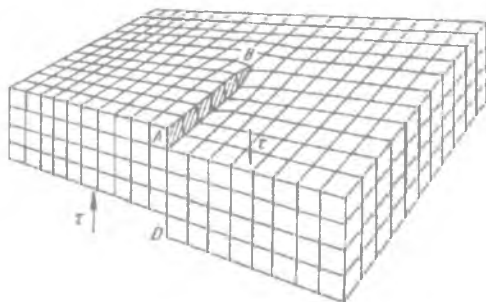
Dislokatsiyalar o'z tabiatiga ko'ra, 2 xil bo'lishi mumkin: *chegaraviy* va *buramali*.

Chegaraviy dislokatsiyalar ideal kristallning ma'lum bir yuzasiga deformatsiya ta'sir qilishda ustki kristall tekisligining ostki tekisligiga nisbatan siljiganligi hisobiga hosil bo'ladi.



1.13-rasm. Chiziqli nuqson: a – chegaraviy dislokatsiyaning kristall panjaradagi ko‘rinishi, b – chegaraviy dislokatsiyaning hosil bo‘lish sxemasi

Buramali dislokatsiya – kristallning bir qismini ikkinchi qismiga ko‘ra parallel, ammo qarama-qarshi kuch yo‘nalishi bo‘yicha deformatsiya qilingan holatda yuzaga keladi.



1.14-rasm. Chiziqli nuqson: buramali dislokatsiya. Bu yerda τ – siljish vektori.

Demak, buramali va chegaraviy dislokatsiyalar kristallarda bir tekislikning ikkinchi tekislikka nisbatan siljishidan hosil bo'ladi. Bunday siljish kuchlarining vektorlari chegaraviy dislokatsiyalarda perpendikulyar, buramali dislokatsiyalarda esa parallel bo'ladi. Deformatsiya vaqtida kristallning deformatsiyaga uchragan qismining deformatsiyaga uchramagan qismiga nisbatan siljishi natijasida yuzaga keladi, bu chiziqli dislokatsiya deb ataladi. Odatdagi kristallarda mavjud bo'lgan dislokatsiya zichligi $N=10^2 \div 10^4 \text{ sm}^{-2}$ ga to'g'ri keladi. Katta zichlikdagi dislokatsiya hosil qilish uchun kristallarni yuqori bosim bilan deformatsiya qilishga to'g'ri keladi. Dislokatsiyalar kristallarning mexanik mustahkamligini va boshqa xossalarini o'zgartiradi.

Hajmiy nuqsonlarga – asosan kristall ichida yuzaga keladigan kirishma atomlari klasterlari kiradi. *Klaster* – bu ma'lum konsentratsiyadagi kirishma atomlarining yoki nuqtaviy nuqsonlarning kristall panjarada ma'lum tuzilishga ega bo'lgan holatidir. Klasterlarda atomlar soni bir nechadan hatto milliontagacha bo'lishi mumkin.

Sinov savollari:

1. *Qattiq jism deb nimaga aytiladi?*
2. *Qattiq jismlar fizik xossalariga ko'ra qanday turlarga bo'linadi?*
3. *Kristall deganda nima tushuniladi?*
4. *Kristall panjara nima?*
5. *Kristallar tuzilishiga ko'ra necha turga bo'linadi?*
6. *Miller indeksi nima?*
7. *Koordinatsion son nima va u nimani ko'rsatadi?*
8. *Qattiq jismlar qanday kimyoviy bog'lanishlarga ega?*
9. *Kovalent bog'lanishning ion va metall bog'lanishlardan asosiy farqi?*
10. *Elementar va teskari elementar panjara nima?*

Qattiq jismlar mavzusiga doir masalalar:

1. Elementar kub panjaralar turlarini chizib ko'rsating.
2. Elementar kub panjaralar tugunlarida nechta atom joylashgan?

3. Oddiy kub elementar yacheyka panjarasida 1, 2, 3, 4, 5, 6 darajalik koordinatsion sonlarni aniqlang va chizib ko'rsating.

4. Oddiy kub elementar panjara doimiysi a bo'lsa, uning 3, 5, 6 koordinatsion sonlariga mos masofalarni aniqlang.

5. Nikel moddasining kristall panjarasi tomonlari markazlashgan kub panjaradan iborat. Agar 1 gramm nikel kristallini oladigan bo'lsak, unda qancha atom va qancha oddiy (elementar) panjara mavjud?

6. Osh tuzining kristall panjarasi oddiy elementar kub panjaralardan tashkil topgan. Bunday panjaraning doimiysi $a=4,3 \text{ \AA}$, bo'lsa, 1 gramm osh tuzi kristallida qancha Na va Cl atomi bor va unda qancha elementar panjara mavjud?

7. Agar 1 gramm osh tuzidagi kristall panjaraning elementar panjaralari bitta chiziq bo'yicha terib chiqilsa, qanday masofani egallaydi ($a=4,3 \text{ \AA}$)?

8. Agar kremniy kristallining doimiysi $a=5,4 \text{ \AA}$ bo'lsa, 1 sm^{-3} kremniy kristallida qancha elementar panjara bor?

9. Li hajmi markazlashgan kub kristall panjarasiga ega. Unda 10 gramm Li kristallida qancha elementar panjara mavjud va qancha Li atomi joylashgan?

10. Atomlar soni $5 \cdot 10^{22} \text{ sm}^{-3}$ ga teng bo'lgan uchta har xil kristall mavjud. Bular oddiy, hajmiy va tomonlari markazlashgan kub elementar panjaralardan tuzilgan. Bulardagi elementar panjara sonini aniqlang?

Kristall panjaralar, elementar kristall panjaralarga doir masalalarning yechilishi:

1. Masalaning berilishi. Agar kremniy kristallining doimiysi $a=5,4 \text{ \AA}$ bo'lsa, 1 sm^{-3} kremniy kristallida nechta elementar panjara bor?

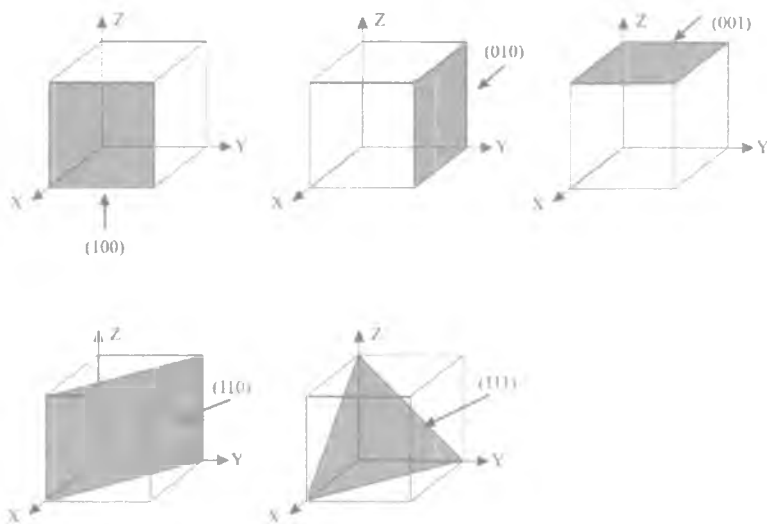
Masalaning yechilishi: berilgan $a=5,4 \text{ \AA}$, topish kerak 1 sm^{-3} kremniy kristallida qancha elementar panjara borligini. Bu holatda kristall panjara doimiysi $a=5,4 \text{ \AA}$ ga yoki $a=5,4 \cdot 10^{-8} \text{ sm}$ ga tengligi va panjara kubdan iborat bo'lganligidan bitta kub yacheykaning hajmini tashkil qilishini topamiz.

$V_{ya} = a^3 = (5,4 \cdot 10^{-8} \text{ sm})^3 = 1,57 \cdot 10^{-22} \text{ sm}^{-3}$ ga tengligini hosil qilamiz.

Bundan 1 sm^{-3} kristallda elementar panjaralar sonini quyidagi ifoda orqali aniqlaymiz.

$$N_{\text{ya}} = \frac{V}{V_{\text{ya}}} = \frac{1}{1,57 \cdot 10^{-22}} = 0,63 \cdot 10^{22} = 6,3 \cdot 10^{21}$$

Demak, kristall panjara doimiysi $a=5,4 \text{ \AA}$ ga teng bo'lgan elementar kub panjaradan tuzilgan 1 sm^{-3} kremniy kristall panjarasidagi elementar panjaralar soni $N_{\text{ep}} = 6,3 \cdot 10^{21}$ tani tashkil etar ekan.



1.15-rasm.

2. Masalaning berilishi. Miller indekslari nima? $[100]$, $[010]$, $[001]$, $[110]$, $[111]$ kristall tekisliklarini kub elementar panjaralari yordamida chizib ko'rsating.

Kristallda atomlar joylashgan yuzani aks ettiruvchi tekisliklar o'z tabiatiga qarab kristall panjaraning har xil koordinatalarda kesishini ifodalaydigan kattalik Miller indekslari orqali amalga oshiriladi.

Miller indeksini topish uchun fazo o'qlarini tekislik kesgan nuqtalar a, b, c kesmalarning teskari miqdorlari, ya'ni $\frac{1}{a} = h$, $\frac{1}{b} = k$, $\frac{1}{c} = l$ olinib, ular umumiy maxrajga keltiriladi va maxraj tashlab yuboriladi. Miller indekslari $(h\ k\ l)$ harflari bilan belgilanadi.

Agar kristall panjaralar $[100]$, $[010]$, $[001]$, $[110]$, $[111]$ tekisliklarida kesishsa, ularning fazodagi holati 1.15-rasmda ko'rsatilgandek ko'rinishga ega bo'ladi.

2. QATTIQ JISMLARDA ELEKTRONLARNING ENERGETIK HOLATLARI

2.1. Elektronlarning atomlardagi energetik holatlari

Atom yadro va uning atrofida har xil energetik holatlarda bo'lgan elektronlardan iborat.

Atom yadrosi – protonlar, ya'ni musbat zaryadga ega ($1.6 \cdot 10^{-19}$ K) massasi elektron massasidan 1836 marta ($m_p = 1.67 \cdot 10^{-27}$ kg) katta va radiusi $6 \cdot 10^{-13}$ sm. ga teng hamda **neytronlar**, ya'ni zaryadga ega bo'lmagan massasi elektron massasidan 1839 marta katta va radiusi proton radiusiga teng elementar zarralardan tarkib topgan.

Elektronlar manfiy zaryadga ega bo'lib ($1.6 \cdot 10^{-19}$ K), massasi $m_e = 9.11 \cdot 10^{-28}$ g, radiusi 10^{-12} sm. ga va magnit momenti $\mu = 9.2731 \cdot 10^{-21}$ erg/Gauss ga teng elementar zarrachadir.

Atom elementar zarrachalarga qaraganda ancha katta o'lchamdagi, ya'ni radiusi $\sim 10^{-8}$ sm ga teng bo'lgan zarrachadir. Bundan ko'rinish turibdiki, yadro va elektronlarning hajmi atom hajmining juda kichik qismini, ya'ni 10^{-12} qismini tashkil etadi. Demak, protonlar, neytronlar va elektronlarga nisbatan atom juda katta bo'shliqqa egadir. Atomlardagi elektronlarning energetik holatlari 4 kvant son, ya'ni **bosh kvant son (n)**, **orbital kvant son (l)**, **magnit kvant soni (m)** va **spin kvant soni (s)** bilan aniqlanadi.

Bosh kvant son (n) ning qiymati atomdagi elektronlarning energetik qobiqlari sonini ko'rsatishi bilan birga, energetik qobiqlarda joylashishi mumkin bo'lgan maksimum elektronlar soni $N = 2n^2$ ga teng bo'ladi.

Shu bilan birga N₂ Bor taklif etgan atomning planetar modeliga asosan, (bu model ikki postulatdan iborat):

1-postulat: elektron atom atrofida xohlagan emas, balki aniq statsionar holatlar bo'yicha elektromagnit to'lqinlarni chiqarmasdan harakatda bo'ladi va ularning energiyasi:

$$E = \frac{m \cdot e^4}{32 \cdot \pi^2 \cdot h^2 \epsilon_0} \cdot \frac{1}{n} \quad (2.1)$$

bilan aniqlanadi. Bunda m —elektron massasi, h — Plank doimiysi, n — bosh kvant son ($n=1,2,\dots$), $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m.

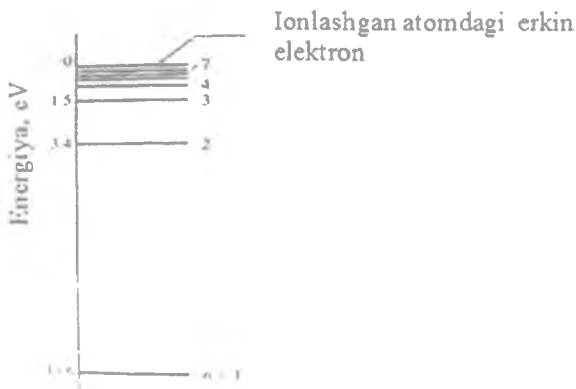
2 – postulat: elektron bir statsionar energetik holatdan ikkinchisiga o'tishi uchun energetik sathlarning ayirmasiga teng energiyani yutishi yoki chiqarishi kerak.

$$h\nu = E_1 - E_2 \quad (2.2)$$

Bunda, $h\nu$ – fotonning energiyasi, ν – chastota.

Demak, bosh kvant soni energetik qobiqlar sonini, ularda joylashishi mumkin bo'lgan maksimum elektronlar miqdorini va ularning energiyasini aniqlab berar ekan. (2.1) formuladan ko'rinib turibdiki, elektronlarning energiyasi xohlagan qiymatga ega emas, balki n — qiymatiga mos aniq qiymatlarga ega bo'lar ekan, ya'ni ularning qiymatlari diskret qiymatlarga ega bo'ladi. (2.1) formulaga asosan, vodorod atomidagi elektronlar energiyasi hisoblanganda $E_1=13.6$ eV ga teng bo'ladi. 2.1-rasmda elektronlarning energetik sathlarida bosh kvant sonining o'zgarishi ko'rsatilgan. Rasmdan ko'rinib turibdiki, n ning qiymati oshgani sari energetik sathlar

orasidagi energiyalar farqi kamayib boradi va ular oralig'ida elektronlarning joylashishi taqiqlangan sohalar mavjud bo'ladi.



2.1-rasm. Elektronning energetik sathlarida bosh kvant sonining o'zgarishi

Fizikada birinchi elektron orbitani $K(n=1)$, ikkinchisini L , uchinchisini M , to'rtinchisini N va qolganlarini O, P, Q harflari bilan belgilash qabul qilingan.

Orbital kvant son(l) – bu elektron harakat miqdorining momentini ko'rsatadi, uning qiymati $l=(n-1)$ ga teng bo'lib, n -qiymatiga qarab ($n=1, 2, \dots$) $l=0, 1, 2, \dots$ larni qabul qiladi.

Magnit kvant soni(m) qiymati $m=\pm l$ bo'lib, uning fizik ma'nosi harakat miqdori momentining magnit maydoniga nisbatan proyeksiyasini ko'rsatadi. Demak, berilgan n va l qiymatlarida m ga qiymatlari elektron orbitalarning fazadagi har xil yo'nalishlarini ko'rsatadi. Agar $l=1$ teng bo'lsa, $m=-1, 0, 1$. Agar $l=2$ bo'lganda, $m=-2, -1, 0, 1, 2$ qiymatlarga ega bo'ladi. Bundan kelib chiqadiki, berilgan l – qiymatida harakat miqdori momentining berilgan o'qqa nisbatan yo'nalishi $2l+1$ ga teng bo'ladi.

Spin kvant soni(s)– bu elektronning o‘z o‘qi atrofida aylanishidagi harakat miqdori momentini ko‘rsatadi va uning qiymati $s = \pm 1/2$ ga teng. Demak, m ning har bir qiymatiga s ning ikkita qiymati to‘g‘ri kelishi mumkinligidan, berilgan l ning qiymatida elektronning $2(2l+1)$ energetik holati mavjud bo‘lar ekan.

Elektronlarning atomdagi energetik holati 4 ta kvant soni

$$\begin{aligned} n &= 1.2.3... \\ l &= (n-1) = 0.1.2.3... \\ m &= \pm l = (-l+1), (-l+2) \\ s &= -1/2, +1/2 \end{aligned}$$

bilan aniqlansa-da, Pauli prinsipini hisobga olmasdan, elektronlarning atom atrofida joylashishi to‘g‘risida to‘la tasavvur qilib bo‘lmaydi.

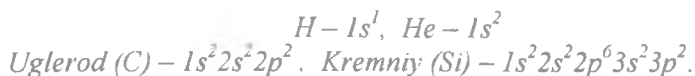
Pauli prinsipi – har qanday energetik sathda 4 ta kvant soni bir xil bo‘lgan 2 ta elektron joylashishi mumkin emas, deb ko‘rsatadi yoki buni shunday tushuntirish ham mumkin: har qanday energetik sathda spinlari qarama-qarshi bo‘lgan 2 ta elektron joylashishi mumkin.

Bunga ko‘ra $n=1$ elektron orbitada spinlari $+1/2$ yoki $-1/2$ ikkita elektron joylashishi mumkin. Bunday energetik holatni $n=1, l=0, 1s$ energetik holat deb belgilash qabul qilingan. Agar $n=2$ bo‘lsa, $l=1$ ga teng, bunday orbitada maksimal $N = 2n^2 = 8$ elektron bo‘lishi mumkin, ammo Pauli prinsipiga asosan bunday orbita ikkita elektron joylashadigan to‘rtta orbita qobiqlariga ajraladi va $l=1$ energetik holatni p deb belgilanadi hamda $l=1$ $2s2p^6$, p – holat ham o‘z navbatida 3 ta qobiqqa ajraladi. $n=3$ $l=2$ elektron holat d bilan ifodalaniladi, bular ham o‘z navbatida Pauli prinsipiga asosan 5 ta qobiqqa ajraladi.

Elektron sathlarni belgilash quyidagicha bo‘ladi:

$l = 0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5$ larga mos quyidagicha belgilanadi: $s \ p \ d \ f \ g \ h$
qobiqlar

Bularga asosan, atomlarning elektron tuzilishi quyidagicha ifodalaniladi:



2.2. Qattiq jismlarda elektronlarning energetik holati

Yuqorida alohida joylashgan atomlarda elektronlarning energetik qobiqlari va sathlaridagi taqsimotini ko'rib chiqdik. Endi mana shu atomlar ishtirokida tashkil topgan qattiq jism kristallarida elektronlarning energetik joylashish taqsimotini ko'rib chiqamiz. Bunday holatda kristallni tashkil etgan atomlar o'rtasidagi masofa (**panjara doimiysi** – masalan, kremniyda $d=5,4\text{\AA}$) juda kichik bo'ladi. Endi atomlar yadrolarining har bir atomga tegishli elektronlarning barcha yadro va barcha elektronlarga o'zaro ta'sirini, elektronlarning energetik sathlari va ulardagi taqsimotiga ta'sir qilmasdan iloji yo'q.

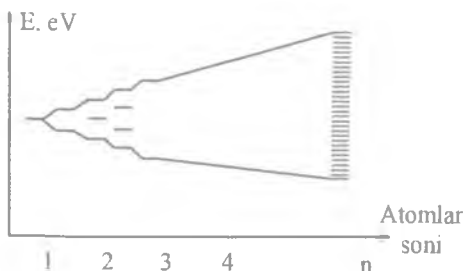


2.2-rasm. Ikkita atomning bir-biriga o'zaro yaqinlashtirilgandagi holati

Buni aniqroq tasavvur qilish uchun ikkita bir xil atomni bir – biriga shunday yaqinlashtiraylikki, ular orasidagi masofa kristall panjara doimiysiga yaqinlashsin. Bu holda ikkita atomning tashqi elektron qobiqlari bir-biriga kirishib ketadi. Natijada, birinchi atomning elektronlari bemalol ikkinchi atomning elektron qobiqlariga hech qanday energiya sarflamasdan o'ta boshlaydi. Go'yoki ikkala atomda tashqi elektronlar uchun umumiy elektron qobiq paydo

bo'ladi. Ammo bu elektron qobiqda endi to'rtta elektron bo'lib qolgani uchun Pauli prinsipiga asosan (har qanday energetik sathda spinlari bir-biriga qarama-qarshi bo'lgan ikkitadan ortiq elektron joylashishi mumkin emas) umumiy elektron sath energiyalari bir-biridan juda kam farq qiladigan ikkita energetik sathga ajraladi.

Endi o'n ta atomni o'zaro yaqin joylashtiraylik. Bu holatda o'n ta atomning tashqi elektron qobiqlari umumiy bo'lib qoladi va ular shunga mos holda o'n ta mayda energetik sathlarga ajraladi. Demak, yagona atomdagi elektronlarning bir xil energetik sathlari o'rniga joylashgan atomlar soniga mos mayda qobiqlarga ajralgan umumiy energetik sath paydo bo'ladi (2.3-rasm).

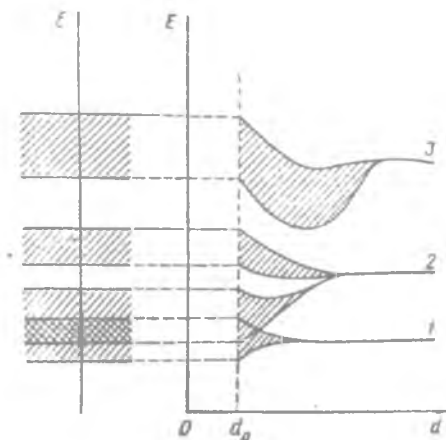


2.3- rasm. O'zaro yaqinlashtirilgan bir nechta atomning energetik sathlarga ajralishi

Kristalda hajm birligida o'rtacha $N \sim 5 \cdot 10^{22} \text{sm}^{-3}$ ta atom joylashgan bo'lsa, ularning elektron qobiqlari bir-biriga kirishish oqibatida atomdagi elektron joylashgan bitta elektron qobiq o'rniga taxminan $5 \div 10 \text{ eV}$, $N = 5 \cdot 10^{22}$ mayda qobiqlar joylashadi, ya'ni har biriga ikkitadan elektron joylashishi mumkin bo'lgan energetik sathlar majmuasi yoki sohasi paydo bo'ladi. Bu energetik sathlar orasidagi farq

$$\Delta E = \frac{(5 + 10) \text{ eV}}{5 \cdot 10^{22}} = (1 + 2) 10^{-22} \text{ eV} \quad (2.3)$$

O'ta kichik qiymatdan iborat bo'lgan energetik sathlar majmuasi bo'ladi. Shuning uchun bu soha ichida elektronlarning energiyasi uzluksiz o'zgaradi, deb aytish mumkin. Xuddi shunday hol atomlarning boshqa ichki qobiqlarida ham yuz beradi. Ammo ularning o'zaro kirishish holati tashqi qobiqlarga nisbatan kamroq bo'ladi. Shunga mos holda hosil bo'lgan energetik sath joylashgan energiya oralig'i kamayib boradi.



2.4-rasm. Atomlardagi diskret energetik sathlarning kristall hosil qilinganda energetik sohalarga aylanishi: 1, 2, 3 – diskret energetik sathlar; d – atomlar orasidagi masofa, d_0 – kristalldagi atomlar orasidagi masofa, E – energiya

Demak, alohida atomda mavjud bo'lgan elektron qobiqlar o'rniga kristallda $\sim 10^{22}$ ga teng, o'ta zich joylashgan energetik sathlarni o'z ichiga olgan energetik sathlar paydo bo'ladi. Bu energetik sohalar orasida elektron joylashishi mumkin bo'lmagan – taqiqlangan sohalar ham yuzaga keladi. Quyidagi 2.4-rasmda *Si* atomining tashqi elektron sathlari o'rniga, *Si* kristalldagi hosil bo'ladigan energetik sohalar keltirilgan. Bulardan bilish mumkinki, agar alohida atomning har bir elektron qobig'ida ma'lum miqdordagi elektronlar harakatda

bo'ladigan bo'lsa, bu atomlar tashkil qilgan kristallda o'sha aniq elektron qobiqlari o'rniga kristall uchun yagona energetik sohalar hosil bo'ladi. Bu soha ichida kristallni tashkil etgan atomlar sonidan ikki marta ko'p elektronlar joylashishi mumkin.

Elektronlarning kristalldagi energetik sathlari energetik sohalaridan iborat bo'lib, har bir energetik soha bir-biridan taqiqlangan sohalar bilan ajralib turadi. Xuddi atomdagidek har bir energetik sohaning kengligi (eV hisobida) shu energetik sohani hosil qilgan atomdagi elektron qobiqlarining yadrodan qanchalik uzoqda joylashishiga bog'liq bo'ladi. Atomning elektronlar bilan to'lgan qobiqlari asosida hosil bo'lgan energetik sathlarning har bir sathida qarama-qarshi spinga ega bo'lgan ikkita elektron bor bo'lib, tashqi maydon qo'yilganda ularning siljishi mumkin bo'lmaganligi uchun, ular tok o'tkazishda ishtirok eta olmaydi. Shuning uchun qattiq jismni tashkil etgan atomlar valent elektronlari joylashgan elektron qobiqlari asosida hosil bo'ladigan energetik sohalar shu qattiq jismning tabiati, ya'ni uning elektr o'tkazuvchanlik xususiyatini aniqlaydi. Bunda uchta holat yuz beradi:

Birinchi holda valent elektronlar hosil qilgan energetik sathlar to'lmagan bo'ladi. Bu faqat toq valent elektronlarga ega bo'lgan atomlar (*Cu, Ag, Au* ishqoriy metallar...) ga xosdir. Bunday energetik sathning yarmi elektronlar bilan to'lgan, yarmi esa bo'sh bo'lib, tashqi elektr maydon qo'yilganda, elektronlar o'zlarining kinetik issiqlik energiya ($E = kT$) lari hisobiga band energetik sathlardan bo'shlariga o'tib, elektr tokini o'tkazishda qatnashadi.

Yuqorida keltirilgandek, hosil bo'lgan energetik sohada energetik sathlar energiyalarining farqi juda kichik, ya'ni $\Delta E = 10^{-22}$ eV ga teng, bu esa hatto eng past harorat ($T = 1K$) holatidagi issiqlik energiyasi ($E = kT = 8,8 \cdot 10^{-3}$ eV) dan ham o'ta kichikdir. Bunday tashqi energetik sathga ega bo'lgan qattiq jismlar tokni juda yaxshi o'tkazadi va ular **metallar** deyiladi.

Juda ko'p metallarda valent energetik soha keyingi bo'sh o'tkazuvchanlik sohasi bilan qo'shilgan bo'ladi.

Ikkinchi holatda valent elektronlar hosil qilgan energetik soha elektronlar bilan to'la band bo'ladi. Bu holatda tashqi valent elektronlar juft bo'lgan atomlarga, masalan Si ($1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$) tegishli bo'ladi. Agar bunday atomlarda elektron bilan band bo'lgan sohadan keyingi elektronlardan bo'sh bo'lgan energetik soha orasidagi energiya farqi, ya'ni taqiqlangan soha kengligi $\Delta E_g < 3eV$ bilan ajralib tursa, bu materialga tashqaridan elektr maydoni qo'yilganda elektronlar faqat valent energetik sohasidan keyingi sohaga ΔE_g ni yengib o'tgandagina o'tkazuvchanlikka qatnashishi mumkin bo'ladi. Endi valent elektronlarining bir sekundda keyingi bo'sh energetik sathga o'tish ehtimoli:

$$P = a \cdot N_C \cdot N_V e^{-\frac{\Delta E}{kT}} \quad (2.4)$$

ga teng bo'ladi. Bunda, N_C – o'tkazuvchanlik sohasidagi energetik holatlar zichligi, N_V – valent sohasidagi energetik holatlar zichligi, a – kristall tabiatiga mos kattalik.

Demak, ΔE_g qancha katta bo'lsa, ehtimollik shuncha kam, harorat qancha katta bo'lsa, ehtimollik eksponensial qonun bilan ortar ekan. Bunday qattiq jismlarda o'tkazuvchanlik qiymati faqat ΔE_g ga bog'liq bo'ladi. Agar $\Delta E_g \leq 3eV$ bo'lsa, xona haroratida ma'lum miqdordagi elektronlar keyingi bo'sh sohaga o'tib, o'tkazuvchanlikda qatnashadi. Bunday qattiq jismlar **yarim-o'tkazgichlar** deb qabul qilingan. Albatta, bunday materiallarda o'tkazuvchanlik metallarnikiga nisbatan juda kam bo'ladi.

Uchinchi holat, agar $\Delta E_g > 3eV$ bo'lgan holatda xona harorati va undan yuqori haroratlarda ham elektronlarning valent sohasidan bo'sh energetik sohaga o'tish ehtimoli juda kamayib ketadi, shunga mos ularda o'tkazuvchanligi juda kichik bo'ladi. Bunday materiallar **dielektriklar** deyiladi.

Demak, valent elektronlarni hosil qilgan energetik sohani **valent soha**, undan keyingi bo'sh soha **o'tkazuvchanlik sohasi** deyiladi.

Yuqorida, hosil bo'ladigan energetik sohalar va ular orasidagi taqiqlangan sohalar qiymatlari kristallni tashkil qilayotgan atomlardagi tashqi elektron (valent elektron) larining atom yadrosiga nisbatan joylashishiga bog'liq bo'ladi. Buning isboti sifatida *IV* guruh elementlarini keltirish mumkin. Quyidagi 2.1-jadvalda bunday atomlardagi elektronlarning joylashishi keltirilgan. Ularning barchasini tashqi elektron qobig'ida to'rttadan elektron s^2p^2 joylashgan va ular bir xil kimyoviy bog'lanishga ega, qanday kritall panjara bo'lishidan qat'iy nazar, ularning taqiqlangan energetik sohalar qiymatlari bir-biridan keskin farq qiladi.

2.1-jadval

IV guruh elementlarining tashqi elektron qobiqlaridagi elektronlar strukturasi va taqiqlangan soha energiyasining qiymati

Element	Elektron strukturasi	E_g , eV	Kristall panjara
C	$1s^2 2s^2 2p^2$	5,47	Olmos
Si	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$	1,12	Olmos
Ge	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^2$	0,67	Olmos
Sn	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^2$	0,08	Olmos
Pb	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^6 4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^2$	0	Olmos

Shunga mos holda uglerod atomlaridan tashkil topgan olmos kristalli juda yaxshi dielektrik ($\Delta E_g=5,6\text{eV}$), *Si* ($\Delta E_g=1,12\text{eV}$) va *Ge* ($\Delta E_g=0,67\text{eV}$)lar yarimo'tkazgichlar, *Sn* ($\Delta E_g=0,018\text{eV}$) va *Pb* lar esa xona haroratida metal xususiyatiga ega bo'ladi.

Demak, kristallarda elektronlarning energetik sathlari energetik sohalariga ega bo'lib. bunda elektronlar bilan to'la band bo'lgan ichki elektronni energetik sohalaridagi elektronlarning o'tkazuvchanlikka yoki umuman, shu qattiq jismning fizik xossalariga ta'siri bo'lmas ekan. Bunda atomning tashqi valent elektronlari asosida hosil bo'lgan valent energetik sohasi ularning elektronlar bilan bandligi hamda

undan keyingi bo'sh energetik soha bilan qanday kenglikdagi taqiqlangan energetik soha bilan ajralib turishi bilan aniqlanar ekan.

Kvant fizikasidan ma'lumki, elementar zarrachalar, shu jumladan, elektron ham zarracha ham to'liq xossasiga ega. Demak, elementar zarrachalarning o'z energiyasiga $E=h\nu$, impulsiga $p=k\hbar$, to'liq uzunligiga $\lambda=2\pi/k$ va tebranish chastotasiga $\nu=1/\lambda$ ega bo'ladi. Bunda k – to'liq vektori bo'lib, $k=2\pi/\lambda$ ga teng.

De-Broyl nazariyasiga asosan, elementar zarrachalarning energiyasi va to'liq uzunligi o'rtasidagi bog'lanish quyidagi ifoda bilan yoziladi:

$$E = \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2m\lambda^2} \quad (2.5)$$

ga teng bo'ladi.

$$\lambda_D = \frac{\hbar^2}{\sqrt{2mE}} \quad (2.6)$$

λ_D – de-Broyl to'liq uzunligi deyiladi. Ushbu ifodadan ko'rinib turibdiki, elementar zarracha massasi m va energiyasi E qancha katta bo'lsa, uning to'liq uzunligi shuncha kichik bo'ladi. Demak, elektronning holati endi uning to'liq funksiyasi $\varphi(r)$ bilan aniqlanadi va shunga mos holda elektronning to'la harakati Shredinger tenglamasi bilan ifodalanadi:

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V_o(r) \right] \varphi(r) = E\varphi(r)$$

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2.7)$$

Bunda $-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta$ – Laplas operatori, $V_o(r)$ – elektronning potensial energiyasi, $\vec{r}$ vektori, E – elektronning to'la energiyasi.

Tenglamani elektron potensial energiyasining $v_o(r)$ – berilgan holati va turiga qarab $\varphi(r)$ aniqlash mumkin. Ammo elektronning kristall panjaradagi holati, uning yakka atomdagi holatidan tubdan farq qiladi. Chunki elektronga o'zining yadrosidan tashqari barcha qo'shni atomlar yadrolari ham ta'sir qiladi. Yadrolarning o'zaro ta'siri kristall panjarasidagi barcha elektronlarning ta'siri va shu elektronlarning o'zaro ta'siri kristalldagi elektronning potensial energiyasini aniqlaydi:

$$-\frac{h^2}{2m} \sum_i \frac{\partial^2}{\partial r_i^2} - \frac{h^2}{2M_j} \sum_j \frac{\partial^2}{\partial R_j^2} + \sum_{i=n} \frac{Z_j Z_n e^2}{R_{jn}} + \frac{1}{Z} \sum_{i \neq k} \frac{e^2}{r_{ik}} - \sum_{ikj} \frac{Z_i e^2}{r_{ij}} \\ \varphi(r_i, R_j) = E \cdot \varphi(r_i, R_j) \quad (2.8)$$

Bunda: m – elektronning massasi, i, j – elektron va yadroning radius vektorlari, z_i, z_n – yadroning atomlar soni, R_{jn}, r_{ik}, r_{ij} – berilgan elektron va yadrolar orasidagi masofa, ϵ – to'la energiya, φ – elektronning xususiy funksiyasi. Bundan $\varphi(r)$ kristalldagi barcha atomlarning yadrolarini (uzoq, yaqin) barcha elektronlarga ta'sirlashishi natijasida vujudga keladigan o'ta murakkab funksiyaga aylanadi. Agar Si kristallida 1 sm^3 da $5 \cdot 10^{22}$ ta atom bo'ladigan bo'lsa, bu atomlarni yadrolarining barchasi ta'sirini ularning koordinatlariga qarab hisoblab chiqish juda murakkab bo'ladi. Shuning uchun bu masalani yechishda *adiabatik yaqinlashuv* tadbiriq etiladi. Bu yaqinlashuvning mohiyati shundan iboratki:

1. Elektronlarga nisbatan atom yadrolarining harakati o'z o'rnida qo'zg'almas, deb qaraladi. Bunga sabab hatto eng kichik yadrodan iborat bo'lgan vodorod atomining yadrosi ham elektron massasidan 1836 marta katta bo'lgani va berilgan haroratda yadro hamda elektronlar kinetik energiyasi bir xil kT ga teng bo'lganligi uchun ularning harakat tezligi elektron harakat tezligidan juda kichikligi kelib chiqadi, ya'ni yadroni qo'zg'almas va uning kinetik energiyasini nolga teng deb qarash mumkin. Elektron va yadroning o'zaro tezliklari quyidagicha ifodalanadi:

$$E = kT = \frac{mv^2}{2} \quad v_e = \sqrt{\frac{E}{m_e}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_e}} \quad (2.9)$$

$$v_{yadro} = \sqrt{\frac{2kT}{m_{yadro}}} \text{ Demak, } v_e \gg v_{yadro}$$

2. Kristallda elektron va yadrolarning harakati umuman bir-biriga bog'liq emas va ular o'rtasida hech qanday energiya almashinuvi bo'lmaydi, ya'ni elektron energiyasini o'zgartirmaydi. Demak, elektronlarning harakati yadrolar hosil qilgan umumiy maydon asosida yuz bergan holda yadrolarning koordinatasi elektronning kinetik va potensial energiyalariga bog'liq bo'lmaydi. Unda (2.8) tenglamani elektron uchun quyidagicha yozish mumkin bo'ladi:

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \sum_i \frac{\partial^2}{\partial r_i^2} + \frac{1}{Z} \sum_{l \neq k} \frac{e^2}{r_{lk}} - \sum_{lkj} \frac{Z_l e^2}{r_{lj}} \right] \varphi(r_l, R_j) =$$

$$= \varepsilon \varphi(r_l, R_j) \quad (2.10)$$

Ammo bu tenglama ko'rilayotgan elektronning barcha elektronlar bilan o'zaro ta'sirlashish holatini ifodalovchi potensial energiya qismiga ega bo'lgani uchun uni yechish mumkin. Shuning uchun *bir elektron yaqinlashuv* usulini ko'ramiz. Buning mohiyati – kristallda elektronlarning o'zaro bir-biri bilan ta'sirlashishi o'rniga ko'rilayotgan elektronni boshqa barcha elektronlar tomonidan hosil qilingan o'rtacha elektr maydon ta'siriga almashtiramiz. Bunda kristalldagi barcha elektronlar yagona yangi effektiv zaryadga ega “zarracha” ta'sirida bo'lib, ko'rilayotgan elektronning harakat holati mana shu zarracha hosil qilgan maydon ta'sirida deb qarash mumkin bo'ladi. Bunday yaqinlashish kristallarda barcha va har xil koordinatsion vektorlarga ega bo'lgan elektronlar o'zaro cheksiz miqdordagi ta'sirlashuvni ko'p elektronlik ta'sirlashish muammosidan

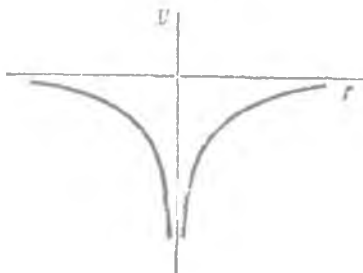
qutilishga olib keladi. Endi kristalldagi elektron uchun Shredinger tenglamasi quyidagicha yoziladi:

$$\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \varphi(r)}{dr^2} - [V(r) + \Omega(r)] \varphi(r) = E \varphi(r) \quad (2.11)$$

Demak, $V(r)$ –ko‘rilayotgan elektronning harakatsiz ionlar hosil qilgan maydondagi ta’sirlashuv potentsiali, $\Omega(r)$ – shu elektronning barcha elektronlar hosil qilgan maydon bilan ta’sirlashishi potentsial energiyasidir:

$$V(r) + \Omega(r) = U(r) \quad (2.12)$$

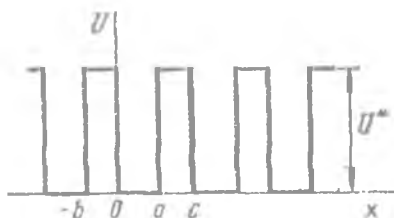
Ifodadan kristalldagi elektron uchun Shredinger tenglamasi yuqoridagi elektron holatini aniqlaydigan tenglamaga mos bo‘lib qoladi. Bilamizki, yakkalangan (alohida) atomdagi $v_o(r)$ – potentsial energiya giperbola shakliga ega bo‘ladi. $V(r)$ – bir xil takrorlanuvchi giperbola shaklida bo‘ladi.



2.5-rasm. Yakkalangan atomda ko‘rilayotgan elektronning harakatsiz ionlar hosil qilgan maydondagi ta’sirlashuv potentsial energiyasining giperbola shakliga ega bo‘lishi

(2.12) tenglamani yechib, elektronni kristalldagi to‘lqin funksiyasini topishda $V(r)$ funksiyasining analitik mohiyatini, ya’ni uning tuzilishini aniqlash kerak bo‘ladi. Bu masalaning yechilishini Kronig va Penin ko‘rsatib bergan. Unga mos holda $V(r)$ ning

davriyligi – bir xil ifodaviy formada, bir xil masofada doimiy takrorlanuvchi funksiya ekanligidadir.



2.6-rasm. Kronig – Penin kristallida elektronning aproksimatsiya potensial funksiyasi

Agar potensial to'siq orasini b , potensiall to'siq kengligini a va potensial to'siq balandligini U deb belgilab olib, quyidagi ifodani

$$\frac{ma}{h^2} bU = P = \text{const} \quad (2.13)$$

hosil qilsak, $1/P$ ning fizik qiymati potensial to'siq shaffofligini beradi. Yuqoridagi tenglama yechimining matematik ifodalarini keltirmagan holda P ning qiymatiga qarab, elektronning energetik holatlarini quramiz:

$P \rightarrow \infty$ bunda, elektron o'z atomi bilan kuchli bog'langan, uning potensial to'siqdan o'tish ehtimoli yo'q. Bu holat elektronning yakkalangan atomdagi holatiga mos keladi, ya'ni elektron diskret energetik sathlarga ega va ular o'zaro taqiqlangan energetik sohalar bilan ajratilgan.

$P \rightarrow 0$ bunda, potensial to'siq shaffof bo'lib, elektron harakatiga to'sqinlik qilmaydi. Elektron to'la erkin holatda bo'ladi.

$P \gg 1$ bu P ning qiymati katta bo'lgani bilan potensial to'siq shaffofligi kam bo'lsa ham mavjud, ya'ni elektron ma'lum vaziyatlarda bu to'siqdan o'ta olishini ko'rsatadi. Bu holat, elektronning alohida atomdagi va erkin holat o'rtasidagi vaziyatlariga mos keladi.

Bunday holatda elektron diskret energetik sathlarda emas, balki bir – biridan ma'lum kenglikka ega bo'lgan taqiqlangan sohalar bilan ajralgan energetik sohalarida joylashadi. Elektronning oxirgi to'lgan sathdan keyingi bo'sh sathga o'tish ehtimoli faqat taqiqlangan soha kengligi va haroratga bog'liq bo'ladi. Shuni yana bir marta ta'kidlab o'tish lozimki, kristall panjarada elektronlarning energetik holatlari kristallda yuzaga kelgan davriy potensial to'siqlar tabiati va tuzilishi bilan aniqlanar ekan.

2.3. Elektronning effektiv massasi

Erkin (vakuumda) harakat qilayotgan elektron tashqi elektr maydon ta'sirida o'z harakat tezligini o'zgartirib (ham yo'nalish ham miqdor tomondan) tezlanish oladi. Bu tezlanishni Nyutonning ikkinchi qonuniga asosan quyidagicha yozamiz: $F = eE = m a = m \, dv/dt$. Endi kristallda issiqlik tufayli tartibsiz harakat qilayotgan elektronga tashqi elektr maydon qo'yilganda uning tezlanishi qanday bo'ladi? Albatta, u erkin elektron harakatidan tubdan farq qiladi, chunki biz oldingi mavzularda ta'kidlaganimizdek, elektronga tashqi elektr maydon kuchlanishidan boshqa yana juda ko'p ta'sirlar: boshqa elektronlar, atom yadrolari ta'siri hamda kristall panjara potentsiali ham ta'sir etadi. Bu holda elektronga ta'sir qilayotgan kuchlar $F = eE + F_u$ bo'ladi. Ammo F_u – kuchning yo'nalishi va qiymati kristall panjara potentsialiga mos o'zgarib turganligi uchun, kristalldagi elektron harakat yo'nalish trayektoriyasini aniq o'lchash juda murakkab bo'ladi. Bu masalani yaxshiroq tushunish uchun quyidagi hodisani ko'rib chiqamiz. Havoda yuqoridan tushayotgan jism tezlanishi g bo'lsin, u yerning tortish kuchi $F_T = m g$ ifodadan aniqlanadi va doimiy qiymatga ega. Agar shu jism suyuqlikka tushirilganda uning Arximed itarish kuchi ta'sir qilishi natijasida tezlanishini quyidagicha yozishimiz mumkin bo'ladi:

$$g = \frac{F_T - F_A}{m}, \quad F_A = \rho_s V g, \quad F_T = m g = \rho V g \quad (2.14)$$

bunda: V – suyuqlik hajmi, ρ, ρ_s – havo va suyuqlik zichligi.

Unda jismning suyuqlikdagi tezlanishini quyidagicha yozishimiz mumkin bo'ladi:

$$a = \frac{F_T - F_A}{m^*} = \frac{V(\rho - \rho_f)}{m^*} = \frac{F_T}{m^*}$$

$$m^* = \frac{m}{1 - \frac{\rho_f}{\rho}} \quad (2.15)$$

Bundan ko'rinib turibdiki, suyuqlikda jismning og'irlik kuchi ta'siridagi harakatida jismning massasi qandaydir yangi holat m^* – effektiv massa bilan tushuntirish qulay. ρ_f/ρ ning qiymatiga qarab, m^* , m dan, ya'ni uning haqiqiy massasidan kichik bo'lib, musbat hatto manfiy ham bo'lishi mumkin. Demak, bu holda suyuqlik jism tezlanishiga ko'rsatgan ta'sirini jismning effektiv massa orqali ko'rsatilmaydi. Xuddi shunday kristall panjara potensialining tashqi maydon qo'yilganda elektron tezlanishiga ta'sirini ham effektiv massa tushunchasini kiritish yo'li bilan juda oson ko'rsatish mumkin.

Effektiv massa – bu elektron harakatiga tashqi maydon va kristall panjara potensialining birgalikda ko'rsatilayotgan ta'sirini ko'rsatuvchi kattalikdir.

Effektiv massa massaga xos modda miqdori va inersiya o'lchov birligiga xos xususiyatga ega emas, ya'ni u elektron massasi hisoblanmaydi. Bizga ma'lumki, elektron elementar zarracha bo'lganligi uchun u ham zarracha va to'lqin xossalari ga egadir. Kvant fizikasida asosan, elektronning energiyasi uning De – Broyl to'lqin uzunligi bilan quyidagi ifoda orqali bog'langan:

$$E = \frac{h^2 k^2}{2m} = \frac{h^2 \pi^2}{2m \lambda^2}$$

$$E = \frac{mv^2}{2}, \quad mv = p, \quad E = \frac{p^2}{2m}, \quad p = \hbar k \quad (2.16)$$

$$E = \frac{h^2 k^2}{2m}, \quad k = \frac{\pi}{\lambda}, \quad E = \frac{h^2 \pi^2}{m \lambda^2}$$

Bunda: k – to‘lqin funksiyasi, $k = \frac{\pi}{\lambda}$, λ – to‘lqin uzunligi, h – Plank doimiysi, p – elektron impulsi.

Bu ifodaning birinchi darajali hosilasi elektronning tezligini beradi:

$$\frac{1}{h} \frac{dE}{dk} = \frac{hk}{m \cdot v} \quad (2.17)$$

Ikkinchi darajali hosilasi esa tezlanishni beradi:

$$a = \frac{dV}{dt} = \frac{1}{h} \frac{d}{dt} \left(\frac{dE}{dk} \right) \quad (2.18)$$

Tashqaridan qo‘yilgan maydon E ga, ta’sir etayotgan kuch $F = eE$ natijasida bajarilayotgan ish dA bu berilgan vaqtda elektron tezligining o‘zgarishi natijasida uning energiyasi o‘zgarishidan iborat bo‘ladi, ya’ni

$$dA - dE = F dS = F \bar{V} dt \quad (2.19)$$

Bunda,

$$\frac{dE}{dt} = F \bar{V} \quad (2.20)$$

(2.19) ni ifodani (2.20) ifodaga qo‘yib, tashqi ta’sir kuchining k ga bog‘liq emasligini hisobga olsak bo‘ladi:

$$\bar{a} = \frac{d\bar{V}}{dt} = \frac{1}{h} F \frac{d\bar{V}}{dt} \quad (2.21)$$

(2.21) ifodadan yana bir marta hosila olsak, quyidagi ifoda kelib chiqadi:

$$\bar{a} = \frac{d\bar{V}}{dt} = \frac{1}{h^2} F \frac{dE}{dk^2} \quad (2.22)$$

Endi bu ifoda Nyutonning ikkinchi qonuniga mos keladi va unda

$$F = ma = h^2 \frac{1}{\frac{d^2E}{dk^2}} \cdot a = m^*a \quad (2.23)$$

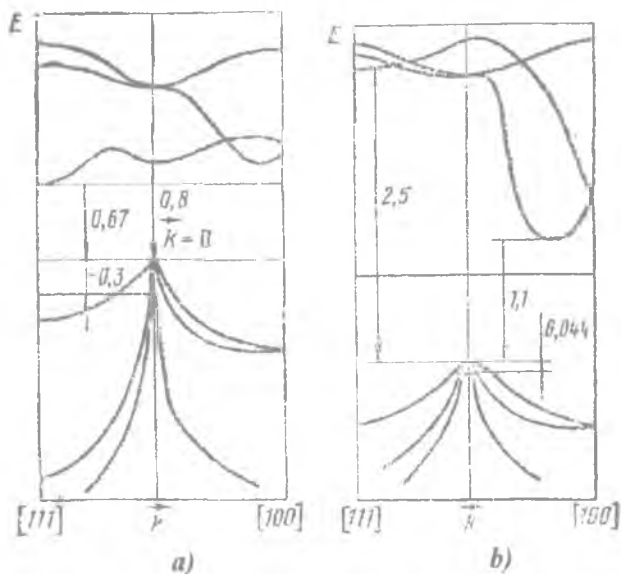
$$m^* = \frac{h^2}{\frac{d^2E}{dk^2}} \quad (2.24)$$

Bu ifodani elektronning *effektiv massasi* deb qabul qilamiz.

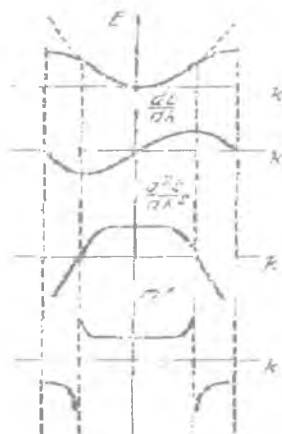
Effektiv massa – odatdagi massaga xos bo‘lgan inersiya o‘lchovi, og‘irlik tortish kuchi va modda miqdori kabi xossalarga ega bo‘lmagan kattalikdir.

(2.21) ifodaga mos yarimo‘tkazgichlar elektron energiyasining to‘lqin vektoriga bog‘liqlik sohalar diagrammasi keltirilgan. Bundan ko‘rinib turibdiki, elektron energiyasi bu to‘lqin vektori bo‘yicha o‘zgaruvchi kattalik ekan.

Unda d^2E/dk^2 – ham, ya’ni elektron effektiv massasi ham odatdagi elektron doimiy o‘zgarmas massasidan farqli holda o‘zgaruvchan qiymatga ega ekanligi ma’lum bo‘ldi. $E(k)$ grafikdan kelib chiqqan holda d^2E/dk^2 va $m(k)$ bog‘liqlik grafigi keltirilgan:



2.7- rasm. Germaniy (a) va kremniy (b) ning energetik soha strukturasi



2.8-rasm. Elektronning effektiv massa xususiyatining sxematik ko'rinishi

Bu grafiklardan ko‘rinib turibdiki, effektiv massa qiymati musbat va manfiy bo‘lishi mumkin ekan. Buning fizik ma‘nosi elektron o‘tkazuvchanlik sohasida musbat effektiv massa bilan, valent sohasida esa manfiy effektiv massa bilan harakat qiladi. Valent sohasidagi manfiy effektiv massaga ega bo‘lgan elektron o‘tkazuvchanlik sohasidagi elektron harakatiga teskari harakatda bo‘ladi. Bunday holat *musbat zaryadlangan kovak* deb qabul qilingan va uning harakati elektron harakatini bir-biriga uzatish estafeta harakatidan iborat.

Frenkel kovaklar harakatini tushuntirish uchun shunday misol keltiradi: teatrning eng oldingi qatorida bitta bo‘sh joy bor, teatr boshlanishi bilan ikkinchi qatordagi odam o‘z joyidan turib o‘sha bo‘sh joyga borib o‘tiradi. O‘z navbatida endi ikkinchi qatorda paydo bo‘lgan bo‘sh joyga uchinchi qatordagi odam o‘tib oladi. Shunday qilib, har bir oldingi qatorda paydo bo‘lgan bo‘sh joyga undan keyingi qatordagi odam o‘tib joyni to‘ldiraveradi. Nihoyat teatrda tanaffus e‘lon qilindi, qarabsizki, birinchi qatordagi bo‘sh joy eng oxirgi qatorda paydo bo‘ladi. Go‘yoki, bo‘sh joy harakat qilgandek, va-holangki, bu harakat bo‘sh joy paydo bo‘lgan qatordan keyingi qatordagi odamlarning birin-ketin o‘rinni to‘ldirishi tufayli yuzaga kelganligi ma‘lum. Demak, bo‘sh joy odamlar harakatiga teskari yo‘nalish bo‘yicha harakat qiladi, kovaklar harakati ham mana shunga mos keladi.

Juda ko‘p yarimo‘tkazgich materiallarining kristall tuzilishlarida yo‘nalishlar har xil bo‘lganligi, ya‘ni *anizotrop* xususiyatga ega bo‘lganligi tufayli effektiv massa qiymati ham tenzor yo‘nalishiga bog‘liq kattalik bo‘ladi. Ma‘lumki, *Ge* va *Si* ning energetik sohalarning tuzilishi ellipsoid shaklida bo‘lganligi uchun ulardagi elektronni effektiv massasi ellipsoid katta va kichik o‘qlarga nisbatan 2 xil bo‘ladi. Ammo $A^{III}B^V$ birikmali yarimo‘tkazgich materiallarida energetik sohalar sferik bo‘lganligi uchun effektiv massa tenzor kattalik hisoblanmaydi. Quyida *Ge* va *Si* yarimo‘tkazgich materiallari uchun elektron va kovaklarni effektiv massalarining elektronning haqiqiy massasiga nisbati keltirilgan. Bu kattaliklar ushbu materiallarning fizik xossalari, fundamental parametrlarini o‘rganishda hamda hisoblashlarda qulaylik tug‘diradi.

2.2-jadval

Ge va Si yarimo'tkazgich materiallari uchun elektron va kovaklar effektiv massalari elektronning haqiqiy massasiga nisbati

Yarimo'tkazgich	$\frac{m_{\parallel}^*}{m_0}$	$\frac{m_{\perp}^*}{m_0}$	$\frac{m_{p1}^*}{m_0}$	$\frac{m_{p2}^*}{m_0}$	$\frac{m_{p3}^*}{m_0}$
Germaniy(Ge)	1,58	0,08	0,33	0,042	0,077
Kremniy (Si)	0,91	0,19	0,49	0,16	0,245

Sinov savollari:

1. Atomlarda har xil energetik holatlarda bo'lgan elektron boshqa elementar zarrachalar – proton va neytronlar bilan qanday munosabatda bog'langan?
2. Elektronlarning atomlardagi energetik holatlari to'rtta kvant soni bilan aniqlanadi. Bu qanday kvant sonlar?
3. Kvant sonlari bir-biri bilan qanday munosabatda bog'ladi?
4. Bor taklif etgan atomning planar modelini aytib bering.
5. Pauli asosining fizik ma'nosi nima?
6. Agar atomda valent elektronlar hosil qilgan energetik sathlar to'lmagan bo'lsa, unda qanday jarayon yuz beradi?
7. Qattiq jismlar hisoblangan metall, yarimo'tkazgich va dielektrlarda energetik sohalar qanday joylashgan?
8. To'lqin soni, to'lqin vektorining fizik ma'nosi nima?
9. Qattiq jismlarda elektron energiyasi to'lqin soniga qanday bog'langan?
10. Elektronning effektiv massasi nima?
11. Elektron qachon musbat va manfiy effektiv massa bilan harakat qiladi?

Qattiq jismlarda elektronlarning energetik holatlari mavzusiga doir masalalar:

1. Bosh kvant soni $n = 2$ ga teng bo'lgan atomda elektronlar qanday holatda bo'lishini chizib ko'rsating.
2. Bosh kvant soni $n = 3$ ga teng bo'lgan elementlar nomlarini yozing va chizib ko'rsating.

3. Agar metall 1000 ta atomdan tashkil topgan bo'lsa, ularning o'tkazuvchanligidagi elektron sathlari nechta bo'lishi mumkin?

4. Nima uchun tashqi elektron qobiqlari bir xil bo'lgan uglerod dielektrik hisoblanadi, kremniy esa yarimo'tkazgich?

5. Si, Ge, GaAs moddalarining taqiqlangan sohalarini keltiring va tushuntirib bering.

6. Dielektrik moddalarga misol keltiring va ularning solishtirma qarshiligi qanday bo'ladi?

7. Elektron, vodorod atomi, proton va neytronlar uchun De – Broyl to'liq uzunligini hisoblang va tushuntirib bering.

8. Si da elektronlarning effektiv massalari qanday qiymatlarga ega, kovaklarniki-chi?

3. YARIMO'TKAZGICH MATERIALLAR

3.1. Yarimo'tkazgichlarning noyob xossalari

Yarimo'tkazgich materiallar o'zining quyidagi o'ta noyob xossalari bilan hozirgi zamon elektronikasi, mikroelektronikasi va nanoelektronikasining asosi hisoblanadi:

1. Yarimo'tkazgich materialining solishtirma qarshiligi harorat oshishi bilan (OKdan) eksponensial qonun bilan kamayadi.

Masalan, kremniyning harorati $T=100^0$ K dan 300^0 K ga oshganda, uning solishtirma qarshiligi qiymati 10^{24} Om sm dan $2 \cdot 10^5$ Om sm gacha, ya'ni 10^{18} karra kamayadi. Shu oraliqda eng yaxshi metall oltinning solishtirma qarshiligi bor-yo'g'i 17% ortadi. Demak, yarimo'tkazgichlarning elektr xossalarini harorat yordamida juda katta oraliqda boshqarish mumkin ekan. Bu yarimo'tkazgichlarga xos juda noyob xossadir.

2. Yarimo'tkazgich materiallarning solishtirma qarshiligi kirishma atomlarning miqdoriga o'ta sezgir bo'ladi.

Misol uchun, oltinga 30% mis yoki *InAg* moddasi qo'shilsa, uning solishtirma qarshiligi bor-yo'g'i 3% o'zgaradi. Shu holda xususiy 1 kg *Si* ga 0,001 mg, ya'ni *Si* dagi atomlar sonidan 10^9 karra kam bo'lgan *B,P* yoki *Sb* ni qo'shadigan bo'lsak, uning solishtirma qarshiligi 10^3 karra oshadi. Demak, xona haroratida *Si* ning solishtirma qarshiligini faqat kirishma atomlar konsentratsiyasi $10^{11} \div 10^{19}$ sm⁻³ ga oshirish hisobiga uning solishtirma qarshiligi $\rho \sim 10^5$ Om sm dan $\rho \sim 10^{-3}$ Om sm ga o'zgartirish mumkin. Demak, yarimo'tkazgichlarga kirishma elementlari kiritilganda ularning xususiyatlari keskin o'zgarishi ham ularning noyob xossaga ega ekanligidan darak beradi.

3. Yarimo'tkazgich materiallarda metallardan farqli holda 2 xil tok tashuvchilar, ya'ni elektron va kovaklar mavjud.

Bu degan so'z bitta yarimo'tkazgich materiali asosida elektron o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan n – tur yoki kovak o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan p – tur material olishimiz mumkin. Mana bu xususiyat “Qattiq jismlar elektronikasi”ga asos bo'lishiga, diod ($p-n$) va tranzistorlarning kashf etilishi va hozirgi zamon mikro hamda nanoelektronikasining paydo bo'lishi va rivojlanishiga asos bo'ldi. Yarimo'tkazgich materiallarining mana bu o'ta noyob xossasi insoniyat hayotida texnika sohasi texnik revolyutsiya davrini boshlab berdi.

4. Metallarda umuman mavjud bo'lmagan holat, ya'ni tok tashuvchilarning (elektron va kovaklar) yashash vaqtini boshqarish usuli bilan yarimo'tkazgichlar asosida umuman yangi turdagi elektron asboblarni yaratish imkonini berdi.

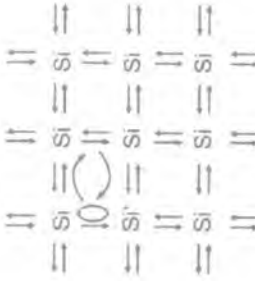
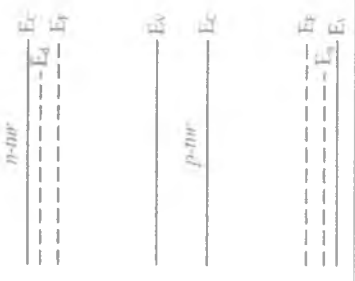
Bularga – lazerlar, quyosh elementlari va boshqalarni kiritish mumkin. Yarimo'tkazgichlarda tok tashuvchilarning yashash vaqti qiymatining juda katta oraliqda o'zgarishi ($10^3 \div 10^{-11}$ sek) o'ta tez ishlaydigan hozirgi zamon hisoblash mashinalarini yaratishga sabab bo'ldi.

5. Metallarga qaraganda yarimo'tkazgich materiallarining elektrik, optik, magnit xossalari tashqi ta'sirlarga (magnit maydon, radiatsiya, bosim, yorug'lik va h.k) o'ta sezgirdir.

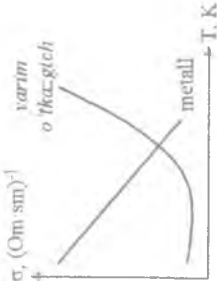
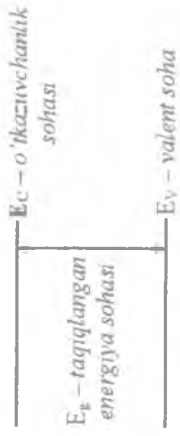
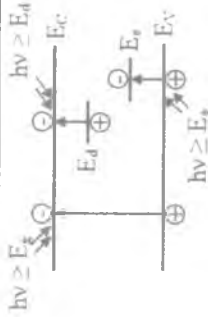
Mana bu noyob xossa – texnikada tubdan yangi bo'lgan asbob va qurilmalarning yaratilishiga sabab bo'ldi. Bu hozirgi zamon hisoblash texnikasi, robototexnika va diagnostika sohalarining o'ta yuqori darajada rivojlanishiga asos bo'ldi.

6. Yarimo'tkazgich materiallarning metallardan yana bir farqli xususiyati, bu tok tashuvchilarning harakatchanligi nafaqat o'ta yuqori qiymatlarga erishishi, balki harorat hamda nuqsonlarga o'ta bog'liqligidir.

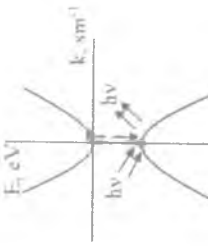
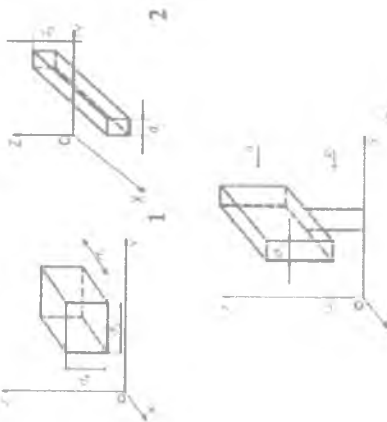
Yarimo'tkazgich materiallarining metallardan fundamental farqlari

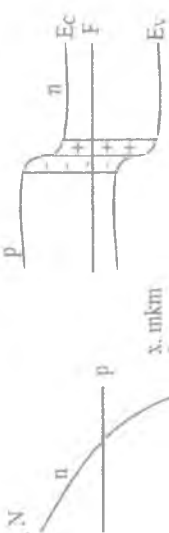
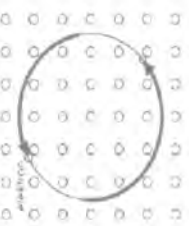
1.	Yarimo'tkazgichlarda ikki xil zaryad tashuvchilar mavjud elektronlar – n va kovaklar – p. Kovak – kva$\bar{z}$i zarracha bo'lib, kovalent bog'lanishning uzilishi natijasida musbat ionga aylangan yarimo'tkazgich asosiy atomidagi bo'sh joy. Kovakning harakati elektronlarning estafetali ko'chishi natijasida vujudga keladi. Metallarda zaryad tashuvchilar faqat elektronlardir.	
2.	Yarimo'tkazgich materiallar ikki xil n – va p – tur o'lkazuvchanlikka ega bo'ladi. n – turli yarimo'tkazgichlarda elektronlar konsentratsiyasi kovaklar konsentratsiyasidan juda ko'p bo'ladi $n \gg p$, bunday materiallarni ularga donor kirishma atomlari kiritish yo'li bilan olinadi. p – turli materiallarda esa $p \gg n$. Ular akseptor kirishma atomlar kiritish yo'li bilan olinadi.	

3.	Yarimo'tkazgich materiallarning solishtirma o'tkazuvchanligi kirishma atomlarining miqdoriga o'ta bog'liqdir (Asosiy atomlar konsentratsiyasining 10^{19} qismi, yoki 1 tonna kremniyga 1mg miqdoridagi kirishma atomlar (B, Al, P) kiritilsa, ularning o'tkazuvchanligi 1000 marta oshishi mumkin) Metallarda bunday holat mavjud emas.	
4.	Yarimo'tkazgich materiallar: • <i>xususiy</i> (tarkibida bogona atomlar konsentratsiyasi $N < 10^{10} \text{ sm}^{-3}$), $n=p=n_i$ • <i>legirlangan</i> (kirishma atomlar konsentratsiyasi $N = 10^{11} \div 10^{17} \text{ sm}^{-3}$) • <i>o'ta legirlangan</i> ($N = 10^{18} \div 10^{20} \text{ sm}^{-3}$) bo'ladi.	
5.	Yarimo'tkazgich materiallarda elektronlar va kovaklar <i>effektiv massaga</i> (m_n^*, m_p^*) ega bo'ladi. <i>Effektiv massa</i> – bu kristall panjara davny potensialining elektronlar harakatiga ta'sirini ko'rsatuvchi kattalik bo'lib, haqiqiy massaga ega emas.	$m_n^* m_p^* = \frac{\partial^2 E(k)}{\partial^2 k}$
6.	Yarimo'tkazgich materiallarda elektronning harakatchanligi (μ_n) metallarga nisbatdan 100 yoki 1000 marta katta bo'lishi mumkin. <i>Harakatchanlik</i> – bir birlik elekt rmaydoni ta'sirida elektronlarning Dreyf tezligi.	$\mu_n = \frac{e}{m_n^*} \tau; \mu_p = \frac{e}{m_p^*} \tau$ $\mu_n = \frac{V}{E} = \frac{\text{sm}^2}{[\frac{\text{sm}^2}{V} \cdot \text{s}]}$

7.	Yarimo 'tkazgich materiallarning solishturma o'tkazuvchanligi harorat oshishi bilan eksponensial qonun bo'yicha oshadi. $\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{E_g}{kT}}, \quad (Om \cdot sm)^{-1}$ Metallarda esa harorat oshishi bilan solishturma o'tkazuvchanlik chiziqli qonuniyat asosida kamayadi. $\sigma = \sigma_0 - \alpha T$	
8.	T=300K da metallarning solishturma o'tkazuvchanligi $\sigma=10^4-10^9 (Om \cdot sm)^{-1}$, yarimo 'tkazgichlarning $\sigma=10^3-10^{10} (Om \cdot sm)^{-1}$, ya'ni juda katta oraliqda o'zgarishi mumkin. Yarimo 'tkazgich materiallarda <i>taqiqlangan energetik soha</i> mavjud bo'lib, ularning miqdori $E_g=0,17 \div 3,5$ eV gacha o'zgarishi mumkin. <i>Taqiqlangan energetik soha</i> kattaligi eV bilan o'lchanadi va u kovalent bog'lanishda qatnashayotgan valent elektronlarni ozod qilish uchun kerak bo'lgan energiyaga teng.	
9.	Yarimo 'tkazgich materiallarning o'tkazuvchanligini yorug'lik ta'sirida juda katta oraliqda o'zgartirish mumkin (ya'ni fotoo'tkazuvchanlik hodisasi mavjud). Metallarning o'tkazuvchanligi yorug'lik ta'sirida umuman o'zgarmaydi. Bu esa ichki fotoeffekt hodisasi bilan tushuntiriladi, metallarda ichki fotoeffekt hodisasi mavjud emas.	
10.		

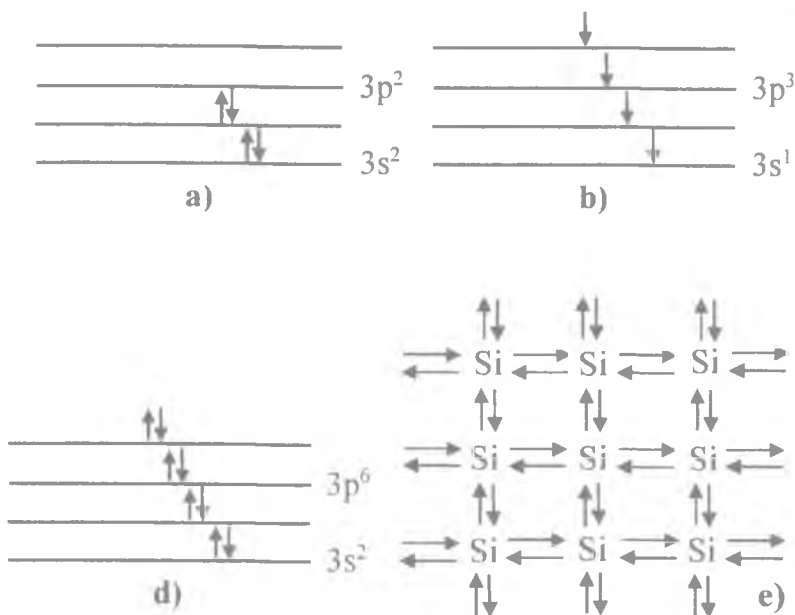
11.	Yarimo'tkazgich materiallarning fizik xossalari tashqi ta'sirlar (temperatura, yorug'lik, bosim, magnit maydon, radiatsiya...) ga o'ta sezgirdir. Ularning sezgirligi metallarnikidan ko'p marta ortiqdir.	
12.	Yarimo'tkazgich materiallarda zaryad tashuvchi <i>kovak</i> va <i>elektronlarning yashash vaqti</i> (τ_n, τ_p) mavjud. Ularning qiymati $10^{-12} + 10^{-13}$ sekund oralig'ida o'zgarishi mumkin. <i>Elektronlarning yashash vaqti</i> ularning o'tkazuvchanlik sohasida bo'lish vaqtidir. <i>kovaklarning yashash vaqti</i> ularning valent sohada bo'lish vaqtida avtiladi. Metallarda zaryad tashuvchilarning yashash vaqti degan tushuncha mavjud emas.	$\tau_n = \frac{1}{N_2 \cdot V \cdot S_n}, \quad \tau_p = \frac{1}{N_2 \cdot V \cdot S_p}$
13.	Yarimo'tkazgich materiallarda <i>relaksatsiya vaqti</i> (τ) metallarga ($\tau \sim 10^{-12}$ s) qaraganda o'ta o'zgaruvchan va katta bo'ladi. <i>Relaksatsiya vaqti</i> - bu tashqi ta'sir olingandan keyin nomuvozanat holatdan muvozanat holatiga tiklanish uchun kerak bo'ladigan vaqtidir.	$\tau = \frac{m}{\rho \cdot n \cdot e^2}$
14.	Yarimo'tkazgich materiallar o'ziga xos kimyoviy bog'lanishga ega bo'lib, bunday bog'lanishlar <i>sp³ - tetraedrik kovalent bog'lanish</i> (Si, Ge) yoki <i>qisman ion kovalent bog'lanish</i> (GaAs, InAs, CdS, ZnS) ga ega bo'ladi.	$ \begin{array}{ccccccc} \uparrow\uparrow & \uparrow\uparrow & \uparrow\uparrow & \uparrow\uparrow & \uparrow\uparrow & \uparrow\uparrow & \uparrow\uparrow \\ \rightleftharpoons \text{Si} & \rightleftharpoons \text{Si} & \rightleftharpoons \text{Si} & \rightleftharpoons \text{Ga} & \rightleftharpoons \text{As} & \rightleftharpoons \text{Ga} & \rightleftharpoons \\ \uparrow\uparrow & \uparrow\uparrow & \uparrow\uparrow & \uparrow\uparrow & \uparrow\uparrow & \uparrow\uparrow & \uparrow\uparrow \\ \rightleftharpoons \text{Si} & \rightleftharpoons \text{Si} & \rightleftharpoons \text{Si} & \rightleftharpoons \text{As} & \rightleftharpoons \text{Ga} & \rightleftharpoons \text{As} & \rightleftharpoons \\ \uparrow\uparrow & \uparrow\uparrow & \uparrow\uparrow & \uparrow\uparrow & \uparrow\uparrow & \uparrow\uparrow & \uparrow\uparrow \\ \rightleftharpoons \text{Si} & \rightleftharpoons \text{Si} & \rightleftharpoons \text{Si} & \rightleftharpoons \text{Ga} & \rightleftharpoons \text{As} & \rightleftharpoons \text{Ga} & \rightleftharpoons \\ \uparrow\uparrow & \uparrow\uparrow & \uparrow\uparrow & \uparrow\uparrow & \uparrow\uparrow & \uparrow\uparrow & \uparrow\uparrow \end{array} $

15.	Yarimoʻtkazgich materiallarda maʼlum sharoitda aniq toʻlqin uzunligiga ega boʻlgan yorugʻlik chiqishi mumkin (fotoluminissensiya, elektrolyuminissensiya va lazerlar).	
16.	Yarimoʻtkazgich materiallarda nano oʻlchamlik strukturalar (kvant nuqtasi, kvant ipi, kvant chuqurligi) hosil qilish bilan ularning fundamental parametrlarini oʻzgartirish va boshqarish mumkin. Metallarda esa erkin elektronlar energiyasi katta boʻlganligi ($E=5\div 10$ eV) va elektron oʻz massasiga (m) ega boʻlganligi uchun: De-Broyl toʻlqin uzunligi ($\lambda_d = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{h}{\sqrt{2mE}}$ [nm]) juda kichik boʻladi. Kvant nuqta (1) oʻlchamlari: $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z \sim \lambda_d$, kvant ipi (2) $\alpha_y \gg \lambda_d$; $\alpha_x, \alpha_z \sim \lambda_d$, kvant chuqurligi (3) $\alpha_z \sim \lambda_d$, $\alpha_x, \alpha_y \gg \lambda_d$.	

17.	Yarimo'tkazgich materiallarda, sirt yoki hajmida zaryad tashuvchilar konsentratsiya gradiyentini xohlaganicha hosil qilish mumkin. 
18.	Yarimo'tkazgich materiallarda <i>eksiton</i> (elektron va kovak juftligi) mavjud. Ular o'tkazuvchanlikda qatnashmagan holda juft bo'lib harakatlanadi. 

3.2. Yarimo'tkazgich materiallarda kimyoviy bog'lanish

Yarimo'tkazgich materiallaridagi asosiy kimyoviy bog'lanish bu *kovalent bog'lanish*dir.



3.1-rasm. Si kristallining kovalent bog'lanishi: a) atom alohida holatidagi elektronlarining konfiguratsiyasi, b) atomda kovalent bog' hosil bo'lish jarayonidagi elektronlar konfiguratsiyasining o'zgarishi, d) kovalent bog'lanishda ishtirok etgan atom elektronlarining konfiguratsiyasi, e) kovalent bog'lanish

Yarimo'tkazgich materiallarini tashkil etadigan asosiy atomlarning *s* va *p* elektron qobiqlari to'lmagan bo'ladi. ammo kristall hosil bo'lishida ulardagi hamma atomlarning tashqi elektron qobiqlari to'lishi shart. Natijada kristalldagi har bitta atomni tashqi qobig'ida

elektronlar soni 8 taga yetib, s^2p^6 holatiga o'tadi. Bunday bog'lanishda spinlari bir-biriga qarama-qarshi bo'lgan 2 ta elektron, ikki atom o'rtasida umumiy bo'lgan holda, ikki atomga tegishli bo'ladi. Misol uchun, Si kristallini ko'radigan bo'lsak, undagi atomlarning valent elektronlari holati s^1p^3 holatda bo'lib, bunday atom to'rt tomondagi qo'shnilaridan bittadan qarama-qarshi spinli elektronlarni qabul qilishi bilan s^2p^6 holatiga o'tadi.

Bunday bog'lanishlarni s^1p^3 gibrid bog'lanishlar deb atash qabul qilingan.

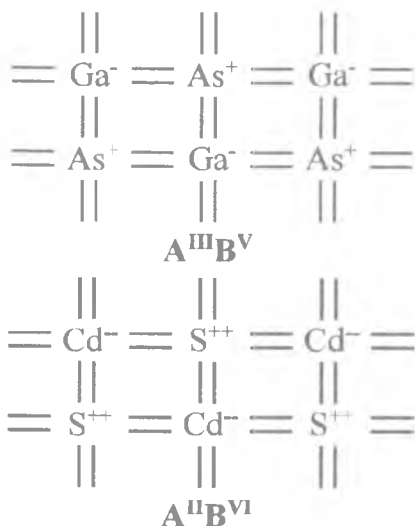
Yarimo'tkazgich materiallarida kovalent s^1p^3 bog'lanish mavjud bo'lishi uchun kristall shunday atomlaridan tashkil topgan bo'lishi kerakki, unda kristallni tashkil etgan 4 ta qo'shni atom valent elektronlarining yig'indisi 8 ga teng bo'lishi kerak. Bunday kristallar bir xil atomlardan tashkil topgan kremniy $Si(s^2p^2)$, $Ge(s^2p^2)$, $Sn(s^2p^2)$, $C(s^2p^2)$ yoki III guruh elementlari Ga , $B(s^2p^1)$, $In(s^2p^1)$ va V guruh elementlari As , Sb , $P(s^2p^3)$ asosidagi kristallar ($GaAs$, GaP , InP , ...). Bunda bitta elektron V guruh to'la atomlaridan III guruh atomlariga o'tadi. Natijada III va V guruh atom elektronlar soni 4 tadan, ya'ni s^1p^3 bo'ladi yoki II guruh elementlari Cd , $Zn(s^2p^2)$ va VI guruh elementlari S , Se , $Te(s^2p^4)$ asosidagi yarimo'tkazgich kristallar (CdS , $CdSe$, $CdTe$, ...) bu holatda VI guruh elementlari (s^2p^4) dan 2 ta elektron II guruh elementlari (s^2) ga o'tadi va natijada har ikkala atomda ham s^1p^3 holatlari vujudga keladi hamda s^1p^3 tetloedrik kovalent bog'lanish hosil qiladi.

Demak, toza kovalent bog'lanishga ega bo'lgan yarimo'tkazgich materiallar: kremniy (Si), germaniy (Ge) bo'lsa, III va V guruh elementlaridan tashkil topgan $A^{III}B^V$ materiallarda kovalent bog'lanish mavjud bo'lsa-da, ammo ulardagi atomlar musbat ionli V guruh elementlari va manfiy ionli III guruh elementlari bo'lganligi uchun ulardagi kimyoviy bog'lanish qisman ion kovalent bog'lanishi bo'ladi.

Odatda bunday kristallarda III va V guruh elementlarining atomlari soni teng bo'lishi kerak.

II va VI guruh elementlarining atomlaridan tashkil topgan yarimo'tkazgich materiallari ($A^{II}B^{VI}$) da esa II guruh element atomlari

2 karra manfiy ionli (Cd^{2-}), VI guruh element atomlari 2 karra musbat ionli (S^{2+}) holda bo'lgani uchun bunday materiallarda ham qisman ion kovalent bog'lanish bo'ladi. Faqat bunday materiallarda $A^{III}B^V$ materiallariga qaraganda ion bog'lanish nisbatan ko'proq bo'ladi.



3.2-rasm. $A^{III}B^V$ ($GaAs$) va $A^{II}B^{VI}$ (CdS) birikmalaridagi qisman ion kovalent bog'lanish

Elektromanfiylik (nisbiy elektromanfiylik) – atomning fundamental kimyoviy xossasi bo'lib, miqdoriy xarakteristikasi molekula hosil bo'lish jarayonida atomning o'ziga elektronni tortib olish qobiliyatidir. Eng katta elektromanfiylik qiymatiga VII guruh elementlari hamda kuchli oksidlagichlar (p – elementlar, F , O , N , Cl), eng kichik elektromanfiylik qiymatiga esa faol metallar (I guruhning s – elementlari) ega bo'ladi.

3.2-jadval

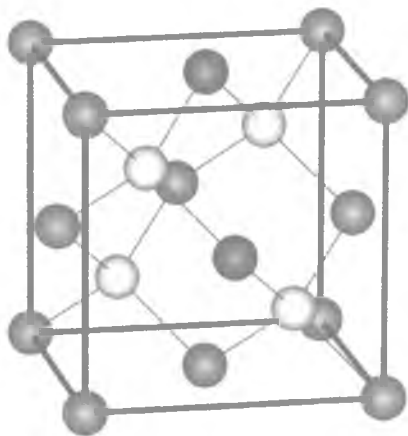
Element va birikmalarning nisbiy elektromanfiyligi va ion bog'lanish foizi

Material	Element yoki birikmalar	Nomlanishi	Nisbiy elektromanfiylik	Ion bog'lanish foizi
IV	C	Uglerod	0	0
	Ge	Germaniy	0	0
	Si	Kremniy	0	0
	Sn	Qalay	0	0
IV-IV	SiC	Kremniy Karbidi	0.8	0
III-V	AlAs	Alyuminiy Arsenide	0.6	11
	AlP	Alyuminiy fosfidi	1.6	50
	AlSb	Alyuminiy antimonidi	1.4	43
	BN	Bor nitride	0.4	8
	BP	Bor fosfidi	1.3	40
	GaAs	Galliy arsenidi	0.5	9
	GaN	Galliy nitridi	1	22
	GaP	Galliy fosfidi	1.9	61
	GaSb	Galliy antimonidi	0.1	2
	InAs	Indiy arsenidi	0.5	9
	InP	Indiy fosfidi	0.6	11
	InSb	Indiy antimonidi	0.3	6
II-VI	CdS	Kadmiy sulfidi	1	22
	CdSe	Kadmiy selenidi	0.9	19
	CdTe	Kadmiy telluride	0.6	11
	ZnO	Rux oksidi	2	64
	ZnS	Rux sulfide	1	22
IV-VI	PbS	Qo'rg'oshin sulfide	0.9	19
	PbTe	Qo'rg'oshin telluride	0.8	17
	PbSe	Qo'rg'oshin selenidi	0.5	9

3.3. Yarimo'tkazgich materiallarining kristall panjara tuzilishi

Yarimo'tkazgich materiallarining kristall panjara tuzilishi asosan 4 xil: olmos, rux obmankasi, vyursit va osh tuzi ko'rinishida uchraydi.

Olmos kristall panjara – bu tomonlari markazlashgan ikkita kub elementar panjaraning bir-biriga nisbatan hajm diagonali bo'yicha 1/4 qismi bo'yicha siljiganda hosil bo'ladigan kristall panjaradir.



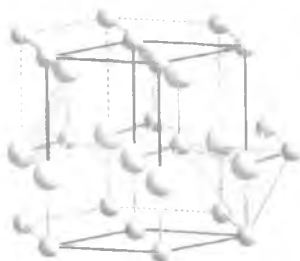
3.3- rasm. Olmos kristall panjarasi

Rux obmanka kristall panjara – bu tomonlari markazlashgan ikkita kub elementar panjaraning hajm diagonali bo'yicha 1/4 qismi siljigan holatda hosil bo'ladigan kristall panjaradir. Buning olmos kristall panjaradan farqi shuki, tomonlari markazlashgan bitta kub elementar panjara faqat bir xil atomlardan, ikkinchi shunday panjara esa boshqa xil atomlardan tashkil topgan bo'ladi.



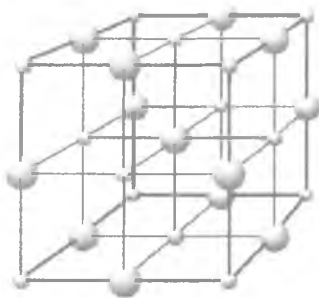
3.4-rasm. Ruxsimon kristall panjara

Vyursit elementar kristall panjara – bu atomlari zich joylashgan ikkita geksoqonal elementar yacheykaning bir-biriga kiritilgan holda paydo bo‘ladigan kristall panjaradir. Bunday kristall panjaralarda atomlar rux obmanka kristall panjarasidagi tetloedr kabi 4 ta yaqin atomlar bilan o‘ralgan bo‘ladi.



3.5-rasm. Vyursit kristall panjarasi

Osh tuzi elementar panjarasi – bu ikkita tomonlari markazlashgan kub elementar yacheykalarining bir-biriga kiritilgan holda paydo bo‘ladigan kristall panjaradir. Bunday panjarada bitta atom boshqa eng yaqin oltita atom bilan o‘ralgan bo‘ladi.



3.6 - rasm. Osh tuzi kristall panjarasi

3.4. Uch va to'rt xil atomlardan tashkil topgan yarimo'tkazgich materiallar

Uch va to'rt xil atomlardan tashkil topgan yarimo'tkazgich materiallarni yaratishdan (olishdan) maqsad, birinchidan, mavjud yarimo'tkazgich materiallarining fundamental parametrlari: taqiqlangan soha energiya qiymatini boshqarish bo'lsa, ikkinchidan, bunday materiallar asosida foydali ish koeffitsiyenti juda yuqori bo'lgan, ko'p p - n o'tishga ega quyosh elementlarni yaratishdir.

Bunday materiallarni olishning asosiy usuli – **molekulyar nurli epitaksiyadir.**

Bu usul yordamida, $A^{III}B^V$ – yarimo'tkazgich materiallardagi atomlarning bir qismini shu atomlarning izovalent (valentligi bir xil bo'lgan) atomlar bilan almashtirishdan iboratdir. Masalan, GaP yarimo'tkazgich materialida Ga – atomlarining bir qismi uning izovalent elementi Al yoki In bilan almashtiriladi. Bunda yangi $Ga_{1-x}Al_xP$ yoki $In_xGa_{1-x}P$ materiallar hosil bo'ladi. (x – bu yerda Al yoki In atomning Ga ga nisbatan kiritilgan qismi). Bunda Al yoki In nisbatiga qarab, $Al_xGa_{1-x}P$ yoki $In_xGa_{1-x}P$ – taqiqlangan soha energiyasi yetarli darajada o'zgaradi. Xuddi shunday $A^{III}B^V$ dagi V guruh elementlarini ham ularning izovalent atomlari bilan qisman

almashtirish mumkin. Misol uchun, $GaAs$, As atomi o'rniga P yoki Sb bilan. Bunda $GaAs_{1-x}P_x$, $GaAs_{1-x}Sb_x$ yangi yarimo'tkazgich materiallar olingan.

3.3-jadval

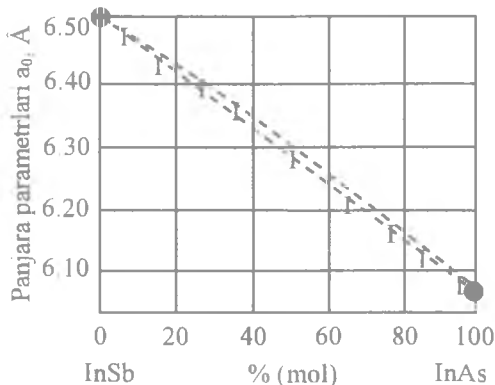
Murakkab yarimo'tkazgich materiallarning taqiqlangan soha kengligi

№	Murakkab yarimo'tkazgich materiallar	Taqiqlangan soha kengligi E_g , eV
1.	$GaAs_{0,88}Sb_{0,12}$	1,21
2.	$Ga_{0,47}In_{0,53}As$	0,75
3.	$Ga_{0,5}In_{0,5}Sb$	0,36
4.	$Ga_{0,3}In_{0,7}Sb$	0,24
5.	$InAs_{0,2}P_{0,8}$	1,1
6.	$Ga_{0,13}In_{0,87}As_{0,37}P_{0,63}$	1,05
7.	$GaAs_{0,45}P_{0,55}$	1,977
8.	$Al_{0,4}Ga_{0,86}As$	1,59
9.	$Al_{0,4}Ga_{0,86}As$	1,62
10.	$Ga_{0,612}In_{0,388}As$	0,95
11.	$CdGaAs_2$	0,55
12.	$CdSnP_2$	1,15
13.	$ZnGeP_2$	2,2
14.	$AgZnSe_2$	1,2
15.	$AgZnS_2$	2,0
16.	$AgGaS_2$	2,7
17.	$CuAlS_2$	3,5

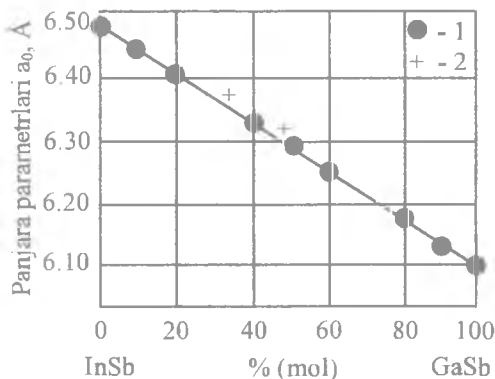
Albatta, bir vaqtning o'zida $A^{III}B^V$ materiallaridagi III va V guruh elementlarini qisman almashtirish yo'li bilan ularning xossalari o'zgartirish mumkin. Demak, molekulyar nurli epitaksiya metodi yordamida uch xil yoki to'rt xil atomlardan tuzilgan murakkab yarimo'tkazgich materiallar olish mumkin.

Molekulyar nurli epitaksiya texnologiyasini $A^{II}B^{VI}$ – yarimo'tkazgich materiallariga ham qo'llab, ulardagi II yoki VI guruh elementlarini ularning izovalent atomlariga qisman almashtirish orqali – yangi yarimo'tkazgich materiallar sinfini xohlagancha kengaytirish mumkin.

Ammo, shuni ta'kidlash zarurki, izovalent atomlar qisman asosiy atomlar o'rnini egallaganda ularning atom, ion radiuslariga mos holda ushbu materiallarning panjara doimiysi ham o'zgaradi. 3.3-jadvalda bunday materiallar va ular taqiqlangan soha energiyasi keltirilgan.



3.7-rasm. InAs – InSb tizimining tarkibi o'zgarishiga bog'liq holda panjara parametrlarini o'zgarishi



3.8-rasm. InAs – GaSb tizimining tarkibi o'zgarishiga bog'liq holda panjara parametrlarini o'zgarishi: 1 – Vule va Smitlarning ma'lumotlariga asosan; 2 – N.A. Goryunova va N.M. Fyodorovalarning ma'lumotlariga asosan.

3.5. Yarimo'tkazgich materiallaridagi nuqsonlar

Nuqson – kristall panjara atomlarining davriyligi va tartibining buzilishidir.

Metallardan farqli holda nuqsonlar yarimo'tkazgich materiallarining barcha fizik xossalariga juda katta ta'sir ko'rsatadi. Shuning uchun nuqsonlarning tabiatiga va konsentratsiyasiga qarab, yarimo'tkazgich materiallarining xossalarini maqsadli boshqarish mumkin. Yarimo'tkazgich materiallaridagi nuqsonlar o'lchamlariga qarab, xuddi boshqa qattiq jismlar kabi nuqtaviy, chiziqli va hajmiy nuqsonlarga bo'linadi.

3.4-jadval

Nuqsonlarning sinflanishi

Nuqtaviy	Chiziqli	Hajmiy	Sirtqi
Vakansiya	Dislokatsiyalar	Vakansiyalar to'plami	Tugallanmagan kovalent bog'
Tugunlararo atom	Kvant chiziqlari	Kirishma atomlarining klasterlari	Sirtga adsorbsiyalangan atomlar
Kirishma atomlar		Pritsipitatlar	
Eksiton		Kristall panjara atomlari tebranishi	
Kvant nuqtalar			
Molekula			
Komplekslar			
Ekin elektronlar va kovaklar			

Bundan tashqari yarimo'tkazgich materiallarda nuqsonlar elektrfaol yoki elektr neytral holatda bo'lishi mumkin.

Elektr faol nuqson deganda, kristall panjara nuqsonlari paydo bo'lishi bilan undagi tok tashuvchilar miqdori o'zgaradi, ya'ni elektronlar va kovaklar konsentratsiyasi oshishi yoki kamayishi mumkin. Natijada yarimo'tkazgich materiallarining o'tkazuvchanligi o'zgaradi. Bu metallarda uchramaydigan hodisadir.

Agar nuqsonlar yarimo'tkazgich materiallarida elektron va kovaklarning o'zgarishiga ta'sir etmasa, bunday nuqsonlar **elektr neytral nuqsonlar** deb ataladi.

Elektr faol nuqsonlarga erkin elektronlar va kovaklarni hosil qiluvchi kirishma atomlar, vakansiyalar, radiatsion va termik nuqsonlar kiradi. Erkin elektronlar va kovaklarning nuqson bo'lishiga sabab, erkin elektronlar kovalent bog'lanishni uzilishi hisobiga paydo bo'lganligi sababli bog'lanishi buzilgan atom musbat zaryadlangan ion holiga o'tadi.

Kovak – kovalent bog'lanish buzilishi hisobiga musbat ionga aylangan yarimo'tkazgich materiallining asosiy atomning holatidir.

Shuni ta'kidlash zarurki, kirishma atomlarining hammasi ham elektr faol nuqsonlar bo'lolmaydi.

Agar kirishma atomlarining valent elektronlari soni, yarimo'tkazgich materiallining asosiy atom valent elektronlari soniga mos kelsa, bunday atom kovalent bog'lanishini to'la ta'minlagani uchun qo'shimcha erkin elektronlar va kovaklar hosil qilmaydi. Bunday atomlar **izovalent** atomlar deb ataladi.

Misol uchun, kremniyda IV guruh atomlaridan *C*, *Ge*, *Sn* va *Pb* larning tashqi qobig'ida s^2p^2 – elektron mavjud. Ba'zi kirishma atomlari kristall panjarada klasterlar yoki elektr neytral molekulalar hosil qilganligi uchun ular ham elektr faol bo'lmaydi. Misol uchun, kremniyda *Ni* va *O₂*. Chiziqli nuqsonlarga – dislokatsiyalar kiradi. Dislokatsiyalar ham elektr faol nuqson holatida uchraydi.

Yarimo'tkazgichlarda nuqsonlarni o'z tabiatiga ko'ra, muvozanatdagi, nomuvozanatdagi va kvazi-muvozanatdagi kabi turlarga bo'lish mumkin.

Muvozanatdagi nuqsonlar deb, berilgan haroratda energiyasi kT ga mos keladigan kristall panjara nuqsonlariga aytiladi.

Kristall o'stirilayotganda yoki diffuziya yo'li bilan kiritilgan barcha kirishma atomlarining holati, o'stirilayotgan yoki diffuziya qilinayotgan haroratdan past hamma haroratlarda nomuvozanat holatda bo'ladi. Bunday nuqsonlar albatta, vaqt o'tishi bilan asta-sekin o'z muvozanat holatiga qaytishi mumkin. Bunday holatlarda elektr faol bo'lgan nuqsonlar elektr neytral nuqsonlarga o'tishi mumkin.

Eksiton deb, o'zaro bog'langan va doimo birlashib harakat qiladigan elektron va kovaklar juftiga aytiladi.

Eksiton o'ta past haroratlarda mavjud bo'ladi. Eksitonlar elektr faol nuqsonlar emas.

Har qanday kristallarda $T > 0K$ haroratlarda vakansiyalar hosil bo'ladi.

Vakansiya – o'z o'rnini tashlab ketgan atomning tugundagi o'рни.

Vakansiyalar konsentratsiyasi kristall panjaralarning tuzilishi va kimyoviy bog'lanishiga bog'liq. Vakansiyalar konsentratsiyasi (N_V) quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$N_V = N_S e^{-\frac{E_V}{kT}} \quad (3.1)$$

Bunda: N_S – tugunlardagi atomlar konsentratsiyasi, E_V – vakansiya hosil bo'lish energiyasi. Bu kremniy kristalida $N_S = 5 \cdot 10^{22} \text{ sm}^{-3}$, $E_V = 3 \text{ eV}$ ga teng.

Xona harorati ($T=300 \text{ K}$)da kremniydagi vakansiyalar konsentratsiyasi:

$$N_V = N_S e^{\frac{E_V}{kT}} = 5 \cdot 10^{22} e^{\frac{3}{0.6 \cdot 10^{-3} \cdot 200}} = 5 \cdot 10^{22} e^{-116.28} \\ = 5 \cdot 10^{22} \cdot 3.167 \cdot 10^{-51} = 1.583 \cdot 10^{-28} \text{ sm}^{-3}$$

$T=1473 \text{ K}$ ($T=1200^\circ\text{C}$) da kremniydagi vakansiyalar konsentratsiyasi:

$$N_V = N_S e^{\frac{E_V}{kT}} = 5 \cdot 10^{22} e^{\frac{3}{0.6 \cdot 10^{-3} \cdot 1473}} = 5 \cdot 10^{22} e^{-23.66} \\ = 5 \cdot 10^{22} \cdot 5.188 \cdot 10^{-11} = 2.594 \cdot 10^{12} \text{ sm}^{-3}$$

Albatta, o'z o'rnini tashlab ketgan atomlar kristall sirtiga chiqishi va yangi atom qatlami hosil qilishi mumkin. Bunday nuqsonlar **Frenkel nuqsonlari** deb ataladi. Agar atom o'z o'rnida vakansiya hosil qilib tugunlararo joylashsa, bunday nuqsonlar **Shottki nuqsonlari** deb ataladi. Ularning hammasi **termik (haroratli) nuqsonlardir**.

Radiatsion nurlanish (α, β, γ) natijasida paydo bo'ladigan birlamchi nuqson (vakansiya va tugunlararo atom) lar va ikkilamchi nuqson (vakansiya va tugunlararo atom) larning qo'shilishidan paydo bo'ladigan murakkab nuqsonlar – **radiatsion nuqsonlardir**.

Yarimo'tkazgich materiallarida kirishma atomlar holati yuqorida ko'rsatilgandek elektrfaol va elektr neytral bo'lishi mumkin.

Elektr faol kirishma atomlar o'z tabiatiga ko'ra, 3 xil vaziyatda uchraydi.

Agarda kirishma atomlardagi valent elektronlar soni yarimo'tkazgichdagi asosiy atomlarning valent elektronlaridan ko'p bo'lsa, ularda qo'shimcha erkin elektronlar paydo bo'ladi. Bunday atomlar – **donor kirishma atomlari** deyiladi.

Agar kirishma atomlarning valent elektronlar soni yarimo'tkazgich materiali asosiy atomlarini valent elektronlari sonidan kam bo'lsa, kovaklar paydo qiladi. Bunday kirishma atomlar – **akseptor kirishma atomlari** deyiladi.

Ba'zi bir kirishma atomlar yarimo'tkazgich kristall panjarasida elektronlarni kovaklarni ham o'zgarishiga olib kelishi mumkin, bunday kirishma atomlar – **amfoter kirishma atomlar** deyiladi.

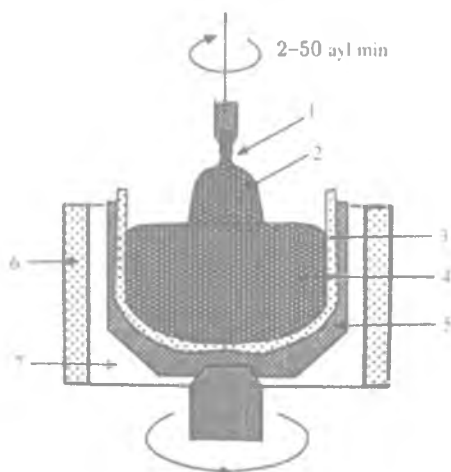
3.6. Yarimo'tkazgich materiallariga kirishma atomlar kiritish usullari

Yuqorida keltirilgandek. yarimo'tkazgichlarning fizik xossalarini, ya'ni ularni o'tkazuvchanlik, fotosezgirlik va magnit xossalarini juda katta ko'lamda boshqarishning asosiy yo'li bu – bunday materiallarga kerakli va aniq konsentratsiya miqdorida kirishma atomlar kiritishdir.

Hozirgi zamon texnologiyasi bo'yicha kirishma atomlar 3 xil yo'l bilan kiritiladi. Kristallarni o'stirish jarayonida, diffuziya va ion implantatsiya usuli bilan.

Monokristallarni berilgan yo'nalish bo'yicha o'stirish usullarining eng asosiylaridan biri bu **Choxral usulidir**.

Ushbu usul bilan o'stirilgan kremniy monokristalli quyidagi 3.11-rasmda keltirildi. Bunda polikristall kremniy maxsus kvars qozonchalarda yarimo'tkazgich materiallari suyultirilgan holda bo'lib ($T > 1415^{\circ}\text{C}$), bunday suyuqlik yuzasiga aniq yo'nalishiga ([111], [110], [101]) ega bo'lgan ingichka monokristall (zatravka) tushuriladi. Zatravka suyuq yarim o'tgazgichga tekkanidan so'ng, u o'z o'qida aylanish bilan birga asta-sekin ($1\div 3$) mm/min yuqoriga ko'tarila boshlaydi. Natijada o'sha zatravka yo'nalishiga mos holda, suyuq jism kristall holiga aylanadi.



3.9-rasm. Si monokristallini Choxralskiy usuli bilan o'stirish qurilmasining tasviri: 1 – Si zatrovkasi, 2 – Si monokristalli, 3 – SiO_2 qozoni, 4 – Si eritmasi, 5 – grafitli ushlagich, 6 – qizdirgich, 7 – inert gaz (Ar)



**Polikristall
kremniyni
eritish**

**Monokristall
(zatrovka) ni
tushurish**

**Monokristall
o'sishining
boshlanishi**

**Monokristallni
tortish**

**O'stirilgan
monokristall**

3.10-rasm. Choxral usuli bilan monokristall kremniyning olinishi



3.11-rasm. Choxral usuli bilan olingan Si monokristalli

Bunda suyuq holdagi eritmaga bo'lajak monokristallning qanday fizik parametrlariga ega bo'lishini ta'minlaydigan bor, fosfor, mishyak yoki boshqa kirishma atomlarini kerakli miqdorda qo'shib, ularning butun suyuqlik bo'yicha tekis taqsimoti ta'minlanadi. Kirishma atomlarining bunday usul bo'yicha kiritilishi, o'lchamlari har xil, ammo bir xil fizik parametrlarga ega bo'lgan monokristallarni olish uchun ishlatiladi.

Kirishma atomlarining yarimo'tkazgich kristallariga kiritishning ikkinchi usuli bu **diffuziya usuli** yordamida bajariladi.

Bu usul asosan kirishma atomlarini ma'lum bir yupqa qatlamlarda hosil qilish uchun ishlatiladi. Diffuziya usul bilan kiritilayotgan kirishma atomlar konsentratsiyasi ularning diffuziya qilinayotgan haroratdagi eruvchanligiga bog'liq. Qancha qalinlikka kirishi esa diffuziya koeffitsiyenti bilan chegaralanadi. Diffuziya usuli zamonaviy mikrosxemalar va diskret yarimo'tkazgichli asboblarni yaratish jarayonida asosiy texnologik jarayon hisoblanadi.

Kirishma atomlar kiritishning uchinchi usuli bu, kirishma atomlarini vakuumda maxsus yo'llar bilan ularning energiyasini oshirib, kristall yuzani kirishma atomlarining ionlari bilan bombardimon qilishdir.

Natijada kirishma atomlar ionlar energiyasiga mos holda yuzadan bir necha 10 Å dan bir necha 100 Å gacha chuqurlikka kiradi, ya'ni

yarimo'tkazgich materialining sirt yuzasidagi o'ta yupqa qatlam kirishma atomlari bilan boyitiladi. Bunday usulda kiritilgan atomlarni elektrfaol holiga keltirish uchun kristall ma'lum haroratda qizdiriladi, bundan tashqari kirishma atomlarning ionlari bilan bombardimon qilinganda kirishma atomlar yetib borgan joygacha radiatsion nuqsonlar hosil bo'ladi, agar ionlar energiyasi va miqdori yuqori bo'lsa, kristall yuzasi amorf holga kelishi mumkin. Bu usuldan foydalanganda kristall yuzasida xohlagan konsentratsiyadagi kirishma atomlarni paydo qilish mumkin.

3.7. Kirishma atomlar diffuziyasi

Diffuziya usuli bilan kirishma atomlarni kiritish hozirgi zamon mikroelektronikasida har xil murakkablikdagi integral sxemalarni yaratishda planar texnologiyaning eng asosiy bosqichlaridan biri hisoblanadi.

Diffuziya jarayoni 2 ta asosiy parametrlar: **kirishma atomlar eruvchanligi va ularning diffuziya koeffitsiyenti bilan aniqlanadi.**

Eruvchanlik – berilgan haroratda diffuziya yo'li bilan kristallga kiritish mumkin bo'lgan maksimal atomlar konsentratsiyasidir. Eruvchanlik kirishma atomlar radiusi, massasi va ularni tashqi elektron qobig'idagi elektronlar soni asosiy yarimo'tkazgich atomlaridan qanchalik farq qilganligiga bog'liq bo'ladi.

Bu farq qancha katta bo'lsa, kirishma atomlarining kristall panjara tugunlarida joylashish ehtimolligi shuncha kam bo'lishi bilan birga ularning eruvchanlik qiymatlari ham kam bo'ladi. Agar kirishma atomlar bilan yarimo'tkazgichning asosiy atomlari orasidagi farq qancha katta bo'lsa, bunday holda kirishma atomlar kristall panjara oralig'ida joylashish ehtimolligi katta bo'ladi. Bunday kirishma atomlar yarimo'tkazgich materiallarning kristall panjaralarida tugunlararo joylashgan nuqsonlarni hosil qiladi. Ularga: *Si* ga *Mn*, *Fe*, *Ni*, *Co*, ... larni misol qilish mumkin.

Agar kirishma atomlar bilan yarimo'tkazgich materialining asosiy atomlari orasidagi farq kam atomlarning kristall panjara tugunlarida

joylashish ehtimolligi katta bo'lishi bilan birga ularning eruvchanligi ham yuqori darajada bo'ladi.

Bunday yarimo'tkazgich materiallar o'rindosh kirishmali yarimo'tkazgich materiallar deb ataladi. Masalan, *Si* hamda *Ge* uchun *B*, *In*, *Ga*, *P*, *As*, *Sb*, ... kabi atomlarni misol qilish mumkin.

Kirishma atomlarning eruvchanligi haroratga bog'liqligi quyidagicha aniqlanadi:

$$N = N_0 \cdot e^{-\frac{E}{kT}} \quad (3.2)$$

bunda: N – berilgan haroratda kirishma atomlarning eruvchanligi, k – Boltsman doimiysi, T – harorat, E – eruvchanlik energiyasi, N_0 – harorat cheksiz bo'lganda eruvchanlik qiymati.

3.5-jadval

Kremniydagi ayrim kirishma atomlarining eng katta eruvchanlik qiymati

Element	Eng katta eruvchanlik, atom/sm ³	Eng katta eruvchanlik temperaturasi, °C
Alyuminiy	$2 \cdot 10^{19}$	1150
Bor	$4 \cdot 10^{20}$	1200
Vismut	$8 \cdot 10^{17}$	1300
Galli	$4 \cdot 10^{19}$	1250
Indiy	10^{19}	1300
Mishyak	$2 \cdot 10^{21}$	1150
Surma	$8 \cdot 10^{19}$	1300
Fosfor	$1,3 \cdot 10^{21}$	1150

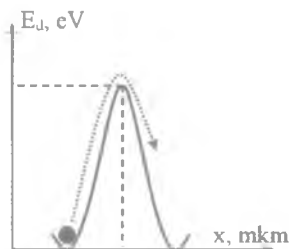
Kirishma atomlarning yarimo'tkazgich material sirtidan diffuziya natijasida hajm bo'ylab kirib borish tezligini ko'rsatadigan kattalik bu **diffuziya koeffitsiyentidir**.

Diffuziya koeffitsiyentining qiymati ham kirishma atomlarning parametrlari va diffuziya tezligiga bog'liq bo'ladi.

$$D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) \quad (3.3)$$

Bunda: D_0 – harorat cheksiz bo'lgandagi diffuziya koeffitsiyenti, E_d – diffuziyani faollashtirish energiyasi.

Diffuziyani faollashtirish energiyasi – bu atomlarning kristall panjara ichida bir muvozanat holatdan ikkinchi muvozanat holatga o'tishi uchun zarur bo'ladigan energiyadir.



3.12-rasm. Atomlarning kristall panjara ichida bir muvozanat holatdan ikkinchi muvozanat holatga o'tishi

Agar kirishma atomlar tugunlar bo'yicha diffuziya qilinadigan bo'lsa, unda E_d ning qiymati tugunda turgan atomning 3 ta qo'shni atom bilan bog'lanishni uzishi uchun va qo'shni tugunda vakansiya paydo bo'lishi uchun kerak bo'lgan energiyalar yig'indisiga teng bo'ladi. Bunday kirishma atomlar uchun Si da E_d qiymati $E_d=3\div5$ eV ga teng bo'ladi. Agar atom tugunlararo diffuziya qilinayotgan bo'lsa, unda E_d qiymat atom turgan tugunlararo joyidan qo'shni shunday

joyga o'tishi uchun zarur bo'lgan energiya (atom 2 ta tugun orasidan o'tayotganda tashqi qobiq elektronlar o'zaro itarilish kuchlarini yengishi uchun sarf qilinayotgan energiya). Bunday kirishma atomlar uchun E_d qiymati $E_d=0,5\div2,5$ eV atrofida bo'ladi.



3.13-rasm. Tugunlararo diffuziya

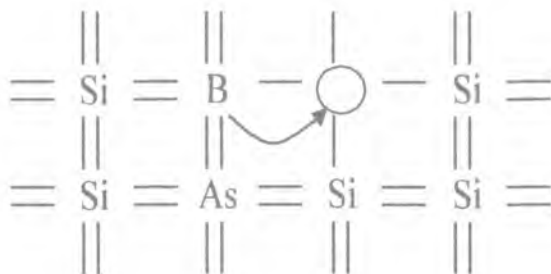
Masalan, *Li* va *Fe* atomlarining *Si* da $T=1000^{\circ}\text{C}$ haroratdagi diffuziya koeffitsiyenti $D_{\text{Li}}\sim 10^{-3}$ sm^2/s , $D_{\text{Fe}}\sim 10^{-6}$ sm^2/s . Bor (*B*) yoki fosfor (*P*) ni $T=1200^{\circ}\text{C}$ haroratda diffuziya koeffitsiyenti $D_{\text{B}}=10^{-12}$ sm^2/s , $D_{\text{P}}=2\cdot 10^{-12}$ sm^2/s ga teng bo'ladi.

3.6-jadval

Kremniyda kirishma atomlarining diffuziya parametrlari

Element	D_0 , sm^2/sek	Q , eV	ΔT
H	$9,4 \cdot 10^{-3}$	0,48	967–1207
Li	$4,4 \cdot 10^{-3}$	0,78	450–1000
	$2,3 \cdot 10^{-3}$	0,65	360–860
	$2,2 \cdot 10^{-3}$	0,70	420–800
	$2,5 \cdot 10^{-3}$	0,66	25–125
			80–1350
	$2,65 \cdot 10^{-3}$	0,62	400–500
Cu	$4 \cdot 10^{-2}$	1,0	800–1100
	$4,7 \cdot 10^{-3}$	0,43	400–700
Ag	$2,0 \cdot 10^{-3}$	1,59	1100–1350
Au	$1,1 \cdot 10^{-3}$	1,11	800–1200
	$2,44 \cdot 10^{-4}$ ^{vv}	0,38	700–1300
	$2,75 \cdot 10^{-3}$ ^{vv}	2,0	
Na	$1,65 \cdot 10^{-3}$	0,72	520–820
K	$1,1 \cdot 10^{-3}$	0,75	530–790
Zn	0,1	1,4	980–1270

B	10,5	3,66	
	3,2	3,5	
	17,1	3,66	
	15,8	3,7	
	10,7	3,64	
	25	3,51	
	$6 \cdot 10^{-7}$	1,68	700÷1150
Al	8	3,45	
	4,8	3,34	1100÷1400
	2800	3,77	
Ga	3,6	3,49	
	270	4,15	
	2,1	3,5	
In	16,5	3,89	
	19,4	3,86	
Te	16,5	3,88	
Sn	32	425	1050÷1200
C	0,33	2,92	1070÷1400
Si	1800	4,86	1220÷1400
	9000	5,14	1100÷1300
Ge	$6,26 \cdot 10^3$	5,28	1150÷1350
P	10,5	3,66	
	29	3,88	
As	0,32	3,55	
	68,6	4,25	
Sb	5,6	3,92	
	12,9	3,95	
Bi	1030	4,6	
O	0,21	2,55	
		3,5	
S	0,92	2,2	1050÷1360
Cr	0,01	1	900÷1250
Fe	$1,6 \cdot 10^{-3}$	0,65	1000÷1300
He	0,11	1,26	
Se	0,9	2,44	1000÷1300
Mn	$2,6 \cdot 10^{-1}$	1,3	1000÷1300
Ni	$2,3 \cdot 10^{-3}$	0,47	1000÷1300
Co	$8,5 \cdot 10^{-4}$	0,51	1000÷1300



3.14-rasm. Ba'zi elementlarni Si kristalliga diffuziya yo'li bilan kiritish

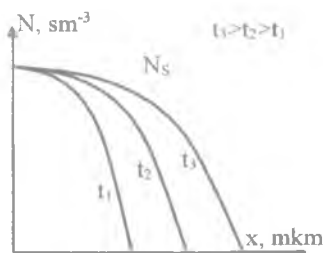
Diffuziya jarayonida berilgan vaqtda kirishma atomlarning hajm bo'yicha taqsimoti diffuziya vaqtidagi kirishma atomlar miqdoriga qarab, 2 xil bo'lishi mumkin.

Agar diffuziya jarayonida jism sirtidagi yoki diffuziya kechayotgan muhitda kirishma atomlar konsentratsiyasi kirishma atomlarning diffuziya bo'layotgan haroratdagi eruvchanligidan juda katta bo'lsa, ya'ni diffuziya jarayonida kirishma atomlarning sirtidagi qiymati deyarli o'zgarishsiz qolsa, bunday holat **chegaralanmagan manbadan diffuziya** deyiladi.

Bunday holatda kirishma atomlar (diffuziya qilingan atomlar) ning kristall qalinligi bo'yicha taqsimoti quyidagi tenglik bilan aniqlanadi.

$$N = N_s \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (3.4)$$

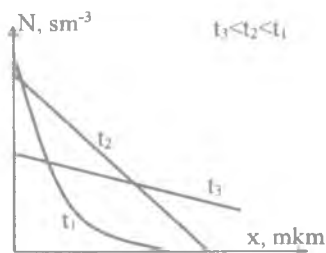
Bunda: D – diffuziya koeffitsiyenti, t – diffuziya vaqti, x – diffuziya chuqurligi, N_s – kirishma atomlarning sirtidagi konsentratsiyasi, erfc – xatoliklarning qo'shimcha funksiyasi.



3.15– rasm. Cheksiz manbadan diffuziya qilinganda kirishma atomlarining kristalldagi taqsimoti

Bunday holatda *cheksiz manbadan bo'layotgan diffuziya holati* deyiladi.

Agar diffuziya jarayonida kirishma atomlarning jism sirtidagi konsentratsiyasi o'zgarib boradigan bo'lsa, bunday holat **chegaralangan manbadan diffuziya** deyiladi.



3.16-rasm. Chekli manbadan diffuziya qilinganda kirishma atomlarining kristalldagi taqsimoti (turli xil vaqtda diffuziya qilingan)

Bunday holatda kirishma atomlar (diffuziya qilingan atomlar) ning kristall qalinligi bo'yicha taqsimoti quyidagi tenglik bilan aniqlanadi.

$$N(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \quad (3.5)$$

Bunda: Q – diffuziya vaqtida 1sm^2 yuzadan yarimo'tkazgichga kiritilgan kirishma atomlari miqdori, D – diffuziya koeffitsiyenti, t – diffuziya vaqti, x – diffuziya chuqurligi.

3.8. Kirishma atomlarning eruvchanligi

Kirishma atomlarning kristalda eruvchanligi deb, berilgan haroratda diffuziya natijasida kristallga kiritish mumkin bo'lgan atomlarning maksimal konsentratsiyasiga aytiladi.

Demak, berilgan haroratda eruvchanlikdan ortiqcha atomlarni kristall panjaraga kiritish mumkin emas. Eruvchanlik haroratga bog'liq bo'lib, harorat oshishi bilan eksponensial qonuniyat bilan oshib boradi va quyidagi munosabat bilan aniqlanadi:

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (3.6)$$

Bunda: $N_0 - T = \infty$ bo'lgandagi eruvchanlik, E – eruvchanlik energiyasi, k – Boltsman doimiysi.

Kristall panjaraga diffuziya usuli bilan kiritilgan kirishma atomlar 2 xil holatlarda bo'lishi mumkin – tugunlarda yoki tugunlararo.

Nazariy hisoblashlar shuni ko'rsatadiki, kirishma atomlarning tugunlarda joylashishi uchun quyidagi shartlar bajarilishi lozim. Yarimo'tkazgichning asosiy atomlari va kirishma atomlar radiuslari bir-biriga juda yaqin bo'lishi va ularning farqi 14% dan oshmasligi kerak. Shu bilan birga asosiy va kirishma atomlarning tashqi qobig'idagi elektronlar soni ham juda kam farq qilishi kerak. Masalan, *Ge* atomlarining valent elektronlarni soni atom radiusi hamda kristall tuzilishlari *Si* atomlaridan juda kam farq qilganligi uchun *Ge* va *Si* kristallarida cheksiz eruvchanlik xususiyatiga ega.

Kirishma atomlarning tugunlararo joylashishi uchun kirishma atomlardan asosiy atomning radiusi qancha kam bo'lishi va ularning valent elektronlari yarimo'tkazgichning asosiy atomlarini valent elektronlaridan qancha ko'p farq qilishi asosiy sabab hisoblanadi.

Masalan, *Li* atomlari kremniy kristallida 100% tugunlar orasida joylashadi. Ammo juda ko'p kirishma atomlari bir vaqtning o'zida ham tugunlarda ham tugunlar orasida joylashishi mumkin. Masalan, *Cu, Fe, Mn, Ni*-atomlari kremniy panjarasida shunday holatlarda bo'ladi. Kirishma atomlarning diffuziya koeffitsiyenti bilan ularning eruvchanligi o'rtasida ma'lum bog'lanish bor, ya'ni diffuziya koeffitsiyenti qancha katta bo'lsa, ularning eruvchanligi shuncha kam bo'ladi.

Diffuziya yo'li bilan kiritilgan atomlarning hammasi ham elektr faol bo'lmaydi, ya'ni taqiqlangan sohada biror energetik sath hosil qilib, qo'shimcha elektron yoki kovak hosil qilmaydi. Bunday xususiyat ko'proq diffuziya koeffitsiyenti katta bo'lgan va asosan tugunlar orasida joylashgan kirishma atomlarga xosdir. Masalan, nikel kirishma atomlarining $T=1250^{\circ}\text{C}$ da eruvchanligi $N=(4\div 5)10^{17}\text{ sm}^{-3}$ ga teng, ulardan faqat $4\cdot 10^{14}\text{ sm}^{-3}$ qismigina elektrfaol atom hisobida va ikkita akseptor energetik sathi hosil qiladi. Kiritilgan atomlarning asosiy qismi 99.9% elektr neytral holatda qolib, har xil nuqsonlar bilan birikmalar hosil qiladi. Shunday xususiyatga *Fe, Mn, Co, Cd, ...* va boshqa elementlar ham ega.

Kirishma atomlarning eruvchanligiga ta'sir etadigan yana bir kattalik bu ularning **segregatsiya koeffitsiyenti** – k hisoblanadi. Bu kattalik kirishma atomlarining yarimo'tkazgich materiallarida ularning erigan (N_v) (suyuq) va qattiq jism (N_s) holatlarini, ya'ni fazaviy muvozanat holatidagi konsentratsiyalarning nisbatiga teng.

$$k = \frac{N_{qattiq}}{N_{suyuq}} \quad (3.7)$$

bunda: k – kirishma atomlar tabiatiga bog'liq bo'lib, u qancha katta bo'lsa, ya'ni birga yaqinlashsa, uning eruvchanligi shuncha katta bo'ladi.

Quyida kremniy kristallida ba'zi kirishma atomlarning eruvchanligi va segregatsiya koeffitsiyentining qiymatlari keltirildi.

3.7-jadval

Kremniya kirishma atomlarning eruvchanlik va segregatsiya koeffitsiyenti

№	Kirishma		Maksimal eruvchanlik, t/sm ⁻³	Segregatsiya koeffitsiyenti, %	Maksimal eruvchanlik harorati, °C
1.	Cu	Mis	$3 \cdot 10^{18}$	$2.5 \cdot 10^{-1}$	1300
2.	Ag	Kumush	$2 \cdot 10^{17}$		1350
3.	Au	Oltin	$1 \cdot 10^{17}$	$3 \cdot 10^{-5}$	1250
4.	Li	Litiy	$4 \cdot 10^{19}$	$1.3 \cdot 10^{-2}$	1200
5.	B	Bor	10^{20}	0,9	1200
6.	Al	Aluminiy	$1.7 \cdot 10^{20}$	10^{-1}	1200
7.	In	Indiy	10^{19}	$5 \cdot 10^{-1}$	1200
8.	P	Fosfor	$2 \cdot 10^{20}$	0,35	1200
9.	As	Mishyak	10^{20}	0,3	1200
10.	Sb	Surma	10^{20}	0,4	1200
11.	Zn	Rux	10^{17}	$4 \cdot 10^{-1}$	1250
12.	Mg	Magniy	10^{16}		1250
13.	Cd	Kadmiy	10^{16}		1250
14.	Hg	Simob	10^{16}		1270
15.	Sc	Skandiy	10^{16}		1250
16.	V	Vanadiy	10^{16}		1250
17.	Sn	Qalay	10^{21}		1350
18.	Ge	Germaniy	10^{22}		1430
19.	Cr	Xrom	10^{16}		1200
20.	Fe	Temir	$5 \cdot 10^{16}$	$8 \cdot 10^{-6}$	1250
21.	Co	Kobalt	$2 \cdot 10^{16}$		1250
22.	Ni	Nikel	$7 \cdot 10^{17}$		1250
23.	Mn	Manganets	$2 \cdot 10^{16}$		1250
24.	Re	Reni	10^{16}		1250
25.	Ru	Ruteniy	10^{17}		1260
26.	Os	Osmiy	10^{16}		1300
27.	Rn	Radon	10^{16}		1250
28.	Ir	Iridiy	$5 \cdot 10^{16}$		1250
29.	Pd	Palladiy	$4 \cdot 10^{16}$		1250
30.	Pt	Platina	10^{16}		1250
31.	Sm	Samariy	10^{18}		1300
32.	Gd	Gadoliniy	10^{18}		1300
33.	Ho	Golmiy	10^{17}		1300
34.	O	Kislorod	$1.7 \cdot 10^{18}$		1250
35.	S	Oltingugu	$5 \cdot 10^{16}$		1250
36.	Se	Selen	10^{17}		1250
37.	Te	Tellur	$5 \cdot 10^{17}$		1250
38.	Mo	Molibden	10^{15}		1200
39.	W	Volfram	10^{15}		1200

Shuni ta'kidlash lozimki, ba'zi kirishma atomlarning eruvchanligi hamma vaqt ham (3.7) ifoda bilan aniqlanmaydi. Ularning maksimal eruvchanligi ma'lum haroratgacha o'sib borib keyin kamayadi. Masalan, Cu atomlarini kremniydagi maksimal eruvchanligi $T=875^{\circ}C$ da $N=4 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ ga teng bo'lib, keyin harorat oshishi bilan kamayadi.

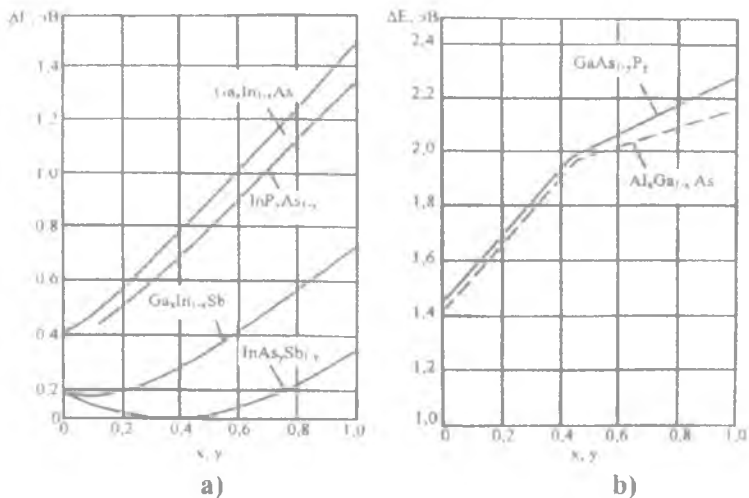
3.9. Binar yarimo'tkazgich materiallarida kirishma atomlarning eruvchanligi

Mendeleyev davriy jadvalidagi III va V guruh elementlari hamda II va VI guruh elementlari birikishidan hosil bo'lgan yarimo'tkazgich materiallar – binar yarimo'tkazgich materiallar deyiladi. Ular quyidagicha belgilanadi: $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$.

Elementar yarimo'tkazgich materiallar kremniy va germaniydan farqli holda $A^{III}B^V$ yoki $A^{II}B^{VI}$ birikmali yarimo'tkazgich materiallarda kirishma atomlarning tugundagi holati har xil bo'ladi. Bunga sabab kirishma atom Si , $GaAs$ da Ga atomining o'rnini egallasa, donor sifatini namoyon qiladi. Agar u As atomining o'rnini egallasa, akseptor kirishma atomi sifatida namoyon bo'ladi. Shu bilan birga Si kirishma atomining $GaAs$ dagi eruvchanligi ham uning qanday turganiga bog'liq bo'ladi. Chunki yuqori haroratda diffuziya qilinganda $GaAs$ kristallida As atomlari o'rnida ko'proq vakansiyalar hosil bo'ladi. Shunga mos holda kirishma atomlar As atomining o'rnini egallaydi. Aksincha pastroq haroratda ($T < 800^{\circ}C$) kirishma atomlari diffuziya qilinganda ularning Ga atomlari o'rnida joylashish ehtimoli oshadi.

Ta'kidlab o'tish kerakki, $A^{III}B^V$ va $A^{II}B^{VI}$ birikmalari yarimo'tkazgich materiallarida izovalent (valentligi bir xil) kirishma atomlarining diffuziyasi tufayli, tubdan yangi murakkab yarimo'tkazgich materiallarni olish mumkin. Masalan, $GaAs$ kristalliga III guruh elementlaridan Zn yoki Al diffuziya qilinganda ular Ga atomi o'rnini egalladi va eruvchanligi juda katta bo'ldi. Masalan, Zn kirishma atomlariga bir necha % kiritish yo'li bilan yangi $Zn_{1-x}Ga_xAs$ – material hosil qilinadi. Endi, Zn atomlari qisman Ga atomlari o'rnini egallagani uchun hech qanday energetik sath hosil

qilmay. kimyoviy bog'lanishni buzmagan holda yangi murakkab elementar panjara $Zn_{1-x}Ga_xAs$ ni hosil qiladi. Bunday panjaraning fundamental parametrlari – taqiqlangan soha kengligi, zaryad tashuvchilar harakatchanligi $GaAs$ dan tubdan farq qiladi. Bu parametrlarni Zn ning eruvchanligini oshirish yo'li bilan to ZnS emateriallarining fundamental parametrlarigacha o'zgartirish mumkin (3.17-rasm) bo'ladi.



3.17-rasm. Taqiqlangan soha kengligining $A^{III}B^V$ birikmalar asosidagi qattiq jismlar tarkibiga bog'liqligi ($T=300K$):

- a) birikmalar – sodda energetik soha tuzilishiga ega juftliklar;
- b) birikmalar – murakkab energetik soha tuzilishiga ega juftliklar.

Xuddi shunday V guruh elementlarining atomlarini $A^{III}B^V$ dagi eruvchanligi juda katta ekanligi hisobiga ularni diffuziya qilish yo'li bilan yangi turdagi yarimo'tkazgich $GaAs_{1-x}P_x$ yoki $GaAs_{1-x}Sb_x$ materiallar olindi. $A^{II}B^{VI}$ yarimo'tkazgich materiallariga izovalent II yoki VI guruh elementlarini diffuziya usuli bilan kiritib yangi – $Cd_{1-x}Zn_xS$, $CdS_{1-x}Se_x$ – materiallarni olish mumkin. Izovalent kirishma atomlarining $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$ – birikmalari yarimo'tkazgich

materiallarida cheksiz eruvchanligi nafaqat yangi murakkab yarimo'tkazgich materiallarini yaratish imkoniyatini beradi, balki bitta kristallda ma'lum qalinlikka ega bo'lgan yangi turdagi geteroo'tishlarni yaratish imkonini beradi. Masalan, $Ga_{1-x}Al_xAs$ – $GaAs$ va shunga o'xshash. Bunday yangi turdagi geteroo'tishlar o'ta faol ishlaydigan va boshqariladigan yarimo'tkazgich samaradorligi yuqori bo'lgan lazerlar va quyosh elementlarni yaratish imkoniyatini oshiradi.

Sinov savollari:

1. Yarimo'tkazgichlarning metallardan asosiy farqi nimalardan iborat?

2. Yarimo'tkazgichlarda kimyoviy bog'lanish tabiati qanday?

3. Si , $GaAs$ va Cd materiallarda kimyoviy bog'lanishni ko'rsating.

4. Yarimo'tkazgich materiallarining qanday kristall tuzilishlari mavjud?

5. Kristall panjara nuqsonlari deb nimaga aytiladi, nuqtaviy nuqson nima?

6. Frenkel va Shottki nuqsonlari qanday nuqsonlar?

7. Nuqsonlarsiz kristall olish mumkinmi?

8. Haroratga o'ta sezgir nuqsonlar bu...?

9. Yarimo'tkazgichlarga kirishma atomlarni qanday usul bilan kiritish mumkin?

10. Diffuziya nima va u qachon yuz beradi?

11. Kirishma atomlarning diffuziya koeffitsiyenti nimalarga bog'liq?

Yarimo'tkazgichlarda kirishma atomlar va nuqsonlar mavzusiga doir masalalar:

1. II guruh elementlari Zn , Cd kremniyda (agar ular tugunda Si atomning o'rnini egallagan bo'lsa) qanday holatda bo'ladi va nechta energetik sath hosil qiladi?

2. IV guruh elementlari kirishma atom sifatida kremniyda qanday holatda bo'ladi? Ular qanday energetik sathlar hosil qiladi?

3. VI guruh elementlari Si panjarasida qanday energetik sathlar hosil qilishi mumkin?

4. *IV* guruh elementlaridan *Si* va *Ge* atomlari *GaAs* – kristallida qanday holatlarda bo‘ladi (agar ular *Ga* yoki *As* atomlari tugunlarida joylashgan bo‘lsa)?

5. *VI* guruh elementlaridan *Se* va *Te* *ZnAs* kristall panjarasida qanday holatda bo‘ladi?

6. *V* guruh elementlari *R*, *As*, *Sb* atomlari *ZnS* kristall panjarasida qanday holatlarda bo‘ladi?

7. Muvozanatdagi vakansiyalar konsentratsiyasi kremniy kristallida quyidagi ifoda orqali aniqlanadi.

$$N_v = 5 \cdot 10^{22} \exp\left(-\frac{3}{kT}\right) \quad (3.8)$$

Bunda: harorat $T=500, 1000$ va 1500 K da vakansiyalar konsentratsiyasini aniqlang.

8. Kremniy kristallida $N_v=3 \cdot 10^{11} \text{ sm}^{-3}$ vakansiyalar hosil qilishi uchun uni qanday haroratgacha qizdirish kerak?

9. Agar kristall panjarada kirishma atomlari tekis taqsimlangan bo‘lsa, konsentratsiya $N=10^{15} \text{ sm}^{-3}$ ga teng bo‘lgandagi kirishma atomlari orasidagi masofani toping.

10. *GaAs* va *ZnSb* kristallarida hosil bo‘ladigan vakansiyalar tabiatini tushuntirib bering. Bunda vakansiyalar *Si* va *Ge* kristallaridagi vakansiyalardan qanday farq qiladi?

Yarimo‘tkazgichlardagi kirishma atomlar va nuqsonlar mavzusiga doir masalalarning yechilishi:

1. Masalaning berilishi: muvozanat holatdagi vakansiyalar konsentratsiyasi kremniy kristallida quyidagi ifoda orqali aniqlanadi

$$N_v = 5 \cdot 10^{22} \exp\left(-\frac{3}{kT}\right)$$

Bunda: harorat $T= 1000$ K da vakansiyalar konsentratsiyasini aniqlang?

Masalaning yechilishi: muvozanat holatdagi vakansiyalar konsentratsiyasini kremniy kristallida aniqlanish ifodasidan foydalanamiz.

$$N_v = 5 \cdot 10^{22} \exp\left(-\frac{3}{kT}\right)$$

Bunda: k –Boltsman doimiysi bo‘lib, uning qiymati ($k=8,61 \cdot 10^{-5}$ eV/Kl) ni ifodaga qo‘yib, harorat $T=1000$ Kda kremniy kristallida hosil bo‘lgan vakansiyalar konsentratsiyasini aniqlaymiz.

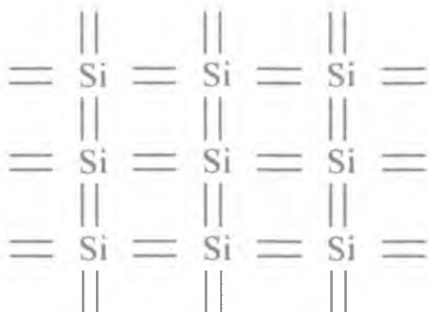
$$\begin{aligned} N_v &= 5 \cdot 10^{22} \exp\left(-\frac{3}{kT}\right) = 5 \cdot 10^{22} \exp\left(-\frac{3}{8,61 \cdot 10^{-5} \cdot 1000}\right) \\ &= 5 \cdot 10^{22} \exp(-34,84) = 5 \cdot 10^{22} \cdot 10^{-15,14} \\ &= 5 \cdot 10^{22} \cdot 10^{-16} \cdot 10^{0,86} = 5 \cdot 7,24 \cdot 10^6 \\ &= 36,2 \cdot 10^6 \text{ sm}^{-3} = 3,6 \cdot 10^7 \text{ sm}^{-3} \end{aligned}$$

Demak, harorat $T=1000$ °K da kremniy kristallida hosil bo‘ladigan vakansiyalar konsentratsiyasi $N_v = 3,6 \cdot 10^7 \text{ sm}^{-3}$ ni tashkil etar ekan.

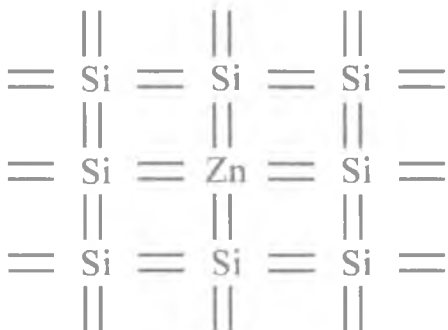
2.Masalaning berilishi: II guruh elementi Zn kremniyda (agar tugunda Si atom o‘rnini egallagan bo‘lsa) qanday holatda bo‘ladi va qancha energetik sath hosil qiladi?

Masalaning yechilishi: kremniy elementining tashqi qobig‘ida to‘rtta elektroni bo‘lib, bitta kremniy to‘rtta kremniy bilan kovalent bog‘lanishi hisobiga olmos ko‘rinishidagi tetraedrik kristall panjara hosil qiladi.

Agar II guruh elementi Zn kremniyning kristall panjarasida tugunda joylashib, Si atomining o‘rnini egallagan bo‘lsin, u holda Zn ikkinchi guruh elementi tashqi qobig‘ida ikkita elektron bo‘lganligi uchun kristall panjarada ikkita elektron bog‘lanish yetmaydi. Ya’ni, ikkita kovak hosil bo‘lib qoladi. Bundan ko‘rinadiki, kristall panjarada elektronlarni yutuvchi, kovaklarni itaruvchi markaz kremniyning taqiqlangan sohasida hosil bo‘lishiga sabab bo‘ladi. Demak, kremniyga rux atomi kiritilganda ikkita akseptor sath hosil bo‘ladi, bular: $E_v + 0,26$ eV va $E_v + 0,55$ eV larni tashkil qiladi.



3.18-rasm. Kremniy (Si) ning kovalent bog'lanishi



3.19-rasm. Kremniy(Si) elementiga rux (Zn) atomi kiritilgandagi holat

4. YARIMO'TKAZGICHLARDA ZARYAD TASHUVCHILAR STATISTIKASI

4.1. Yarimo'tkazgichlarda tok o'tkazish mexanizmi

Qattiq jismlardan o'tayotgan tok zichligi J materialning solishtirma elektr o'tkazuvchanligi va unga qo'yilgan maydonga to'g'ri proporsionaldir.

$$J = \sigma E \quad \text{yoki} \quad J = E/\rho \quad (4.1)$$

ρ —materialning solishtirma qarshiligi, ρ va σ larning qiymatlari material tabiatiga bog'liq. Ikkinchi tomondan tok zichligi J vektor kattalik bo'lib, kesim yuzasidan vaqt birligida o'tayotgan zaryad tashuvchilar miqdorini ko'rsatadi. Agar tok tashuvchilar (elektronlar)ning tezligi bir xil deb hisoblansa, unda tok zichligi quyidagiga teng bo'ladi:

$$J = -env \quad (4.2)$$

e —elektronning zaryadi, n — elektronlarning konsentratsiyasi, v — elektronlarning dreyf tezligi. Tok yo'nalishi elektronning dreyf tezligi yo'nalishiga teskari bo'lgani uchun tenglik oldida «-» (minus) ishorasi qo'yilgan. Elektr maydon qo'yilmaganda elektronlar xotik harakat qilganligi tufayli ular tezliklarining vektor yig'indisi nolga teng bo'ladi. Demak, tok zichligi ham nolga teng bo'ladi.

Elektron tashqi elektr maydoni ta'sirida tezlanish oladi: $a = \frac{eE}{m}$. Erkin yugurish vaqti (t) davomida elektron quyidagi dreyf tezlikka erishadi: $v = a \cdot t = \frac{eE}{m} \cdot t$.

Demak, elektron ikkita to'qnashish orasida o'z tezligini $a = \frac{v}{t} \rightarrow eE = \frac{mv}{t} \rightarrow v = \frac{eEt}{m}$ ga o'zgartiradi.

Elektron har bir to'qnashganidan so'ng, ya'ni o'z yo'nalishini ma'lum yo'nalish bo'yicha o'zgartirgan holda yana tezligi shunday

qiymatga oshadi. Bunda t – elektronning elektr maydon taʼsirida nomuvozanat holatidan chiqib, soʻngra muvozanat holatiga qaytishi kerak boʻlgan relaksatsiya vaqti va u τ bilan ifodalanadi ($t=\tau$). Unda elektronning oʻrtacha dreyf tezligi $v = -eE\tau/m$ ni (4.2) ifodaga qoʻyib, quyidagi ifoda keltirib chiqariladi:

$$J = \sigma E \rightarrow \sigma = en\mu \rightarrow \mu = \frac{e\tau}{m} \rightarrow$$

$$J = en \cdot \frac{e\tau}{m} \cdot E \quad (4.3)$$

Bunda μ – harakatchanlik.

Elektr maydon kuchlanganligi birga teng boʻlgandagi elektronlarning dreyf tezligiga teng boʻlgan kattalik **zaryad tashuvchilarning harakatchanligi** deyiladi $\mu = \frac{v_{dreyf}}{E}$, uning birligi $\left[\frac{cm^2}{Vs} \right]$.

Demak, qattiq jismlarning elektr oʻtkazuvchanligi (σ) ni aniqlaydigan asosiy parametr bu – elektronlarning konsentratsiyasi (n) va harakatchanligi (μ) ekan. Zaryad tashuvchilarning harakatchanligi yarimoʻtkazgich materiallarida juda katta ahamiyatga ega. Bu kattalik yarimoʻtkazgichlarning tabiati, energetik soha tuzilishi, undagi kirishma atomlarining konsentratsiyasi, harorati, elektr maydon va boshqa taʼsirlarga qarab juda katta oraliqda oʻzgarishi mumkin.

4.2. Yarimoʻtkazgichlarda zaryad tashuvchilar tabiati

Yarimoʻtkazgichlarda kimyoviy bogʻlanish asosan kovalent bogʻlanish boʻlganligi sababli hamma valent elektronlar kimyoviy bogʻlanishda toʻla qatnashadi. Demak, bunday materiallarda erkin elektronlar boʻlmaydi. Erkin elektronlar boʻlishi uchun, kimyoviy bogʻlanishda qatnashayotgan valent elektronlar kimyoviy bogʻlanishni uzishi va oʻz atomidan uzoqlashishi kerak. Buning uchun elektron maʼlum miqdorda bogʻlanish energiyasini uzishiga yetarli energiyani

olishi lozim. Bu energiya issiqlik yoki yorug'lik energiyasi bo'lishi mumkin. O'ta past haroratlarda valent elektronlar erkin elektronlar holatiga o'tish ehtimolligi juda kam bo'lganligi uchun yarimo'tkazgich materiallar juda yaxshi dielektrik holatiga o'tadi. Endi bunday materiallarda o'tkazuvchanlik bo'lishi uchun kovalent bog'lanishda ishtirok etayotgan valent elektronlar ozod etiladi va erkin elektronlar holatiga o'tadi. O'z atomidan uzoqlashgan erkin elektronlarni boshqa hech qanday atomlar yutib olishi mumkin emas. Chunki ularning tashqi elektron qobiqlari to'lgan.

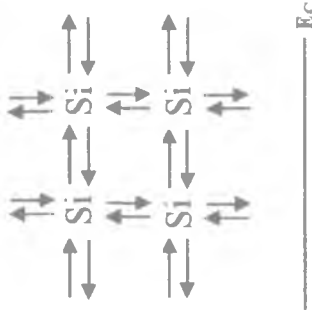
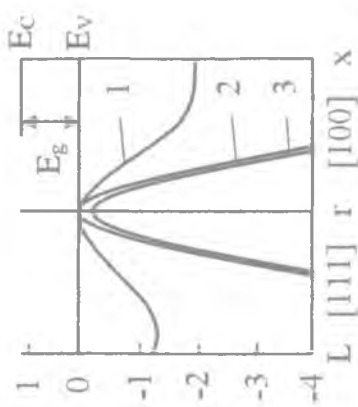
Demak, yarimo'tkazgichlarda valent elektronlarning ikki holati mavjud bo'lar ekan. Bu kovalent bog'lanishda qatnashgan **bog'langan elektron holat** va bog'lanishdan uzilgan **erkin holat**.

Elektronlarning bog'langan holati **valent sohasi**, erkin holatini esa **o'tkazuvchanlik sohasi** deb qabul qilingan.

Chunki elektron faqat erkin holatdagina zaryad tashishda qatnashishi mumkin. Bu uning o'tkazuvchanlik sohasida bo'lishini anglatadi.

Bog'langan valent elektronlarni erkin holatga olib chiqish uchun zarur bo'lgan energiya, ya'ni elektronning bog'lanish energiyasini uzish uchun kerak bo'lgan energiya **taqiqlangan soha kengligi** deb ataladi.

Haqiqatdan ham yarimo'tkazgichlarda asosiy atomlarning valent elektronlari bog'langan yoki erkin holatda bo'lar ekan. Berilgan energiya elektronni ozod qilishga yetarli bo'lmasa, elektron o'zi bog'langan holatida qolaveradi, ya'ni u bunday energiyani qabul qilmaydi. Demak, $E < E_{bog.} = E_g$ dan kam bo'lsa, elektron o'z holatida qoladi. Shuning uchun ham elektron faqat bog'langan yoki erkin holatlarda ya'ni elektron valent energetik sohasida yoki o'tkazuvchanlik energetik sohasidagina bo'ldi, ular oralig'idagi energetik sohalarda bo'lishi mumkin emas.

uz. Valent soha ru Валентная зона en Valence band	Mutloq nol haroratda elektronlar bilan to'lgan eng yuqoridagi energetik soha – valent soha deyiladi. $T=0K$ haroratda elektronlar atomga bog'langan bo'ladi. Misol uchun: Si 	Kristallda sohalar tuzilishi (strukturasi) ga qarab, valent sohalar yetarlicha murakkab bo'lishi mumkin  <i>Krenniyning valent sohasi: 1-og'ir kovaklar, 2-yengil kovaklar, 3-spin orbital ta'sirlashish</i>
--	---	--

uz. O'tkazuvchanlik

sohasi

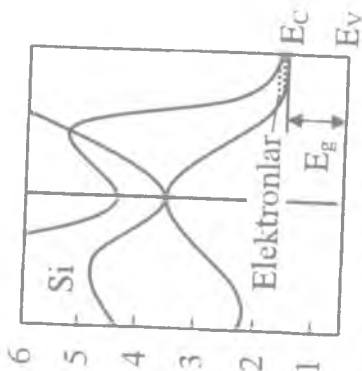
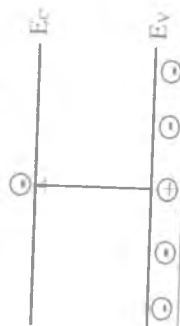
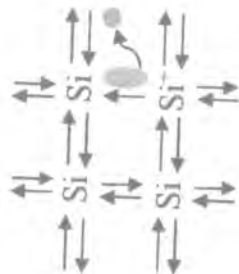
ru Зона

проводимости

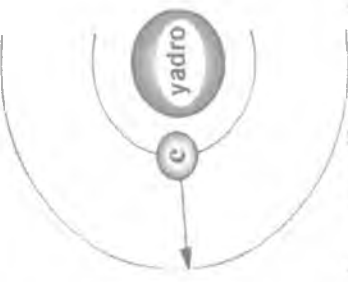
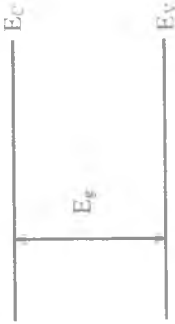
en. Conduction

band

Tashqaridan yetarli darajadagi energiya bilan ta'sir etilganda (harorat, yorug'lik, elektr maydoni va h.k.) elektronlarning valent bog'larini uzib erkin holatda zaryad tashishda qatnashishini ifodalovchi soha — o'tkazuvchanlik sohasidir. O'tkazuvchanlik sohasining energetik tuzilishi kristall panjara tabiati va elektronlarning bog'lanish energiyasiga bog'liq.



Kremniyning o'tkazuvchanlik sohasi

	Kremniy kristalli	Elektron qancha yadroga yaqin joylashgan bo'lsa, uni urib chiqarishga shuncha ko'p energiya kerak bo'ladi.
uz. Taqiqlangan soha ru. Запрещенная зона en. Forbidden band	Yarimo'tkazgichlarda hamma valent elektronlar kimyoviy bog'lanishda qatnashganligi tufayli $T=0K$ da erkin elektronlar bo'lmaydi. Berilgan issiqlik yoki yorug'lik hisobiga kimyoviy bog'lanishda ishtirok etgan elektronlarga ma'lum energiya berib ozod qilish mumkin. Ana shunda bu elektron erkin holatga o'tadi va elektr toki o'tkazishda qatnashadi. Buning uchun har qanday yarimo'tkazgich kimyoviy bog'lanishidagi elektronni ozod qilish uchun kerak bo'lgan energiyaga taqiqlangan soha energiyasi deyiladi va E_g bilan belgilanib, uning qiymati eV larda o'lchanadi.	 Bog'langan elektronni urib chiqarish uchun kerak bo'ladigan energiya qiymati 

Chunki elektronga E_g dan kam energiya berilganda, elektronni ozod qilib bo'lmaydi. Bu degani, elektron bog'langan holatda (valent) yoki erkin holatda bo'ladi (o'tkazuvchanlik soha). Taqiqlangan soha kattaligi kimyoviy bog'lanishda qatnashayotgan valent elektronlarining yadroga qanday energiya bilan bog'langanligiga bog'liq. Masalan, II' guruh elementlarining hammasi bir xil kristall strukturaga va bir xil kimyoviy bog'lanishga ega bo'lsa ham, ularning E_g sining qiymati har xil bo'ladi.

T=300K		
Element	Elektron konfiguratsiyasi	Taqiqlangan soha kengligi E_g , eV
C	$2s^2 2p^2$	5,47
Si	$3s^2 3p^2$	1,12

Ge	$4s^2 4p^2$	0,67
Sn	$5s^2 5p^2$	0,08
(o'ta past haroratda yarimo'tkazgichli xossasi namoyon bo'ladi)		
Pb	$6s^2 6p^2$	0
metall xossaga ega		

Endi kovalent bog'lanishni uzib ketgan erkin elektron hisobiga musbat zaryadlangan, bog'lanishi to'liq bo'lmagan musbat zaryadlangan atom qoladi. Bu atom o'zidagi kovalent bog'lanishni to'ldirish uchun qo'shni atomlardan elektron olishi mumkin, natijada uzilgan bog' qo'shni atomga o'tadi. Bu degani, go'yoki musbat zaryadlangan ion o'z o'rnidan boshqa joyga siljib qolgandek bo'ladi.

Demak, zaryad ko'chmoqda, ya'ni elektr toki hosil qilindi

Shuning uchun, yarimo'tkazgich materiallarda asosiy atomlar musbat zaryadlangan va kovalent bog'lanish buzilgan holatni "kovak". yangi turdagi musbat zaryadga ega bo'lgan zaryad tashuvchilar deyiladi. Ya'ni, kovaklarning tok tashishda qatnashishi bog'langan elektronlar qo'shni bo'sh joylarga ketma-ket o'tishi orqali bo'lar ekan. Demak, yarimo'tkazgichlarning metallardan asosiy farqi ikki xil zaryad tashuvchilar elektron (n) va kovak (p) lar mavjudligidadir. Shuning uchun ham bunday materiallarda elektr o'tkazuvchanlik quyidagi ifoda yordamida aniqlanadi.

$$\sigma = en\mu_n + ep\mu_p \quad (4.4)$$

Bunda: n — elektronlarning konsentratsiyasi, p — kovaklarning konsentratsiyasi, μ_n , μ_p — elektron va kovaklarning harakatchanligi, e — elektron zaryadi.

4.3.Fermi – Dirak taqsimoti

Fermi–Dirak taqsimoti spinga ega bo'lgan zarrachalar (elektron, kovak) uchun ishlatiladi. Bu taqsimot yarimo'tkazgichlarda elektron (kovak) larning energetik sathlar bo'yicha taqsimotini ko'rsatadi. Shu bilan birga yarimo'tkazgichlarda Fermi sathini aniqlaydi hamda Fermi sathi va yarimo'tkazgichlarning asosiy xossalari o'rtasidagi bog'lanishni ko'rsatadi. Taqsimotni ko'rishdan oldin, umuman Fermi sathi nima degan savolga javob beraylik.

Fermi sathi – $T=0\text{K}$ da metallarda elektronlar bilan band bo'lgan eng yuqori energetik sathdir. $T>0\text{K}$ da esa elektronlar bilan to'lish ehtimolligi yarimga teng bo'lgan energetik sathdir.

Bundan kelib chiqadiki, Fermi sathining birligi energiya bilan o'lganar ekan. Fermi sathidan yuqorida yotgan sathlarda elektronlar bo'lmaydi, pastkidagi sathlar elektron bilan to'lgan bo'ladi. Metallarda erkin elektronlarning konsentratsiyasi 1 sm^{-3} hajmdagi atomlar soniga teng. Masalan, oltin ($4u$) ni oladigan bo'lsak, 1 sm^{-3} hajmda $5 \cdot 10^{22}$ erkin elektron mavjud. Endi bu elektronlar energetik sathlar bo'yicha qanday joylashgan? Buni bilish uchun oldin Pauli prinsipini hisobga olish kerak. Bu prinsipga asosan har qanday energetik sathda qarama-qarshi spinga ega bo'lgan maksimum 2 ta elektron joylashishi mumkin. Agar metallarda elektronning konsentratsiyasi $n=5 \cdot 10^{22}\text{ sm}^{-3}$ bo'ladigan bo'lsa, bu elektronlar joylashishi uchun Pauli prinsipiga asosan $2,5 \cdot 10^{22}$ energetik sathlar kerak bo'ladi. Metallarda erkin elektronlar joylashgan eng pastki sath (o'tkazuvchanlik sohasining boshlanishi) dan to Fermi sathigacha bo'lgan energiya miqdori $5\div 10\text{ eV}$ atrofida bo'ladi. Agar bunday o'tkazuvchanlik sohasidagi energetik sathlar orasidagi energiyani topsak, $\Delta E=10/2,5 \cdot 10^{22}=4 \cdot 10^{-22}\text{ eV}$ ga teng bo'ladi. Bu shunday kichik energiyaki, bunday sathlar orasidagi energiya farqi o'ta kichik bo'lganligi uchun bu energetik sathlarni uzluksiz deb qarash mumkin. Bu degan so'z, elektronlarning bir sathdan ikkinchi sathga o'tishi (agar unda bo'sh joy bo'ladigan bo'lsa) uchun qo'shimcha energiya olishi shart emas. Chunki elektron shu haroratdagi kinetik energiyasi $E=kT$ energetik sathlar orasidagi energiyadan juda katta bo'ladi. Ammo yarimo'tkazgichlarda erkin elektronlar soni metallarga nisbatan $10^{12}\div 10^{14}$ marta kam bo'lganligi uchun ularda Fermi sathi tushunchasi va elektronlar taqsimoti boshqacha bo'ladi.

Fermi-Dirak taqsimoti quyidagi tenglik orqali ifodalanadi:

$$f = \frac{1}{1 + g \exp\left(\frac{E-F}{kT}\right)} \quad (4.5)$$

Bunda: f – berilgan haroratda (T) va Fermi sathi (F) aniq qiymatga ega bo'lgan holatda har qanday energetik sath (E) ning elektronlar bilan band bo'lishi ehtimolligi.

Berilgan energetik sathning kovaklar bilan band bo'lish ehtimolligi quyidagi tenglik bilan ifodalanadi:

$$(1 - f) = \frac{1}{1 + g \exp\left(\frac{F-E}{kT}\right)} \quad (4.6)$$

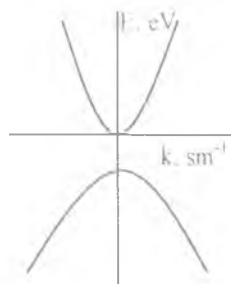
Bunda: g – aynish koeffitsiyenti deb ataladi. Bu koeffitsiyent donor energetik sathlar uchun 1/2 ga, akseptor energetik sathlar uchun 2 ga teng.

g ning fizik ma'nosi donor kirishma atomlari ionlashishi uchun faqat aniq spinga ega elektronni ozod qilish kerak, ammo u yana neytral holatga kelishi uchun 2 xil spinga ega bo'lgan elektronlarning xohlaganini olishi mumkin. Demak, g – atomni ionlash va neytrallash uchun kerak bo'ladigan elektron spinlarining nisbatini ko'rsatadi. Donor sathlar uchun $g=1/2$, akseptor sathlari uchun $g=2$ ga teng bo'ladi.

Yarimo'tkazgichlarda Fermi sathini qanday aniqlash mumkinligini ko'rsatishdan oldin, yarimo'tkazgich o'tkazuvchanlik sohasidagi elektronlarning konsentratsiyasini aniqlab ko'raylik. Buning uchun yarimo'tkazgichning o'tkazuvchanlik sohasidagi elektronlar joylashishi mumkin bo'lgan sathlar zichligi degan tushunchani kiritamiz (N_C).

Albatta, o'tkazuvchanlik sohasi parabola shaklida bo'lganligi uchun (4.1-rasm) N_C – qiymati energiya $N(E)$ ga bog'liq bo'ladi.

$$N(E) = 4\pi(2m_n^*/h^2)^{3/2}(E - E_C)^{1/2} \quad (4.7)$$



4.1-rasm. Yarimoʻtkazgich materiallar energetik sohaslarining tuzilishi (eng oddiy holati): E – elektronlarning energiyasi, k – elektronlarning kvazi impulsi

Yarimoʻtkazgichning oʻtkazuvchanlik sohasidagi mavjud elektronlarning konsentratsiyasi, albatta, shu sohadagi energetik sathlarning elektron bilan band boʻlish ehtimoligiga bogʻliq boʻladi:

$$n = \int_{E_{co}}^E N_C f \cdot dE = \int_{E_c}^{E_n} N_C \cdot \frac{1}{1 + g \exp\left(\frac{E_c - F}{kT}\right)} dE \quad (4.8)$$

Bunda: E_{co} – oʻtkazuvchanlik sohasining eng quyi energiyasiga mos energetik sath. E_n – oʻtkazuvchanlik sohasining eng yuqori energiya-siga mos keladigan energetik sath.

$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (4.9)$$

Yarimoʻtkazgichda erkin elektronlarning konsentratsiyasi oʻta kam va oʻtkazuvchanlik sohasidagi energetik sathlar boʻsh boʻlganligi uchun Fermi – Dirak taqsimotiga koʻra (4.5) oʻtkazuvchanlik sohasidagi energetik sathlar F sathdan ancha yuqorida deb hisoblashga asos boʻladi, yaʼni $E_c \ll F$.

U holda oʻtkazuvchanlik sohasidagi elektronlarning konsentratsiyasi quyidagiga teng boʻladi:

$$n = N_c \cdot e^{\frac{E_c - F}{kT}} \quad (4.10)$$

Xuddi shunday valent sohadagi kovaklarning konsentratsiyasi quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$p = N_V \cdot \frac{1}{1 + g \exp\left(\frac{F - E_V}{kT}\right)} \quad (4.11)$$

Bunda: N_V – valent sohadagi energetik sathlar zichligi:

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (4.12)$$

Valent sohasida kovaklar konsentratsiyasi juda kam bo'lganligi (xona haroratida) Fermi sathi energiyasi valent sohaning eng yuqori energetik sathidan katta bo'lganligi uchun, ya'ni $F > E_V$ valent sohadagi kovaklarning konsentratsiyasi quyidagicha

$$p = N_V \cdot e^{\frac{F - E_V}{kT}} \quad (4.13)$$

aniqlanadi. Yuqoridagi ifodalarda keltirilgan m_n^* , m_p^* – elektron va kovaklarning effektiv massasi, h – Plank doimiysi

4.4. Elektr neytrallik tenglamasi

Muvozanat holatda har qanday yarimo'tkazgichda manfiy zaryadga ega bo'lgan zarrachalar (elektron, ionlashgan atomlar) soni musbat zaryadga ega bo'lgan zarrachalar soniga teng bo'ladi:

$$N^+ = N^- \quad (4.14)$$

Bu elektr neytrallik tenglamasidir.

Xususiy yarimo'tkazgichlarda esa elektronlarning valent sohasidan o'tkazuvchanlik sohasiga o'tishi bilan valent sohasida shunga teng holda musbat zarracha (kovak) lar hosil bo'ladi. Demak, *xususiy yarimo'tkazgichlar uchun neytrallik tenglamasi* quyidagicha ifodalanadi:

$$n = p = n_i \quad (4.15)$$

Bunda: n_i — xususiy zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi.

Agar yarimo'tkazgichda donor kirishma atomlari (N_d) bo'lib, ular to'la ionlashgan bo'lsa, bunday yarimo'tkazgichlarda neytrallik tenglamasi quyidagicha bo'ladi:

$$n_i + n_d = p_a + N_d^+, \quad N_d = n_d, \quad n_i + n_d = n, \\ n = p + N_d^+ \quad (4.16)$$

Kirishma atomlari to'la ion holatiga o'tmaganda Fermi — Dirak taqsimotiga asosan, ionlashgan donor atomlar konsentratsiyasi quyidagicha bo'ladi:

$$N_d^+ = N_d \cdot f = \frac{N_d}{1 + g \exp\left(\frac{F - E_d}{kT}\right)} \quad (4.17)$$

Bunda: E_d — donor sath energiyasi.

Bunday holda neytrallik tenglamasi quyidagicha bo'ladi:

$$n = p + \frac{N_d}{1 + g \exp\left(\frac{F - E_d}{kT}\right)} \quad (4.18)$$

Agar kirishma atomlar akseptor bo'lib, ular to'la ionlashgan bo'lganida (ya'ni, ular valent sohasidan akseptor sathiga elektronlarni to'la qabul qilsa) unda valent sohasida paydo bo'lgan qo'shimcha kovaklarning konsentratsiyasi (p_a) manfiy zaryadlangan kirishma atomlar ionlari konsentratsiyasiga teng bo'ladi:

$$p_a = N_a^- \quad (4.19)$$

Agar kirishma akseptor atomlari to'la ionlashmagan bo'lsa, u holda quyidagicha ko'rinishga ega bo'ladi:

$$p_a = \frac{N_a}{1 + \exp\left(\frac{E_a - F}{kT}\right)} \quad (4.20)$$

Bunda: E_a – akseptor sath energiyasi.

Neytrallik tenglamasi quyidagiga teng bo'ladi:

$$n_l + N_a^- = p_l + p_a \quad (4.21)$$

Bulardan ma'lum bo'ladiki, berilgan har qanday yarimo'tkazgich materiallari uchun ularga kiritilgan kirishma atomlar tabiati (donor yoki akseptor), konsentratsiyasi va energetik sathlar energiya qiymatini bilgan holda umumiy elektr neytrallik tenglamasini yozish mumkin. Elektr neytrallik tenglamasining to'la va to'g'ri ifodasini yozish juda muhimdir. Chunki bu tenglamadagi barcha kattaliklar qiymatlarini berilgandan so'ng, tenglamani Fermi sathiga nisbatan yechib, Fermi sath energiya qiymati topiladi. Endi bu topilgan qiymatga asosan yarimo'tkazgichdagi mavjud energetik sathlarning elektron yoki kovaklar bilan band bo'lish ehtimoli, o'tkazuvchanlik sohasidagi erkin elektronlar va valent sohasidagi kovaklarning konsentratsiyasini ham aniqlash mumkin.

Fermi sathini to'g'ri aniqlash juda katta ahamiyatga ega, chunki F ning qiymatini bilish bilan, yarimo'tkazgich materialining taqiqlangan sohasidagi barcha energetik sathlarning elektronlar bilan band bo'lish ehtimoligini aniqlash mumkin bo'ladi. Bu esa yarimo'tkazgich materiallarining termik, foto va optik xossalarni boshqarish imkoniyatini beradi.

4.5. Xususiy yarimo'tkazgichlar

Yuqorida keltirilganidek, bunday materiallarda erkin elektronlar va kovaklarning konsentratsiyasi o'zaro teng bo'ladi. (4.15) Bu xususiy yarimo'tkazgich uchun elektr neytrallik tenglamasi hamda xususiy yarimo'tkazgich ta'rifidir. Bu tenglikka n va p ning (4.10), (4.13) ifodalaridan foydalangan holda neytrallik tenglamasini yozamiz:

$$N_c \cdot \exp\left(-\frac{E_c - F}{kT}\right) = N_v \cdot \exp\left(-\frac{F - E_v}{kT}\right) \quad (4.22)$$

Bu tenglamadan Fermi sathining qiymatini topamiz:

$$F = \frac{E_c - E_v}{2} + kT \cdot \ln \frac{N_v}{N_c} \quad (4.23)$$

$T=0K$ bo'lganda,

$$F = \frac{E_c - E_v}{2} = \frac{E_g}{2} \quad (4.24)$$

ifodaga teng bo'ladi. Demak, xususiy yarimo'tkazgichlarda Fermi sathi taqiqlangan soha o'rtasida yotar ekan. Fermi sathining qiymatini (4.24) ifodaga qo'yib, xususiy zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasini topamiz:

$$n_i^2 = n \cdot p, \quad n_i = (N_c \cdot N_v)^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (4.25)$$

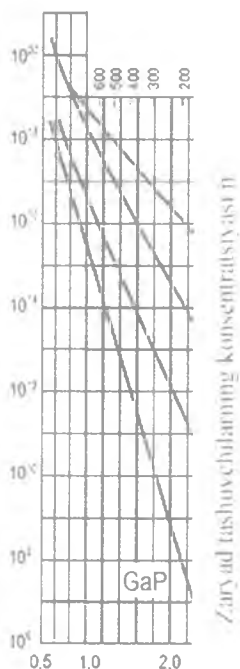
Bu tenglik hamma yarimo'tkazgichlar uchun o'rinli bo'lib, zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasini taqiqlangan soha kengligi oshib borishi bilan eksponensial kamayib borishini va berilgan E_g qiymatida harorat oshishi bilan zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi eksponensial qonun bilan oshib borishini ko'rsatadi.

4.2-jadval

E_g lari har xil bo'lgan yarimo'tkazgichlardagi xususiy zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi ($T=300K$)

Element	Taqiqlangan soha kengligi E_g , eV	Zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi n_0 sm ⁻³
Ge	0.67	$1.5 \cdot 10^{13}$
Si	1.12	$2.0 \cdot 10^{10}$
GaAs	1.42	$1.8 \cdot 10^8$

4.2-jadvaldan ko'rinib turibdiki, xususiy zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi asosan yarimo'tkazgich materialining taqiqlangan soha kengligiga bog'liq ekan.



4.2-rasm. Ge, Si, GaAs yarimo'tkazgich materiallarida xususiy zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining haroratga bog'liqlik grafigi

Demak, xususiy zaryad tashuvchilarning qiymatini haroratni boshqarish yo'li bilan juda keng oraliqda o'zgartirish mumkin ekan. Bular hammasi yarimo'tkazgich materiallarining metallardan asosiy farqli xususiyatlaridir.

Bunda shuni ham hisobga olish kerakki, yarimo'tkazgichlarda taqiqlangan soha (E_g) qiymati doimiy emas, balki harorat oshishi bilan quyidagi qonuniyat bo'yicha o'zgaradi:

$$E_g = E_{g0}(1 \pm \alpha T) \quad (4.26)$$

Bunda: E_{g0} – $T = 0K$ bo'lgandagi taqiqlangan soha qiymati, α – taqiqlangan sohaning harorat koeffitsiyenti.

Demak, n_i ni haroratga bog'liq o'zgarishini aniq hisoblash uchun (4.26) ifodani e'tiborga olish lozim. 4.3-jadvalda asosiy yarimo'tkazgichlar uchun α ning qiymati keltirildi.

4.3-jadval

Yarimo'tkazgich materiallari uchun harorat koeffitsiyenti (α) ning qiymatlari

N_2	Yarimo'tkazgich materiali	$\alpha, 10^{-4}$ (eV/g·rad)	N_2	Yarimo'tkazgich materiali	$\alpha, 10^{-4}$ (eV/g·rad)
1	Si	7,021	5	GaAs	8,871
2	Ge	4,561	6	PbTe	4,0
3	PbS	4,0	7	InP	4,906
4	6H SiC	-0,3055	8	InAs	3,158

Asosiy va asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar massasining harakatdagi qonuni

Agar yarimo'tkazgichlarda donor kirishma atomlari mavjud bo'lsa, ulardagi erkin elektronlar soni kovaklar sonidan ancha katta bo'ladi, ya'ni $n \gg p$. Akseptor kirishma atomlari mavjud bo'lgan yarimo'tkazgichlarda esa $n \ll p$. Shuning uchun qaysi turdagi zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi ko'p bo'lsa, ularni – asosiy zaryad tashuvchilar, kamini esa – asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar deb atash qabul qilingan.

Demak, elektronlar asosiy zaryad tashuvchilar bo'lsa, yarimo'tkazgich n – tur, kovaklar asosiy zaryad tashuvchilar bo'lganda yarimo'tkazgich p – tur bo'ladi.

Berilgan yarimo'tkazgich materiallarida asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi massalarning harakatdagi qonuni bilan aniqlanadi:

$$n_n \cdot p_n = (n_i)^2 \quad (4.27)$$

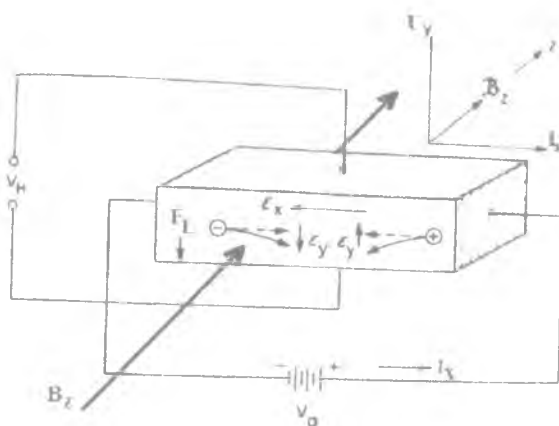
Bunda: $n_n=10^{16} \text{ sm}^{-3}$ bo'lgan materiallarda $p_n=4 \cdot 10^4 \text{ sm}^{-3}$ bo'ladi. n_n – n -turdagi yarimo'tkazgichda elektronlarning konsentratsiyasi, p_n – n -turdagi yarimo'tkazgichda kovaklarning konsentratsiyasi. p – turli yarimo'tkazgichlar uchun

$$p_p \cdot n_p = (n_i)^2 \quad (4.28)$$

Bu qonun faqat materiallar muvozanat holatda bo'lgandagina to'g'ri bo'ladi. Agar nomuvozanat holatda bo'lmasa (yorug'lik, elektr maydoni va h.k.) bu qonun ishlamaydi.

4.6. Xoll effekti

Xoll effekti deb, qattiq jisimli namunalarga (rasm) bir vaqtning o'zida, o'zaro perpendikulyar yo'nalishda, elektr (E) va magnit (H) kuchlanganligi qo'yilganda Lorens $F = \frac{e}{c}[\vec{v} \cdot H]$ kuchi ta'sirida zaryad tashuvchilarning to'g'ri chiziqli harakat yo'nalishidan og'ishi natijasida $\vec{E}$ va $\vec{H}$ yo'nalishlariga perpendikulyar yo'nalishda elektr kuchlanish paydo bo'lishiga aytiladi. Bunday kuchlanish **Xoll kuchlanishi** va **Xoll potentsiali** deyiladi.



4.3 –rasm. Xoll effekti o'lchanayotgan namuna: I_x – tok zichligi, B_z – magnit maydon induksiyasi, E_y – Xoll maydoni, F_L – Lorens kuchi, V_H – Xoll potentsiallar farqi, E_x – tashqi maydon kuchlanganligi, V_0 – tok manbai

Yarimo'tkazgich materiallaridagi zaryad tashuvchilar (elektron, kovak) konsentratsiyasini to'g'ridan-to'g'ri va aniq o'lchashning asosiy usullaridan biri bu – **Xoll usulidir**.

Bu usulda asosan tajribada o'lchanadigan asosiy kattalik bu – Xoll doimiysidir. Uning qiymati

$$R = \frac{U_x \cdot d}{I \cdot H} \quad (4.29)$$

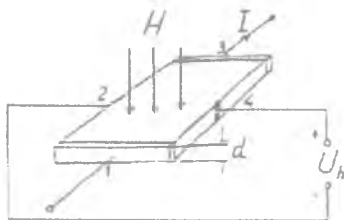
Bunda, U_x – Xoll kuchlanganligi, d – o'lchanayotgan namuna qalinligi, I – namunadan o'tayotgan tok, H – magnit maydoni kuchlanganligi.

Xoll doimiysi R quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$R = \frac{1}{en} = \frac{1.6 \cdot 10^{18}}{n} \rightarrow n = \frac{1.6 \cdot 10^{18}}{R} \quad (4.30)$$

Bunda: n – zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi.

Bir vaqtda aniqlangan R va solishtirma o'tkazuvchanlik zaryad tashuvchilarning Xoll harakatchanligini aniqlash imkonini beradi:



4.4-rasm. Xoll doimiysini aniqlash chizmasi

$$R \cdot \sigma = \frac{1}{en} \cdot en\mu_x = \mu_x \quad (4.31)$$

Agar Xoll doimiysi (R) ning harorat bo'yicha o'zgarishi aniqlansa ((4.30) ifodaga asosan zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi ma'lum bo'ladi), $R(T)$ yoki $n(T)$ bog'lanish grafik asosida shakllantirilsa, zaryad tashuvchilarni yuzaga keltirayotgan energetik sath (E_d , E_a , E_g) larni aniqlash mumkin bo'ladi.

Agar Xoll effekti yordamida elektronli va kovakli yarimo'tkazgichlarda elektronlar va kovaklarning konsentratsiyasi har xil haroratlarda aniqlansa, ifodaning ikkala tomoni logarifmlansa quyidagi ifoda hosil bo'ladi:

$$\ln n = \ln A - \frac{\Delta E_a}{2kT} \quad \text{yoki} \quad \ln p = \ln \beta - \frac{\Delta E_a}{2kT} \quad (4.32)$$

$\beta \cdot \ln n$ yoki $\ln p - \frac{1}{T}$ ga nisbatdan grafik chizsak, olingan to'g'ri chiziqli burchagi $\frac{\Delta \ln n}{\Delta(\frac{1}{T})} \cdot 2k = E_d$ yoki $\frac{\Delta \ln p}{\Delta(\frac{1}{T})} \cdot 2k = E_a$, ya'ni donor

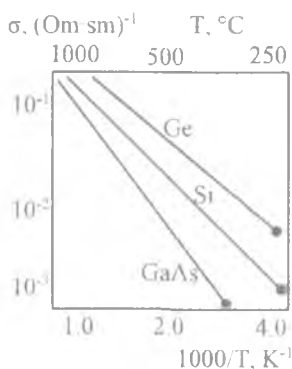
va akseptor energetik sathlarining taqiqlangan sohalaridagi energetik holatini beradi. Odatda qulay bo'lishi uchun $\ln n$ ning $1000/T$ ga bog'liq grafigi chiziladi va unda

$$E_d = \frac{2k \cdot 1000 \cdot \Delta(\ln n)}{\Delta\left(\frac{1000}{T}\right)} = 0,2 \cdot 2 \cdot \frac{\Delta \ln(n)}{\Delta\left(\frac{1000}{T}\right)}$$

yoki

$$E_a = \frac{2k \cdot 1000 \Delta \ln p}{\Delta\left(\frac{1000}{T}\right)} = 0,2 \cdot 2 \cdot \frac{\Delta \ln(n)}{\Delta\left(\frac{1000}{T}\right)} \quad (4.33)$$

ko'rinishga keladi.



4.5-rasm. Si, Ge va GaAs yarimo'tkazgich materiallari o'tkazuvchanligining haroratga bog'liqlik grafigi

4.7. Kirishma atomli yarimo'tkazgichlarda Fermi sathi

Kirishma atomlarning yarimo'tkazgich materiallarini taqiqlangan sohasida hosil qilgan energetik sathlari energiyaga va haroratga qarab to'la ionlashgan (donor sathlardan elektronlar o'tkazuvchanlik sohasiga to'la o'tgan yoki akseptor sathlar valent sohadan elektronlarni to'la o'ziga qabul qilgan) holatda yoki qisman ionlashgan holatda bo'lishi mumkin. Bu holatlarda yuqorida

keltirilganidek neytrallik tenglamasi har xil bo'ladi. Agar materialga N_d konsentratsiyasi va energetik sath energiyasi E_d teng donor kirishma atomlari kiritilgan bo'lsa, u holda neytrallik tenglamasi donor atomlari to'la ionlashgan holatda quyidagi ifodaga keladi:

$$n = n_0 + n_d, \quad n_d = N_d^+, \quad n_0 + n_d = N_d^+ + p \quad (4.34)$$

Bu holda valent sohadagi kovaklar soni n va N_d^+ ga nisbatdan o'ta kam bo'lgani uchun (4.34) tenglamadagi p ni hisobga olmasa ham bo'ladi, unda (4.34) tenglama $n_0 + n_d = N_d^+$ ko'rinishga keladi va n , N_d^+ qiymatlarini (4.34) ga qo'yib tenglamadan Fermi sathini topamiz:

$$n = N_d^+, \quad N_c \cdot e^{\frac{-(E_c - E)}{kT}} = \frac{N_d}{1 + \exp\left(\frac{-(E_c - E)}{kT}\right)} = N_d \quad (4.35)$$

Unda

$$F = -\Delta E_d + kT \ln \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2e^{\frac{E_d}{kT}}}{(2\pi m_n^* kT)^{3/2} - 1} \right] \quad (4.36)$$

Bu holda Fermi sathining qiymati haroratga o'ta bog'liq bo'lib qoladi. Past haroratlarda quyidagi shart bajariladi:

$$\frac{E_d}{e kT} \gg \frac{2(2\pi m_n^* kT)^{3/2}}{N_d \cdot h^3} \quad (4.37)$$

U holda Fermi sathining qiymati quyidagiga teng bo'ladi:

$$F = -\frac{E_d}{2} + kT \ln \left[\frac{N_d h^3}{2(2\pi m_n^* kT)^{3/2}} \right] \quad (4.38)$$

(4.37) munosabatga asosan o'ta past haroratlarda, ya'ni $T=0K$ ga teng bo'lganda Fermi sathi quyidagicha ifodalanadi:

$$F = \frac{E_d}{2} = \frac{E_c - E_d}{2} \quad (4.39)$$

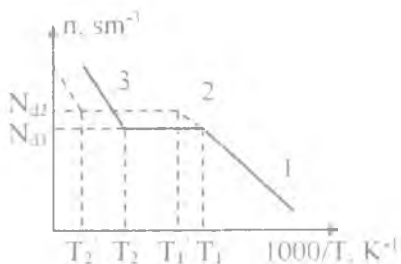
Demak, $T=0K$ da Fermi sathi o'tkazuvchanlik sohaning eng pastki sathi bilan donor energetik sathning o'rtasida yotadi. Bunda donor sathlar elektronlar bilan to'lgan bo'ladi. Harorat oshishi bilan $(2\pi m_n^* kT)^{3/2} < N_d h^3$ sharti bajarilib turgan holatda (4.35) ifodaning ikkinchi hadi musbat bo'lib, Fermi sathi o'tkazuvchanlik sohasi tomonga siljiydi, ammo harorat oshgan sari, ya'ni $(2\pi m_n^* kT)^{3/2} > N_d h^3$ boshlanishi bilan ikkinchi had manfiy ishoraga o'tadi va Fermi sathi asta-sekin past tomonga, ya'ni taqiqlangan sohaning o'rtasi tomon siljiydi. Yuqori haroratlarda qachonki xususiy zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi $n_i \geq N_d$ donor konsentratsiyasidan oshishi bilan material yana xususiy holatiga qaytadi va Fermi sathi yana taqiqlangan soha o'rtasida joylashadi.

Fermi sathining (4.37) qiymatini (4.38) ga qo'yish orqali donor kirishma atomlari bilan legirlangan materiallardagi elektronlar konsentratsiyasini donor sathlar parametrlariga bog'lanish ifodasini topamiz:

$$n = (2N_d)^{1/2} \cdot \frac{(2\pi m_n^* kT)^{3/4}}{h^{3/2}} \cdot e^{-\frac{E_d}{2kT}} \quad (4.40)$$

Ifodadan ko'rinib turibdiki, elektronlarning konsentratsiyasi o'tkazuvchanlik sohasida harorat oshishi bilan eksponensial suratda oshadi. Bu holat donor sathidagi elektronlarning to'la o'tkazuvchanlik sathiga o'tishigacha davom etadi. Haroratning yanada ko'tarilishi bilan o'tkazuvchanlik sohasida elektronlar konsentratsiyasi deyarli o'zgarmaydi (T_I). Bu holat shunday haroratgacha davom etadiki, toki o'sha haroratda (T_I) xususiy zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi o'tkazuvchanlik sohadagi donor sathidan chiqqan elektronlar qiymatiga yaqinlashadi. Endi bu harorat qiymati donor kirishma

atomlarining konsentratsiyasiga bog'liq. U qancha ko'p bo'lsa, shunga mos T_1 va T_2 qiymati yuqoriroq harorat tomon siljiydi.



4.6-rasm. Zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi haroratga bog'liqlik grafigi: 1 – donor sathning ionizatsiya harorati, 2 – elektronlar to'yinish harorati, 3 – xususiy zaryad tashuvchilar ionlashishining boshlanish harorati

Akseptor kirishma atomlari kiritilgan kovakli yarimo'tkazgich materiallarida ham xuddi yuqoridagi holatlar bo'yicha Fermi sathi kovaklarning konsentratsiyasiga, akseptor kirishma atomlariga va haroratga bog'liqligini keltirish mumkin. Bu holda neytrallik tenglamasi $p + p_A = n + N_a$, ammo bunday materiallarda kovaklarning konsentratsiyasi elektronlarning konsentratsiyasidan juda ko'p bo'lgani uchun ($p_A, N_a \gg n$) n ni hisobga olmasa ham bo'ladi. Unda neytrallik tenglamasi quyidagi holatga o'tadi: $p + p_A = N_a$, $p_A = N_a - p$ ko'rinishda bo'ladi.

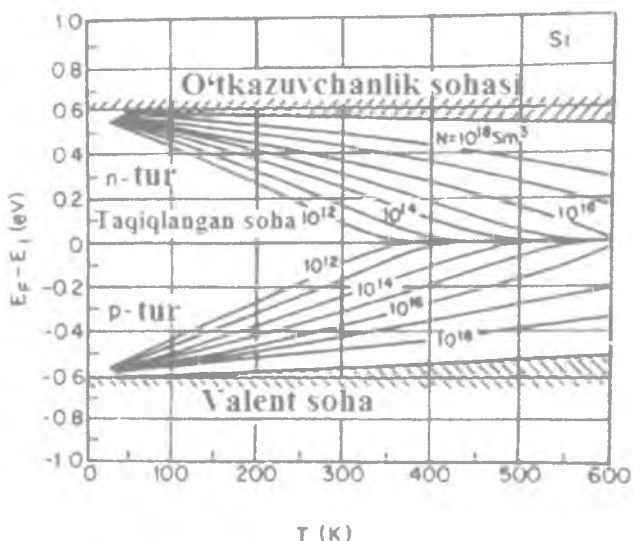
p va p_A larning qiymatini qo'yib, tenglamadan Fermi sathi qiymatini topib, uni (4.39) o'rniga qo'ysak, bunday materiallarda kovaklarning konsentratsiyasini aniqlash ifodasini topamiz:

$$p = (2N_a)^{1/2} \frac{2(2\pi m_p kT)^{3/2}}{h^3} \cdot e^{-\frac{E_a}{2kT}} \quad (4.41)$$

Bu holatda ham $T=0$ bo'lganda Fermi sathi valent sohaning eng yuqori sathi bilan akseptor energetik sathi o'rtasida yotadi. Harorat

o'shishi bilan Fermi sathi asta-sekin taqiqlangan sohaning o'rta qismiga ($E_g/2$) qarab siljiydi. Bunga sabab harorat ortishi bilan xususiy zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining oshib borishidir.

$$n_i = (N_c \cdot N_v) \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (4.42)$$



4.7-rasm. Fermi sathining *n* va *p* – tur yarimo'tkazgichlarda haroratga bog'liq o'zgarishi keltirilgan

Yuqori haroratda, ya'ni xususiy zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi akseptor kirishma atomlarining konsentratsiyasidan ortiq bo'lganda $n_i > N_a$ Fermi sathi taqiqlangan energetik soha o'rtasi atrofida joylashadi, ya'ni yarimo'tkazgich materiali xususiy o'tkazuvchanlik holatiga o'tgan bo'ladi.

Demak, agar yarimo'tkazgich materiallar elektronli n – tur bo'lsa, Fermi sathi taqiqlangan energetik sohaning yuqori yarmida yotadi. Donor kirishma atomlar qancha ko'p bo'lsa, Fermi sathi o'tkazuvchanlik energetik sathiga shuncha yaqin bo'ladi.

Agar yarimo'tkazgich material kovakli p – tur bo'lsa, unda Fermi sathi taqiqlangan energetik sohaning pastki qismida yotadi. Akseptor kirishma atomlarining konsentratsiyasi oshgani sari Fermi sathi valent sohaga shuncha yaqinlashadi.

4.8. Donor hamda akseptorli kirishma atomlari mavjud bo'lgan yarimo'tkazgichlar

Juda ko'p hollarda yarimo'tkazgichlarda bir vaqtning o'zida ham donor, ham akseptor kirishma atomlari mavjud bo'ladi.

Bu kirishma atomlar konsentratsiyasining nisbatiga qarab, agar $N_a \gg N_d$ bo'lganda material p – tur, agar $N_a \ll N_d$ bo'lganda material n – tur, agar N_a va N_d lar yetarli darajada bir-biriga yaqin bo'lsa, bunday materiallar to'la kompensatsiyalangan yarimo'tkazgichlar deb nomlanadi.

Kompensirlangan yarimo'tkazgich materiallarda donor kirishma atomlari hosil qilgan erkin elektronlar akseptor kirishma atomlari hosil qilgan kovaklar bilan rekombinatsiyalashib, akseptor va donor kirishma atomlarining o'tkazuvchanlikka ta'sirini kamaytiradi. Bunday yarimo'tkazgichlarda quyidagi holatlar namoyon bo'ladi.

1. Donor kirishma atomlar konsentratsiyasi, akseptor kirishma atomlar konsentratsiyasiga teng $N_a = N_d$ bo'lgan holatda donor kirishma atomlari hosil qilgan o'tkazuvchanlik sohasidagi barcha elektronlar akseptor kirishma atomlari hosil qilgan barcha kovaklar bilan to'la rekombinatsiyalashadi. o'tkazuvchanlik va valent sohalarda kirishma

atomlar hosil qilgan elektron va kovaklar qolmaydi va neytrallik tenglamasi

$$n_i + N_a^- = p_i + N_d^+ \quad (4.43)$$

ga teng bo'ladi. Bunda $N_a^- - N_d^+$ bo'lganligi uchun $n-p$, ya'ni material yana xususiy yarimo'tkazgich holiga qaytadi va bunday materiallarda Fermi sathi quyidagi ifoda asosida aniqlanadi:

$$F = \frac{\Delta E_g}{2} + kT \ln \frac{N_V}{N_C} \quad (4.44)$$

Bunday yarimo'tkazgichlar to'la kompensatsiyalashgan yarimo'tkazgich deyiladi. ammo u yana xususiy yarimo'tkazgich holatiga o'tgan bo'lsa, o'tkazuvchanligi xususiy yarimo'tkazgichnikidan kam bo'ladi. Bunga sabab, to'la ionlashgan donor va akseptor kirishma atomlar elektronlar va kovaklar uchun qo'shimcha sochilish markazi bo'lib, ularning harakatchanligi kamayishiga olib keladi. Donor (N_d) va akseptor (N_a) larning konsentratsiyasi qancha ko'p bo'lsa, uning zaryad tashuvchilar harakatchanligiga ta'siri shuncha sezilarli bo'ladi. Odatda xususiy yarimo'tkazgich materialini olish texnologiyasi o'ta murakkab va ko'p energiya talab qiladi. Shuning uchun yuqorida ko'rsatilganidek xususiy yarimo'tkazgich materiallarga yaqin o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan materiallarni to'la kompensatsiya qilish usuli bilan olish mumkin ekan.

2. Agar $N_a > N_d$ bo'lsa, barcha donor kirishma atomlari to'liq ionlashgan bo'ladi. Material p -tur kovakli holatda bo'lib, bunda neytrallik tenglamasi quyidagicha yoziladi: $p_a + p + N_d = N_a^- + n$, agar $n \ll p$ va $N_d \ll N_a$ hisobga olsak, unda neytrallik tenglamasi quyidagicha bo'ladi: $p - N_d = N_a^-$. p, N_a^- larning qiymatlari asosida tenglamani yechish va undagi Fermi sathining qiymatini kovaklarning konsentratsiyasiga, haroratga hamda N_d va N_a ga bog'liqligini aniqlash mumkin.

n – turdagi kremniyga akseptor kirishma atomlari diffuziya qilinganda solishtirma qarshilik va o'tkazuvchanlik turning o'zgarishi

Dastlabki namuna	Tur	Diffuziya harorati, °C	Diffuziya vaqti, min	Diffuziyadan keyingi solishtirma qarshilik, $\Omega \cdot \text{sm}$	Tur
20	n	1250	15	$(1 \dots 2) \cdot 10^5$	i
20	n	1200	20	$(3 \dots 4) \cdot 10^4$	n
20	n	1150	25	$(6 \dots 7) \cdot 10^5$	n
40	n	1250	15	$(1,5 \dots 2) \cdot 10^5$	i
40	n	1200	20	$(2 \dots 2,5) \cdot 10^5$	i
40	n	1150	25	$(7 \dots 8) \cdot 10^4$	i
60	n	1250	15	$(5 \dots 6) \cdot 10^4$	p
60	n	1200	20	$(2 \dots 3) \cdot 10^5$	i
60	n	1150	25	10^5	i
100	n	1250	15	$(3 \dots 4) \cdot 10^4$	p
100	n	1200	20	$(6 \dots 7) \cdot 10^4$	p
100	n	1150	25	$(9 \dots 10) \cdot 10^4$	i

3. Agar $N_a < N_d$ bo'lsa, bunda barcha akseptor atomlari to'la ionlashgan $N_a^- = N_a$ bo'ladi va neytrallik tenglamasida $p \ll n$, N_d , N_a ni hisobga olsak, $n_d + n + N_a^- = N_d^+$ ga keladi. Bu tenglamada N_d^+ va n qiymatlarini bilgan holda. Fermi sathini va materialdagi elektronlarning konsentratsiyasini N_d , N_a hamda T ga bog'liqligini aniqlash bilan birga E_d qiymatini aniqlash mumkin bo'ladi.

4.9. Birdan ko'p energetik sath hosil qiluvchi kirishma atomlari mavjud bo'lgan yarimo'tkazgichlar

Ba'zi kirishma atomlar yarimo'tkazgichning taqiqlangan energetik sohasida birdan ortiq energetik sathlar hosil qilishi mumkin.

Masalan, Zn , Cd atomlari Si da ikkita akseptor energetik sathni, Se, S, Te lar ikkita donor energetik sathlarni, Cu , Ge kristallida hatto uchtdan energetik sathlarni (4.5-jadval) hosil qiladi. Ikkita akseptor energetik sathga ega kirishma atomli yarimo'tkazgichlar uchun neytrallik tenglamasi quyidagicha yoziladi:

$$n + N_a^- + N_a^{--} = p, \quad p + N_d^+ + N_d^{++} = n \quad (4.45)$$

$$\begin{aligned} N_a^- &= \frac{N_a}{1 + g \cdot \exp\left(\frac{E_{a1}-F}{kT}\right)}, & N_a^{--} \\ &= \frac{N_a}{1 + g \cdot \exp\left(-\frac{E_{a2}-F}{kT}\right)} \end{aligned} \quad (4.46)$$

4.5-jadval

Kremniydagi kirishma atomlarining energetik sathlari

№	Element	Nomlanishi	Sath	Ionizatsiya energiyasi
1	Li	Litiy	Donor	$E_C - 0.033$
2	Sb	Surma	Donor	$E_C - 0.039$
3	P	Fosfor	Donor	$E_C - 0.045$
4	As	Mishyak	Donor	$E_C - 0.054$
5	Bi	Vismut	Donor	$E_C - 0.069$
6	Te	Tellur	Donor	$E_C - 0.14$
7	Tl	Titan	Donor	$E_C - 0.21$
8	C	Uglerod	Donor	$E_C - 0.25$
9	Mg	Magniy	Akseptor Akseptor	$E_V + 0.11$ $E_V + 0.25$
10	Se	Selen	Donor	$E_C - 0.25$ $E_C - 0.4$
11	Cr	Xrom	Donor	$E_C - 0.41$
12	Ta	Tantal	Donor	$E_C - 0.14$ $E_C - 0.43$
13	Cs	Seziy	Donor Akseptor	$E_C - 0.3$ $E_V - 0.5$
14	Ba	Bariy	Donor	$E_C - 0.32$

			Akseptor	$E_V + 0.5$
15.	S	Oltingugurt	Donor	$E_C - 0.26$
			Donor	$E_C - 0.48$
16.	Mn	Marganets	Donor	$E_C - 0.43$
			Donor	$E_C - 0.53$
			Akseptor	$E_V + 0.45$
17.	Ag	Kumush	Akseptor	$E_V + 0.36$
			Donor	$E_C - 0.33$
18.	Cd	Kadmiy	Akseptor	$E_V + 0.2$
			Akseptor	$E_V + 0.45$
			Akseptor	$E_V + 0.55$
			Akseptor	$E_V + 0.3$
19.	Pt	Platina	Akseptor	$E_V + 0.25$
			Akseptor	$E_V + 0.36$
			Donor	$E_C - 0.3$
20.	Si	Kremniy	Akseptor	$E_V + 0.34$
			Donor	$E_C - 0.49$
			Donor	$E_C - 0.19$
21.	B	Bor	Akseptor	$E_V + 0.045$
22.	Al	Alyuminiy	Akseptor	$E_V + 0.067$
23.	Ga	Galliy	Akseptor	$E_V + 0.072$
24.	In	Indiy	Akseptor	$E_V + 0.16$
25.	Tl	Talliy	Akseptor	$E_V + 0.3$
26.	Pd	Palladiy	Akseptor	$E_V + 0.34$
27.	Na	Natry	Donor	$E_C - 0.35$
28.	Be	Berilliy	Akseptor	$E_V + 0.42$
			Akseptor	$E_V + 0.17$
29.	Zn	Rux	Akseptor	$E_V + 0.55$
			Akseptor	$E_V + 0.26$
30.	Au	Oltin	Akseptor	$E_V + 0.54$
			Akseptor	$E_V + 0.49$
			Donor	$E_C - 0.29$
31.	Co	Kobalt	Akseptor	$E_V + 0.53$
			Akseptor	$E_V + 0.35$
32.	V	Vanadiy	Donor	$E_C - 0.49$
			Akseptor	$E_V + 0.4$
33.	Ni	Nikel	Akseptor	$E_V + 0.35$
			Akseptor	$E_V + 0.23$
34.	Mo	Molibden	Donor	$E_C - 0.33$
			Donor	$E_C - 0.34$
			Donor	$E_C - 0.3$

35.	Hg	Simob	Akseptor Akseptor Donor Donor	$E_V + 0.31$ $E_V + 0.36$ $E_C - 0.33$ $E_C - 0.25$
36.	Sr		Donor Donor	$E_C - 0.28$ $E_C - 0.5$
37.	Ge	Germaniy	Donor Donor	$E_C - 0.27$ $E_C - 0.5$
38.	Cu	Mis	Akseptor Akseptor Akseptor	$E_V + 0.53$ $E_V + 0.4$ $E_V + 0.24$
39.	K	Kaliy	Donor Donor	$E_C - 0.26$ $E_C - 0.35$
40.	Sn		Donor Akseptor	$E_C - 0.25$ $E_V + 0.27$
41.	W	Volfram	Donor Donor Donor Donor Donor	$E_C - 0.22$ $E_C - 0.3$ $E_C - 0.37$ $E_C - 0.34$ $E_C - 0.31$
42.	Pb	Qo'rg'oshin	Donor Akseptor	$E_C - 0.17$ $E_V + 0.37$
43.	O	Kislorod	Donor Akseptor Akseptor	$E_C - 0.16$ $E_V + 0.38$ $E_V + 0.41$
44.	Fe	Temir	Donor Donor Donor	$E_C - 0.14$ $E_C - 0.51$ $E_C - 0.4$

Endi ikkita donor energetik sath hosil qiladigan kirishma atomlariga ega yarimo'tkazgich materiali uchun:

$$N_d^+ = \frac{N_d}{1 + g \cdot \exp\left(\frac{F - E_{d1}}{kT}\right)}, \quad N_d^{++}$$

$$= \frac{N_d}{1 + g \cdot \exp\left(\frac{F - E_{d2}}{kT}\right)} \quad (4.47)$$

Bunda, N_a , N_d — akseptor va donor kirishma atomlarining konsentratsiyasi, E_{a1} , E_{a2} , E_{d1} , E_{d2} — kirishma atomlar hosil qilgan birinchi va ikkinchi energetik sathlarning energiyasi.

Bunday hollarda neytrallik tenglamasi uchinchi darajali tenglama bo'lib, yechimi ancha murakkab bo'ladi. Bunda materialdagi asosiy zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasini aniqlagan holda hamda kirishma atomlarning energetik sathlarini Fermi sathiga nisbatan joylashishiga qarab, Fermi-Dirak taqsimoti asosida hosil bo'lgan energetik sathlarning qanchalik elektronlar bilan bandligini topish va ularning o'tkazuvchanlikka ta'sirini aniqlash mumkin bo'ladi.

Demak, Fermi-Dirak taqsimotini qo'llashdan maqsad, zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining yarimo'tkazgich materiallarining asosiy fundamental parametr (E_g , N_c , N_v) lariga va kirishma atomlarining asosiy parametr (N_a , N_d , E_a , E_d) lariga hamda harorat (T) ga bog'lanish funksiyasini aniqlash. Natijada quyidagi ma'lumotlarni olish mumkin:

1) xususiy zaryad tashuvchilarning haroratga bog'liqlik grafigidan taqiqlangan energetik soha energiya qiymati E_g ni aniqlash va bu orqali bizga noma'lum bo'lgan yarimo'tkazgichlarning qanday material ekanligini bilish;

2) $n(T)$ yoki $p(T)$ bog'lanish grafigida yarimo'tkazgichning taqiqlangan sohasida mavjud bo'lgan donor yoki akseptor sathlarining energiyasi va bunday sathlarni hosil qilgan kirishma atomlarning tabiati va konsentratsiyasini aniqlash.

Sinov savollari:

1. Fermi sathi nima va uning fizik ma'nosini tushuntiring.
2. Fermi-Dirak taqsimotini yozing va uning fizik mohiyatini tushuntirib bering.
3. Xususiy yarimo'tkazgichlarda Fermi sathi qanday joylashgan?
4. n va p turdagi yarimo'tkazgichlarda harorat oshishi bilan Fermi sathi qanday o'zgaradi?
5. $T = 0K$ haroratda n turdagi yarimo'tkazgichda Fermi sathi holatini ko'rsating?
6. Fermi — Dirak taqsimotining fizik ma'nosini tushuntiring.

7. Taqiqlangan sohada energetik sath elektronlardan bo'sh bo'lishi uchun u Fermi sathiga nisbatan qanday joylashgan bo'lishi kerak?

8. Taqiqlangan sohada energetik sath elektronlar bilan band bo'lishi uchun Fermi sathiga nisbatan qanday joylashgan bo'lishi kerak?

9. Yarimo'tkazgichlarda o'tkazuvchanlik sohasidagi elektronlarning konsentratsiyasi Fermi sathi joylashishiga nisbatan qanday bog'langan?

10. Elektr neytrallik tenglamasi nima va uning fizik ma'nosini tushuntiring.

11. Massalarning harakatdagi qonuni nima va uning fizik mohiyati.

Yarimo'tkazgichlarda elektronlar statistikasi mavzusiga doir masalalar:

1. Kremniy materialining o'tkazuvchanlik sohasida elektronlarning konsentratsiyasi $n=10^{14} \text{ sm}^{-3}$ bo'lishi uchun Fermi sathining holatini aniqlang ($T=300\text{K}$).

2. Kremniy materialida erkin elektronlarning konsentratsiyasi $n=10^{15} \text{ sm}^{-3}$ bo'lib, harorat $T=100, 200, 400 \text{ K}$ bo'lganda Fermi sathining holati qanday o'zgaradi?

3. Kremniy materialidagi kovaklarning konsentratsiyasi $n=10^{13} \text{ sm}^{-3}$ bo'lib, harorat $T=50, 150, 250, 350 \text{ K}$ bo'lganda Fermi sathining holati qanday bo'ladi?

4. Fermi sathi $E=E_s-0,15$, $E=E_s-0,25$, $E=E_s-0,4 \text{ eV}$ energiyaga ega bo'lgan kremniy materialida erkin elektronlarning konsentratsiyasini aniqlang ($T=300\text{K}$).

5. p – turdagi kremniy materialida $T=300\text{K}$ da kovaklarning konsentratsiyasi $p=4 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$ bo'lsa, bunday materialni $T=300\text{K}$ dan $T=100\text{K}$ gacha sovutganida Fermi sathi qanday o'zgaradi? Haroratni har 25K da o'zgaradi deb olib, Fermi sathini haroratga bog'liqlik grafigini chizing.

6. Elektronlarning konsentratsiyasi $n=2 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$ (teng) bo'lgan Si materialida harorat qanchaga ko'tarilganda, material xususiy o'tkazuvchanlik holatiga o'tadi?

7. Erkin elektronlarning konsentratsiyasi $n=2 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$ teng bo'lgan Si materialida harorat $T=300\text{K}$ dan 500K ga hamda 300K dan

10K ga o'zgarganda Fermi sathining holatini grafik shaklda ko'rsating.

8. Harakatdagi qonunlar ifodasidan foydalanilgan holatda quyidagi kremniy materialida asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasini aniqlang $T=300K$, $n=5 \cdot 10^{12}$, $6 \cdot 10^{13}$, 10^{15} va 10^{18} sm^{-3} .

9. Elektronning issiqlik energiyasining ($E=kT$) qiymatini $T=20$, 80 , 250 , 1200 , 2000 , $5000K$ da hisoblang va birligini eV hamda SGS da ifodalang.

10. n – turdagi yarimo'tkazgich tarkibida 2 ta har xil konsentratsiali donor kirishma atomlari bor bo'lgan holat uchun elektr neytrallik tenglamasini yozing.

Yarimo'tkazgichlarda elektronlar statistikasi mavzusiga doir masalalarning yechilishi:

1. Masalaning berilishi. p – turdagi kremniy materialida kovaklarning konsentratsiyasi $p=5 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ bo'lganda Fermi sathi qanday holatda bo'lishini aniqlang ($T=300K$).

Masalaning yechilishi: Kirishmali yarimo'tkazgichlarda Fermi sathi quyidagi ifoda orqali topiladi.

$$F_p = kT \cdot \ln \frac{N_V}{p} \quad (4.48)$$

Bunda: $N_V=1,9 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}$, $k=8,61 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$, $T=300 \text{ K}$ da Fermi sathini hisoblaymiz.

$$\begin{aligned} F_p &= kT \cdot \ln \frac{N_V}{p} = 300 \cdot 8,61 \cdot 10^{-5} \ln \frac{1,9 \cdot 10^{19}}{5 \cdot 10^{16}} \\ &= 0,0258 \cdot \ln(3,8 \cdot 10^2) = 0,0258 \cdot 5,9 = 0,15 \text{ eV} \end{aligned}$$

Demak, p – turdagi kremniy materialida kovaklarning konsentratsiyasi $p=5 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$, $T=300 \text{ K}$ bo'lganda Fermi sathi $F_p = 0,15 \text{ eV}$ valent sohadan yuqorida joylashadi.

5. YARIM O'TKAZGICHI ARDA FOTOELEKTRIK HODISALAR

5.1. Fotoo'tkazuvchanlik

Fotoo'tkazuvchanlik deb, yarimo'tkazgichlarga tushayotgan yorug'lik ta'sirida o'tkazuvchanligi o'zgarishiga aytiladi.

Yorug'lik tushmasdan oldin berilgan aniq kuchlanish va haroratda tok I_0 qiymatini aniqlaymiz. Endi yarimo'tkazgich yoritilgan vaqtdagi tok qiymati I_f ni aniqlaymiz. Bunda, yorug'lik ta'sirida yarimo'tkazgichning harorati o'zgarmasligi shart. Bu toklar qiymatlarining nisbati $S = \frac{I_f}{I_0}$ – yarimo'tkazgichning fotosezgiriligini ko'rsatadi. Odatda S ning qiymati yarimo'tkazgichlar tabiati, ko'rilayotgan harorat, yorug'lik intensivligi va to'lqin uzunligiga bog'liq bo'lib, ular optimal tanlab olinganda S ning qiymati juda katta oraliqda o'zgarishi mumkin.

Om qonuniga asosan, yarimo'tkazgichdan o'tayotgan tok kuchining qiymati solishtirma o'tkazuvchanlik bilan elektr maydon kuchlanishining ko'paytmasiga teng.

$$J = \sigma \cdot E \quad (5.1)$$

yoki

$$J = en\mu \cdot E \quad (5.2)$$

Bunda: E yarimo'tkazgichga berilgan doimiy kuchlanish o'zgarmas qiymatga ega bo'lsa, yorug'lik ta'sirida zanjirdan o'tayotgan tokning o'zgarishi, zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi n va harakatchanligi μ o'zgarishi bilangina tushuntirish mumkin. O'ta yuqori bo'lmagan yorug'likning o'rtacha intensivligida μ qiymati o'zgarishini hisobga olmasa ham bo'ladi. Bundan kelib chiqadiki, yorug'lik ta'sirida yarimo'tkazgichda o'tkazuvchanlikning o'zgarishi.

ya'ni ortishi faqat undagi zaryad tashuvchi (elektron va kovak)larning konsentratsiyasi o'zgarishi hisobigagina bo'ladi. Yorug'lik yo'q vaqtdagi elektronlar va kovaklar konsentratsiyasi n_0 , p_0 bo'lsa, yoritilganda ular qiymati n_1 va p_1 bo'ladi:

$$n_1 = n_0 + \Delta n, \quad p_1 = p_0 + \Delta p \quad (5.3)$$

$$\Delta n = n_1 - n_0, \quad \Delta p = p_1 - p_0$$

Unda Δn va Δp – mos ravishda yorug'lik natijasida paydo bo'lgan elektron va kovaklarning konsentratsiyasidir.

Yorug'lik tushganda zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi o'zgarishi – **fotogeneratsiya hodisasi** deyiladi va paydo bo'lgan qo'shimcha zaryad tashuvchi (Δn va Δp) lar **foto zaryad tashuvchilar** deb ataladi.

Tushayotgan foton energiyasi ($h\nu$) yarimo'tkazgichning taqiqlangan soha kengligiga nisbatan $h\nu \geq E_g$ qiymatga teng bo'lganda, elektron valent sohadan o'tkazuvchanlik sohasiga o'tadi va qo'shimcha erkin elektronlar hamda kovaklar hosil qiladi. Bunday jarayon **xususiy fotoo'tkazuvchanlik** deb ataladi.

Demak, xususiy fotoo'tkazuvchanlik yuzaga kelishi uchun tushayotgan foton energiyasi taqiqlangan soha energiyasi (E_g)dan katta bo'lishi kerak:

$$h\nu \geq E_g \quad (5.4)$$

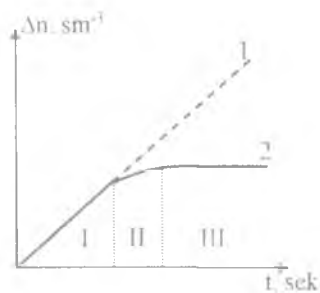
Unda fotogeneratsiya jarayonida paydo bo'layotgan zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi

$$\Delta n = \Delta p = I k \beta t \quad (5.5)$$

ga teng bo'ladi. Bunda, I – yorug'lik intensivligi (yarimo'tkazgichning bir birlik yuzasiga vaqt birligida tushayotgan fotonlar miqdori), k – yarimo'tkazgichning yorug'likni yutish koeffitsiyenti (tushayotgan fotonlarning bir qismi yuzadan qaytishi, bir qismi yutilmasdan yarimo'tkazgich qalinligidan o'tib ketishi mumkin. Shuning uchun fotonlarning yutilgan qismigina fotogeneratsiyani hosil qiladi), β – kvant chiqish koeffitsiyenti (bitta foton yutilganda hosil bo'ladigan juft elektron-kovaklar soni), t – yorug'lik tushayotgan vaqt (yarimo'tkazgich berilgan yorug'lik intensivligi va foton energiyasi ($h\nu$) bilan yoritish vaqti).

(5.5) ifodadan ko'rinib turibdiki I, β, k qiymatlari (I, β, k yarimo'tkazgich materiallar xususiyatiga bog'liq) o'zgarmas bo'lganda, foto zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi yoritilish vaqtiga to'g'ri proporsional holatda oshib borar ekan (5.1-rasm, 1).

Ammo tajriba natijalari shuni ko'rsatadiki, foto zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining yarimo'tkazgich yuzasiga tushayotgan yorug'lik vaqti bilan bog'lanishi (5.5) ifodadagi bog'lanishdan farq qilar ekan (5.1-rasm, 2).



5.1-rasm. Fotoo'tkazuvchanlik

I bosqich yoritish vaqti juda kam bo'lgandagi soha, bunda nazariy va tajriba natijalari bir-biriga mos tushadi.

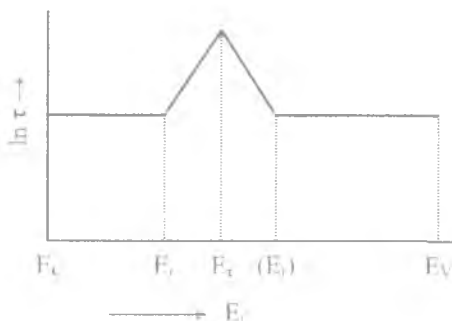
II bosqichda tajribada fotozaryad tashuvchilarning yoritish vaqti bilan o'sishi ancha sekin va nazariy qiymatlardan kam bo'lganligini ko'rsatadi.

III bosqich tajriba shuni ko'rsatadiki, fotozaryad tashuvchilar konsentratsiyasi (Δn) umuman yoritilganlik vaqtiga bog'liq bo'lmay

o'zgaras qiymatga ega bo'lar ekan. Demak, foto zaryad tashuvchilarning yoritilish vaqtiga umuman bog'liq bo'lmashligini (5.5) ifoda bilan tushuntirib bo'lmaydi.

5.2.Zaryad tashuvchilarning yashash vaqti

Tajriba natijalari shundan dalolat beradiki, fotogeneratsiya natijasida paydo bo'layotgan erkin elektronlar o'tkazuvchanlik sohasida hamma vaqt fotogeneratsiya bo'lsa ham o'zgaras qiymatga ega bo'lar ekan.



5.2-rasm. Zaryad tashuvchilarning yashash vaqti

Bu degani yoritganda hamma vaqt fotogeneratsiya natijasida qo'shimcha erkin elektronlar va kovaklar uzluksiz paydo bo'layotgan va ular o'tkazuvchanlik sohasidagi elektronlarga qo'shilayotgan bo'lsa ham, umumiy erkin elektronlar soni fotogeneratsiya ta'sirida paydo bo'layotgan foto zaryadlar qiymatiga (Δn) teng miqdorda kamayib turadi. Buni faqat o'tkazuvchanlik sohasidagi erkin elektronlarning valent sohasidagi bo'sh joy (kovak) larga qaytadan tushib, yana bog'langan elektronga aylanishi natijasida bir vaqtning o'zida ham erkin elektron, ham kovaklarning yo'q bo'lishi bilan, ya'ni rekombinatsiya hodisasi bilangina tushuntirish mumkin. Demak, fotoo'tkazuvchanlik hodisasi ham fotogeneratsiya ham fotorekombinatsiya hodisalarini o'z ichiga olar ekan.

Rekombinatsiya hodisasi – bu erkin elektron va kovaklarning o‘zaro uchrashish natijasida yo‘q bo‘lishi, ya‘ni erkin elektronlar yana qayta kovalent bog‘lanishga qaytishidan iboratdir.

Demak, yoritilish vaqti ma‘lum qiymatga yetganda fotogeneratsiya asosida paydo bo‘layotgan elektron va kovaklarning soni o‘zaro rekombinatsiyalanganlar soniga teng bo‘lar ekan, ya‘ni fotogeneratsiyada vaqt birligida qancha elektron va kovaklar paydo bo‘layotgan bo‘lsa, shunchasi yo‘q bo‘lib ketar ekan. Qisqa vaqtda yoritilganda paydo bo‘lgan erkin elektron va kovaklar soni juda kam bo‘lganda, erkin elektronlarning kovaklar bilan uchrashish ehtimoli, ya‘ni bog‘i uzilgan musbat zaryadlangan atomning elektron bilan uchrashib, uni o‘ziga tortib bog‘lanishni to‘la tiklash ehtimoli ham juda kam bo‘ladi (I bosqich).

Endi, vaqt o‘tishi bilan elektron va kovaklar soni ortib borishi natijasida. ularning uchrashish ehtimoli ortib borishini (II bosqich) ko‘ramiz.

Erkin elektron kovak bilan uchrashib, yana bog‘langan elektronga aylanadi, ya‘ni erkin elektron ham kovak miqdori ham ko‘proq kamaya boradi. Yoritilish vaqti yetarlicha uzoq bo‘lganda (III bosqich), ya‘ni erkin elektronlar va kovaklar soni ma‘lum darajaga yetganda, erkin elektronlar va kovaklarning uchrashish ehtimolligi ularning paydo bo‘lish tezligiga teng bo‘lib qoladi, natijada foto zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi (Δn)ning qiymati yoritilganlik vaqtiga bog‘liq bo‘lmay qoladi. Demak, fotogeneratsiya bilan rekombinatsiya jarayoni hamma vaqt mavjud ekan. Bundan shu narsa ma‘lum bo‘ladiki, erkin elektron va kovaklar o‘z energetik sohalarida ma‘lum vaqt ichidagina o‘tkazuvchanlikda qatnashar ekan. Savol tug‘iladi, erkin elektron erkin kovak bilan uchrashguncha qancha vaqt o‘tadi? Shundan kelib chiqqan holda elektron va kovaklar erkin holatda ma‘lum vaqt bo‘lar ekan. Bu vaqt elektron va kovaklarning *yashash vaqti* deyiladi.

Elektronlarning o‘tkazuvchanlik sohasida bo‘lish vaqti – elektronlarning yashash vaqti, kovaklarning valent sohasida bo‘lish vaqti – kovaklarning yashash vaqti deyiladi.

Yashash vaqtlarini τ_n (elektron uchun) va τ_p (kovak uchun) deb belgilab olib, ularni (5.5) ifoda o'rniga qo'ysak:

$$\Delta n = Ik\beta\tau_n, \quad \Delta p = Ik\beta\tau_p \quad (5.6)$$

U holda fotoo'tkazuvchilikning qiymati quyidagiga teng bo'ladi:

$$\Delta\sigma = \sigma_F - \sigma_0 = Ik\beta e(\mu_n \cdot \tau_n + \mu_p \cdot \tau_p) \quad (5.7)$$

(5.7) ifodadan ko'rinib turibdiki, agar berilgan yorug'lik oralig'ida ($I=const$) yarimo'tkazgichda k va β ning qiymati doimiy bo'lgani uchun fotoo'tkazuvchanlikning qiymati asosan τ_n va τ_p bilan aniqlanar ekan. Odatda zaryad tashuvchilarning yashash vaqti yarimo'tkazgich materiallarida juda katta oraliqda o'zgarishi mumkin $\tau=10^{-10} \div 10^{-11}$ sek. Demak, zaryad tashuvchilar yashash vaqtini boshqarish bilan fotoo'tkazuvchanlik qiymatini 10^9 martagacha ko'paytirish mumkin.

5.3. Nuqsonlarning zaryad tashuvchilarni yutish yuzasi

Agar yarimo'tkazgich xususiy bo'lsa, ya'ni $n=p$ hamda u yoritilganda paydo bo'ladigan foto zaryad tashuvchilar $\Delta n = \Delta p$ ga teng bo'ladi. Bu holatda elektron va kovaklarning yashash vaqti ham $\tau_n = \tau_p$ (10^{-7} s) bo'ladi. Bunday materiallarda fotoo'tkazuvchanlikni katta miqdorda o'zgartirish mumkin emas.

Ammo, elektronika sanoatida ishlatiladigan barcha yarimo'tkazgich materiallar aniq n yoki p turdagi materiallardir. Ularda ma'lum miqdorda donor (N_d) va akseptor (N_a) kirishma atomlari musbat (N_d^+) hamda manfiy (N_a^-) ionlashgan holatda bo'ladi.

Musbat zaryadlangan nuqsonlar o'tkazuvchanlik energetik sohasidagi elektronlarni (N_d^+) o'ziga olib (yutib), uning valent energetik sohasidagi kovaklar bilan uchrashuviga, ya'ni rekombinatsiya qilishiga vositachi bo'lib xizmat qiladi. Xuddi shunday manfiy zaryadlangan (N_a^-) nuqsonlar valent sohasidagi

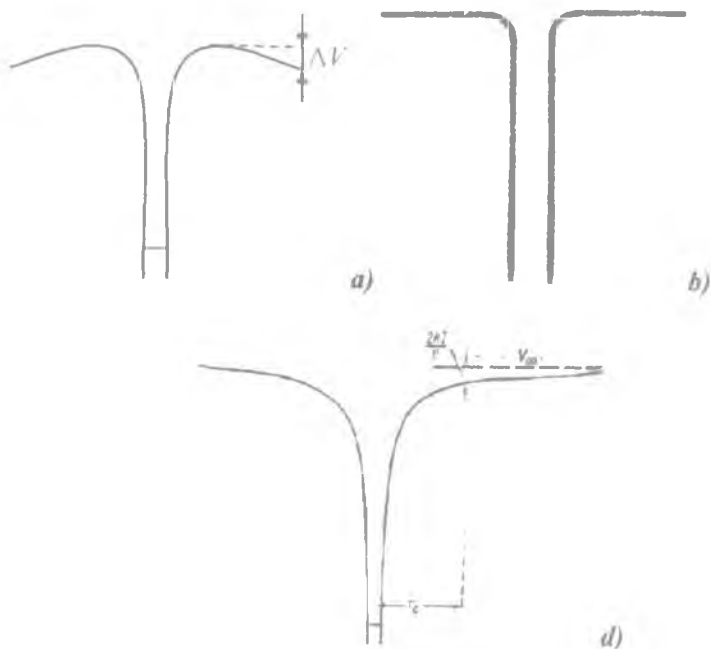
kovaklarni o'ziga olib (yutib), uning o'tkazuvchanlik sohasidagi elektronlar bilan tezroq uchrashuviga (rekombinatsiya qilinishiga) vositachi bo'lib xizmat qiladi.

Odatda kirishma atomlarning konsentratsiyasi xona haroratida xususiy zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi (n_i) dan juda ko'p miqdorda ($100\text{--}10^{10}$) marta bo'lganligi uchun ularning zaryad tashuvchilar yashash vaqtiga ta'siri asosiy faktor bo'ladi.

Mana shunday nuqsonlarning elektron va kovaklarni o'ziga olish ehtimolligini ko'rsatadigan fizik kattalik kiritilgan. Bu ham bo'lsa, **nuqsonlarning zaryadlangan zarrachalarni yutish yuzasi (S , sm^2)** deb ataldi.

Har bir nuqsonning o'ziga xos elektron (S_n) va kovakni (S_p) yutish yuzalari mavjud. Bu qiymat o'rtacha $S \sim 10^{-13} \text{ sm}^2$ bo'ladi. Biz ko'rayotgan nuqson musbat zaryadlangan bo'lsa, unda nuqson elektronni tortish kuchi hisobiga faqat o'sha yuza doirasida emas, balki, yuza yonidan o'tayotgan elektronni ham yutishi, ya'ni tortib olishi mumkin. Agar nuqson ikki karra musbat zaryadlangan bo'lsa, uning elektronga ta'sir doirasi yanada kengayadi. Bu holatda o'z yuzasidan ancha uzoqda bo'lgan elektronni ham tortib oladi. Demak, nuqsonning elektronni yutish yuzasi ortganday bo'ladi. Musbat zaryadlangan nuqsonning kovakni yutish yuzasi yoki tortib olish doirasini ko'rsak, unda kovak ham musbat zaryadga ega bo'lgani uchun nuqson va kovak o'rtasida o'zaro itarish kuchlari natijasida yutish yuzasi ancha kamayadi. Agar nuqson ikki karra musbat zaryadlangan bo'lsa, itarish kuchlari yanada ortganligi tufayli nuqsonning kovakni yutish yuzasi yanada kichiklashadi. Xuddi shunday, nuqson bir yoki ikki karra manfiy zaryadlangan bo'lsa, unda nuqsonning elektronni yutish yuzasi kichiklashadi, kovakni yutish yuzasi esa kattalashadi. Bulardan shuni anglash kerakki, nuqsonning yutish yuzasi o'z atrofida hosil qilgan potensialga bog'liq ekan.

5.3-rasmda yutish yuzalarini nuqsonning zaryadlanganligiga qarab o'zgarishini keltirildi.



5.3-rasm. Elektronning yutish yuzalari: a) nuqson manfiy zaryadlangan bo'lganda, b) nuqson neytral bo'lganda, d) nuqson musbat zaryadga ega bo'lganda

Zaryad tashuvchilarning yashash vaqti uni yutib (tortib) oladigan nuqsonlarning qiymati bilan aniqlanadi. Odatda nuqsonlarning zaryad tashuvchilarni yutish yuzasi $S=10^{-13} \div 10^{-21} \text{ sm}^2$ oralıqda o'zgarishi mumkin. Demak, τ_n va τ_p ni kiritilayotgan nuqsonlarning konsentrasiyasi bilan emas, balki ularning yutish yuzasi (S) ni boshqarish yo'li bilan juda katta oralıqda boshqarish mumkin ekan, ya'ni fotoo'tkazuvchanlikni ham aniqlaydigan asosiy parametr bu yarimo'tkazgich materiallaridagi mavjud nuqsonlarning yutish yuzasi ekan. Bunga asosan zaryadlar yashash vaqtining qiymatlarini quyidagicha yozish mumkin:

$$\tau_n = \frac{1}{N_1 \cdot V \cdot S_n}, \quad \tau_p = \frac{1}{N_2 \cdot V \cdot S_p} \quad (5.8)$$

N_1, N_2 – elektronlar va kovaklarni yutuvchi nuqsonlarning konsentratsiyasi, V – elektronning issiqlik tezligi.

$$V = \sqrt{\frac{2kT}{m}} \quad (5.9)$$

$T=300^\circ\text{C}$, $I=10^7$ sm/sek. S_n, S_p – mavjud nuqsonlarning elektron va kovakni yutish yuzasi.

Bundan kelib chiqadiki, har qanday nuqson uchun elektron va kovakni yutish yuzasi bir xil bo'lishi ehtimoldan holi. shuning uchun elektron va kovaklarning yashash vaqti ham bir xil bo'lmaydi. Yarimo'tkazgich materialining hajmida mavjud bo'lgan nuqsonlar tabiatiga mos holda rekombinasiya jarayoni ham har xil bo'ladi.

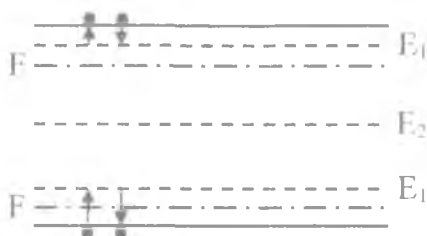
Nuqsonlarning konsentratsiyasini va ularning zaryadlangan holatini o'zgartirishi orqali (N^+, N^- yoki N^0, N^+) zaryad tashuvchilarning yashash vaqtini ancha katta oraliqda ko'paytirish va kamaytirish mumkin ekan

5.4. Rekombinatsiya va fotosezgirlikni oshiruvchi nuqsonlar

Kristall panjaradagi nuqsonlar o'z tabiatiga mos holda yarimo'tkazgichning taqiqlangan sohasida har xil energetik sathlar hosil qiladi. Bu energetik sathlarning ionizatsiyalashishi, ya'ni o'tkazuvchanlik va valent sohalarga yaqin hamda uzoqroq joylashganligiga qarab, zaryad tashuvchilarning yashash vaqtiga har xil ta'sir ko'rsatadi. Quyidagi 5.4-rasmda uch xil faollashuv energiyaga ega bo'lgan yarimo'tkazgich keltirilgan. Rasmda E_i energetik sathlar o'tkazuvchanlik va valent sohalarga juda yaqin joylashgan bo'lgani uchun, o'tkazuvchanlik sohasidagi elektronlarni o'ziga tortib, yutib olgani bilan ulardagi elektronlar issiqlik energiyasi kT hisobiga yana qaytib o'tkazuvchanlik sohasiga o'tishi va bu

jarayon hamma vaqt yuz berib turishi mumkin. Xuddi shunday valent sohasi yaqinida joylashgan sathdan valent sohasidagi kovaklar yutilib, yana o'z holatiga qaytishi mumkin.

Bunday hollarda rekombinatsiya jarayoni sodir bo'lmaydi, chunki elektron kovak bilan uchrashib yo'q bo'lib ketmaydi. Bunday energetik sathlar **yopishuvchi energetik sathlar** deb ataladi.

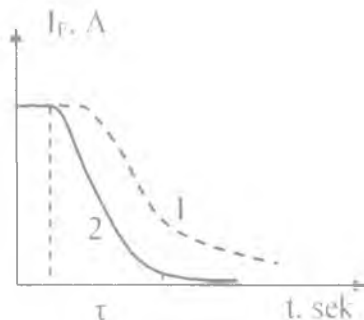


5.4-rasm. Uch xil faollashuv energiyasiga ega bo'lgan yarimo'tkazgich

Energetik sath taqiqlangan sohaning o'rtalarida joylashgan bo'lsa, u holda o'tkazuvchanlik sohasidan yutib olingan elektronlarni yana o'tkazuvchanlik sohasiga qaytib chiqish ehtimoli juda kam bo'ladi, chunki ularning faollashuv energiyasi kT dan juda katta bo'lgani uchun energetik sathning elektronlar bilan band va bo'sh bo'lish ehtimoliga qarab, yutib olgan elektronlar valent sohasidagi kovaklar bilan uchrashib, o'zaro rekombinatsiya bo'ladi. Energetik sathni hosil qilgan nuqsonning elektron va kovaklarni yutish yuzasi nisbatiga (S/S_p) qarab, zaryad tashuvchilarning yashash vaqti aniqlanadi.

Demak, biror energetik sathdan elektronni o'tkazuvchanlik sohasiga chiqarish ehtimoli uning shu sathlar yutish ehtimolidan katta bo'lsa, bunday energetik sathlar **yopishtiruvchi sathlar**, agar teskari bo'lsa, bunday sathlar **rekombinatsion sathlar** deb ataladi.

Fermi sathining (haroratni o'zgartirishi orqali) o'tkazuvchanlik sohasidan yoki valent sohasidan taqiqlangan soha o'rtasiga siljishi yopishtiruvchi sathlarning rekombinatsiya markazlarga aylanish ehtimolligi ortadi.



5.5-rasm. Fototokning kamayish jarayoni

Taqiqlangan soha o'rtalarida nuqsonlar hosil qilgan energetik sathlar faqat rekombinatsion sathlar bo'lib xizmat qiladi. Quyidagi 5.5-rasmda yopishtiruvchi energetik sathlari bo'lgan (1) va ularsiz (2) faqat rekombinatsiya sathlari bor bo'lgan yarimo'tkazgich materiallarini bir xil yorug'lik impulsi bilan yoritgandagi fototokning yorug'lik impulsi o'chirilganda kamayish relaksatsiyasi ko'rsatilgan. Bu relaksatsiya chiziqlaridan zaryad tashuvchilarning yashash vaqtini aniqlash mumkin.

Odatda zaryad tashuvchilarning yashash vaqti yorug'lik o'chgandan so'ng statsionar fototok qiymatining 50% ga qaytishi uchun kerak bo'lgan vaqtga teng deb qabul qilingan. Agar yarimo'tkazgichga ikki karrali ionlashishi mumkin bo'lgan kirishma atomlari kiritilgan bo'lsa, misol uchun donor konsentratsiyasi N_d bo'lgan kremniyga ikkita energetik sath hosil qiladigan akseptor $Zn(N_d)$ ni atomlari kiritilsa va $N_a \leq 2N_d$ shart bajarilganda, Zn elementi atomlarining asosiy qismi Zn^{+} holatda bo'ladi. Bunday nuqsonda kovaklarning yutish yuzasi S_i^{+} juda katta bo'ladi. Ammo uning elektronni yutish yuzasi S_p juda kichik bo'ladi, ya'ni $S_n \ll S_p$. Bunday

holatda elektronlarning yashash vaqti keskin oshadi, kovaklarniki esa kamayadi. Demak, yashash vaqti ancha kichik bo'lgan elektronning yashash vaqtini oshirish hisobiga fotoo'tkazuvchanlikni shunga mos oshirish mumkin. Misol uchun Zn atomlari kiritilguncha $\tau_n \sim 10^{-7}$, $\tau_p \sim 10^{-7}$ sek bo'lgan bo'lsa, Zn atomlari kiritilgandan so'ng ($N_{Zn} \sim 10^{15} \text{ sm}^{-3}$) $\tau_n \sim 10^{-4}$, $\tau_p \sim 10^{-10}$ sek bo'ladi va shunga mos $S_n \sim 10^{-13} \text{ sm}^2$, $S_p \sim 10^{-20} \text{ sm}^2$ bo'ladi. U holda fotoo'tkazuvchanlik quyida ifodalar orqali hisoblanadi.

$$\Delta\sigma_0 = lk\beta e(\mu_n\tau_{n0} + \mu_p\tau_{p0}) \quad (5.10)$$

$$\Delta\sigma_1 = lk\beta e(\mu_n\tau_{n1} + \mu_p\tau_{p1}) \quad (5.11)$$

$$\frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_0} = 10^{-7} \quad (5.12)$$

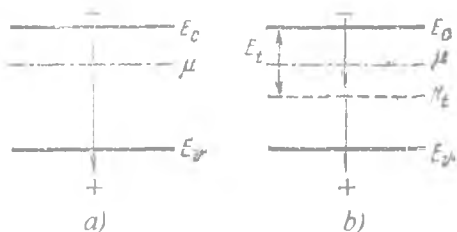
qiymati marta oshadi. Zn atomlarini ma'lum miqdorda $n-Si$ ga kiritish bilan uning fotosezgirlikni 10^7 ga oshirish mumkin. Shuning uchun Zn atomlariga mos kelgan energetik sath fotosezgirlikni oshiruvchi sath deb ataladi. Xuddi shunday p - turdagi Si ga S , Se , Mn atomlarini kiritish yo'li bilan kovaklarning yashash vaqtini oshirish mumkin.

Odatda yarimo'tkazgich materiallarda asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning yashash vaqti hisobga olinadi va u yarimo'tkazgich materialining asosiy parametrlaridan biri hisoblanadi. Bunga sabab asosiy bo'lgan zaryad tashuvchilar ko'p bo'lganligi uchun ularning yashash vaqti ular bilan rekombinatsiya qilinadigan vaqtiga bog'liq, ya'ni asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarga bog'liq. Chunki asosiy zaryad tashuvchilarning yo'qolishi (o'yindan chiqishi) bu faqat asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning rekombinatsiyasi bilan aniqlanadi. Demak, har qanday n - tur materiallarda zaryad tashuvchilarning yashash vaqti deganda, undagi kovaklarning yashash vaqti tushuniladi p - turda aksincha bo'ladi.

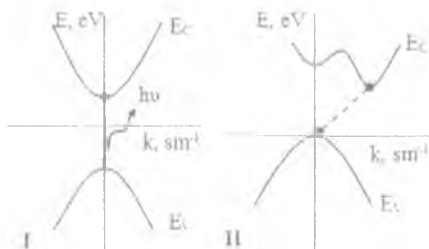
5.5. Rekombinatsiya turlari

Yarimo'tkazgichlarda rekombinatsiya elektron o'tishiga qarab, ikki turga:

- **sohalararo**, ya'ni o'tkazuvchanlik sohasidagi elektronning valent sohadagi kovak bilan to'g'ridan-to'g'ri bo'ladigan rekombinatsiya;
- **rekombinatsiya markazlari orqali**, ya'ni elektron kovak bilan rekombinatsiya bo'lishidan oldin birorta rekombinatsiya markaziga yutilishi, undan so'ng shu nuqson vositasida valent sohaga o'tib, kovak bilan rekombinatsiyalanish jarayonlariga bo'linadi.



5.6-rasm. Rekombinatsiya turlari: a) elektronning o'tkazuvchanlik sohasidan valent sohadagi kovak bilan to'g'ridan-to'g'ri bo'ladigan rekombinatsiyasi, b) elektron kovak bilan rekombinatsiya bo'lishidan oldin rekombinatsiya markaziga o'tishi undan so'ng shu nuqson vositasida valent sohaga o'tib, kovak bilan rekombinatsiyalanadi



5.7-rasm. To'g'ri va noto'g'ri o'tishli yarimo'tkazgichlarda rekombinatsiya

1-turdagi rekombinatsiya asosan, energetik sathlar tuzilishi to'g'ri bo'lgan yarimo'tkazgichlarda ($GaAs$, GaP , ...) sodir bo'ladi.

2-turdagi rekombinatsiya energetik sathlar tuzilishi noto'g'ri bo'lgan (Si , Ge , ...) yarimo'tkazgich materiallarida sodir bo'ladi

1-turdagi rekombinatsiyada (5.6-rasm, a) elektron to'g'ri valent sohaga tushib, kovak bilan rekombinatsiya bo'lgani uchun energiyaning saqlanish qonuniga asosan elektron $E_c - E_v = E_g$ ga teng energiya yo'qotadi. Bu energiya yorug'lik energiyasi sifatida $h\nu = E_g$ foton bo'lib chiqishi mumkin. Bu **yorug'lik chiqaradigan rekombinatsiyalar** deyiladi.

Bu o'ta muhim xossa bo'lib, yorug'lik chiqaradigan diodlar va yarimo'tkazgich lazerlar energetik sohalarini tuzilishi to'g'ri bo'lgan yarimo'tkazgichlar asosida yaratiladi. Albatta, bunday hollarda yarimo'tkazgichning taqiqlangan sohasida faol ishlaydigan rekombinatsiya markazlari faolligini kamaytirish kerak bo'ladi

2-tur rekombinatsiyada elektron (5.6-rasm, b) o'z energiyasini rekombinatsiya markazini hosil qilgan atomga beradi. Elektron kovak bilan rekombinatsiya qilingandan so'ng yo'qoladi, energiyasini kristall panjaraga, ya'ni asosiy atomlarning issiqlik energiyasini oshirishga sarflaydi. Bunda har xil energiyaga ega bo'lgan fononlar paydo bo'ladi. Albatta, paydo bo'lgan fononlar energiyasi taqiqlangan energetik soha energiyasidan juda kam bo'lishi bilan birga har xil energiyaga ega bo'lgan ancha katta miqdordagi fononlar paydo bo'lishi mumkin. Demak, fononlar kristall panjarada *okustik* va *optik tebranishlarni* yuzaga keltiradi.

5.6. Yorug'likning yarimo'tkazgichlarda yutilishi yoki optik hodisalar

Yarimo'tkazgichlarda optik hodisalar o'z ichiga ko'p jarayonlarni oladi. Bu yarimo'tkazgichga tushayotgan yorug'lik spektrining yarimo'tkazgich yuzasidan qaytishi (bu yarimo'tkazgich sirt holatiga juda bog'liq), yorug'likning hajm bo'ylab o'tib ketishi (bu esa

yarimo'tkazgich energetik sohalar tuzilishi namuna qalinligi bilan bog'liqdir) hamda yorug'likni yarimo'tkazgich hajmida yutilish jarayonlaridir. Bu jarayonlar o'rganilayotgan yarimo'tkazgichning eng asosiy fundamental parametrlaridir. Ular materiallarning energetik sohalar tuzilishi va taqiqlangan sohadagi mavjud energetik sath tabiati haqida to'la ma'lumot beribgina qolmay, shu yarimo'tkazgich materialining optik hamda fotoelektrik asboblari yaratishdagi funksional imkoniyatlarni ochib beradi.

Kristall yuzasiga tushayotgan yorug'lik intensivligi (I_0) sirtidan qaytadigan (I_q), kristallga yutiladigan (I_{yu}) va kristalldan o'tadigan (I_o) yorug'liklar yig'indisidan iborat:

$$I_0 = I_q + I_o + I_{yu} \quad (5.13)$$

Materiallarning xossalarini odatda I_q , I_{yu} , I_o larga mos holda qaytish ko'effitsiyenti (R), yutilish ko'effitsiyenti (α) va o'tish ko'effitsiyenti (T) deb belgilash mumkin bo'ladi:

$$R = \frac{I_q}{I_0}, \quad K = \frac{I_{yu}}{I_0}, \quad T = \frac{I_o}{I_0} \quad (5.14)$$

Buger – Lambert qonuniga asosan, kristall yuzasiga tushgan yorug'lik intensivligi kristallda yutiladi va uning miqdori kristall qalinligiga eksponensial qonun bilan kamayib boradi.

$$I = I_0(1 - k) \cdot e^{-\alpha d} \quad (5.15)$$

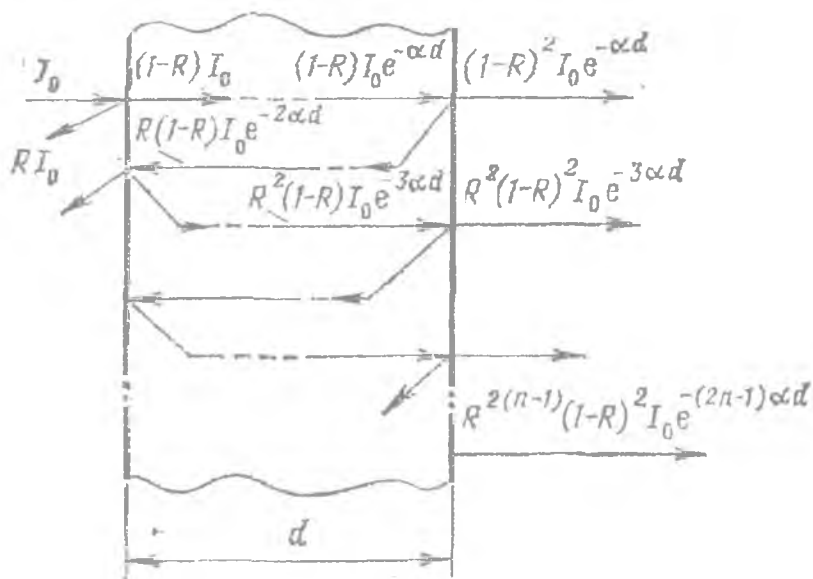
Bunda α —yutilish ko'effitsiyenti deb ataladi va uning birligi sm^{-1} . Bu munosabatga ko'ra qaytgan yorug'lik intensivligidan qolgan qismi ($I_0(1-k)$)ning qiymati e marta kamayishi uchun kerak bo'lgan kristall qalinligi (Δd) ning teskari qiymati $\frac{1}{\Delta d} = \alpha$ bo'ladi, ya'ni Δd —fotonlarning erkin yugurish yo'li hisoblanadi.

Bunda:

$$\alpha(sm^{-1}) = N(sm^{-3}) \cdot S(sm^2) \quad (5.16)$$

ga teng bo'ladi. N – hajm birligidagi fotonni yutuvchi atomlar miqdori, S – fotonni yutuvchi atomning yutish yuzasi. Odatda uning qiymati $S \sim 10^{-17} \text{ sm}^2$.

Yutilish koeffitsiyentining fizik ma'nosi bu – atomlarning fotonlar bilan uchrashib, o'z energetik holatini o'zgartirishidir. Shuning uchun atomlar konsentratsiyasi (N) qancha ko'p va atomlarning foton bilan uchrashish yuzasi (S) qancha katta bo'lsa, fotonlarning yutilish ehtimolligi shuncha katta bo'ladi.



5.8-rasm. Yorug'likning yarimo'tkazgichdan qaytishi, o'tishi va yutilishi

5.8-rasmdan ko'rinib turibdiki, yorug'lik yarimo'tkazgich sirtlaridan (oldin va orqa tomonidan) bir necha bor qaytadi, bu

yorug'likning yutilish va o'tish xossalriga ta'sir qiladi. Bunda o'tish ko'effitsiyenti quyidagiga teng bo'ladi:

$$T = \frac{(1 - k)^2 \cdot e^{-\alpha d}}{1 - k^2 e^{-2\alpha d}} \quad (5.17)$$

Agar (5.17) da αd ning qiymati juda katta bo'lsa, unda maxrajdagi ikkinchi hadni inobatga olmasak ham bo'ladi, u holda o'tish ko'effitsiyenti

$$T = (1 - k)^2 \cdot e^{-\alpha d} \quad (5.18)$$

ga teng bo'ladi. Bundan yutilish ko'effitsiyentini aniqlash mumkin:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln T(1 - k)^2 \quad (5.19)$$

Agar yarimo'tkazgich materialining qaytarish ko'effitsiyenti k aniq bo'lsa, unda har xil qalinlikka ega bo'lgan bir xil yarimo'tkazgichda yorug'likning o'tishini o'lchab, yutish ko'effitsiyentini quyidagicha aniqlash mumkin:

$$\alpha = \frac{1}{d_2 - d_1} \cdot \ln \frac{T_1}{T_2} \quad (5.20)$$

Albatta, yarimo'tkazgichning hamma optik parametrlari α , T , k tushayotgan yorug'likning to'lqin uzunligiga bog'liq bo'ladi. Shuning uchun yarimo'tkazgich materiallarining optik xossalarni o'rganishda yuqoridagi uchta parametrlarning (T , k , α) yorug'lik to'lqin uzunligiga bog'liqligi aniqlanadi. Bu **parametrlar spektral bog'lanish ($k(\lambda)$, $T(\lambda)$, $\alpha(\lambda)$)** lar deb ataladi.

Bunday bog'lanishlar tabiati, kristall tuzilishi, uning energetik sathlarining turlari, mavjud kirishma atomlar hosil qilgan energetik sathlar, kristall panjara tebranishlari, yarimo'tkazgich materialining sirt holati, eksitonlar haqida to'la ma'lumot olish imkonini berish

bilan birga shu o'rganilayotgan yarimo'tkazgichning optik xossalari va imkoniyatlarini to'la ochib beradi.

5.7. Yorug'likning yarimo'tkazgichda yutilish tabiati haqida qisqacha ma'lumot

Yarimo'tkazgichlarda **yorug'lik yutilishi** va uni ifodalovchi **yutish ko'effitsiyenti α** – har xil tabiatga ega bo'lgan yutilishlar yig'indisidan iborat bo'ladi.

Shuning uchun ko'rilayotgan yutish jarayonida qaysi turdagi yutilishning hissasi ko'proq va uni qaysi hollarda to'la namoyish etish mumkinligini ko'rib chiqamiz. Yorug'likning (fotonning) yutilishi fotoenergiyaning, elektron va atomlarning energetik holatini o'zgartirishga sarflanishini nazarda tutib, asosiy yutilish mexanizmlarini quyidagi turlarga bo'lish mumkin:

- *Yorug'likning fundamental yoki xususiy yutilishi* – elektronlarning valent sohadan o'tkazuvchanlik sohasiga o'tishini ta'minlaydigan yutilish;

- Zaryad tashuvchi (elektron va kovak) lar o'tkazuvchanlik sohasi ichidagi (elektron) yoki valent sohasi ichidagi energetik holatlarni o'zgartirishga olib keladigan *erkin zaryad tashuvchilar tomonidan yutilish*;

- Elektron kirishma atomlari hosil qilgan energetik sathlardan o'tkazuvchanlik sohasiga yoki elektronlarning valent sohasidan akseptor energetik sathlariga o'tishdagi *kirishma atomlar orqali yutilish*;

- Fotoenergiyaning kristall panjara tebranishlarining xossalari o'zgartirishga olib keladigan *fonon yutilish*.

- Eksitonlarni vujudga keltiradigan yoki ulardagi elektron va kovak bog'lanishni uzish bilan erkin elektron va kovak hosil qilishga sarflanadigan – *eksiton yutilish*.

5.8. Xususiy yutilishlar

Bizga ma'lumki, yarimo'tkazgichlar energetik sohalarining tuzilishi asosan ikki xil bo'ladi, ya'ni to'g'ri energetik sohalar va noto'g'ri energetik sohalar.

To'g'ri energetik sohalar deganda, o'tkazuvchanlik sohasining minimum qiymati valent sohasining maksimum qiymatini to'liq vektori (k) ning bir qiymatiga to'g'ri kelgan sohalar tuzilishiga aytiladi (5.9-rasm, *a*). Bunday kristallarga *GaAs*, *GaP*... va boshqalar kiradi.

Agar o'tkazuvchanlik sohasining minimum qiymati valent sohasining maksimum qiymatlar to'liq vektorining har bir qiymatlariga to'g'ri kelsa, bunday energetik sohalar **noto'g'ri energetik sohalar** deb ataladi. Bularga *Si*, *Ge* kristallarining sohalar tuzilishi kiradi (5.9-rasm, *b*).

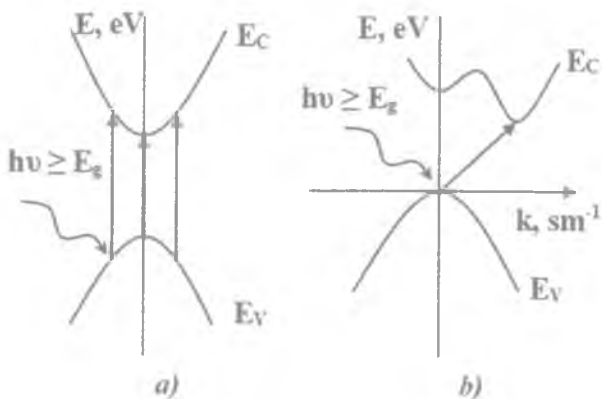
Yorug'likning soha-soha bo'yicha o'tishi, ya'ni xususiy yutilish (foton yutilishi hisobiga elektronning valent sohasidan o'tkazuvchanlik sohasiga o'tishi) holatida yutilish koeffitsiyentining foton energiyasiga bog'liqligi har xil bo'ladi.

Xususiy yutilishning spektr bog'lanishi – valent va o'tkazuvchanlik sohalaridagi energetik holatlar zichligining energiya bo'yicha taqsimoti va elektronning o'tish ehtimoliga bog'liq bo'ladi.

To'g'ri yutilish bo'lgan holatda energiya va impuls saqlanish qonuni bajarilishi lozim, ya'ni elektronning o'tkazuvchanlik holatdagi energiya qiymati, uning valent sohasidagi energiya qiymati fotonenergiyasiga teng bo'lishi va impulslar ham shunday bo'lishi kerak. Chunki fotonning impulsi elektron impulsiga nisbatan juda kichik bo'lganligi uchun u elektronning oxirgi holat impulsiga ta'sir etmaydi. Bunda yutilish koeffitsiyentining spektrga bog'liqligi quyidagicha ifodalanadi:

$$\alpha = A \cdot (h\nu)^{1/2} \quad (5.21)$$

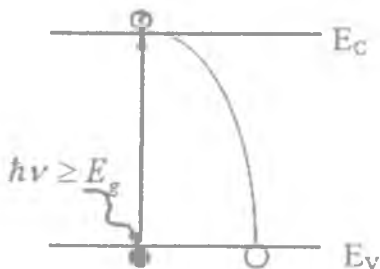
Bunda A – proporsionallik koeffitsiyenti.



5.9- rasm. Yarimo'tkazgichlardagi to'g'ri (a) va noto'g'ri (b) elektron o'tishlar

Shuni ta'kidlash lozimki, (5.21) ifoda energetik sohalari parabola bo'lgan holatlar uchundir. Kremniy kristallining zond tuzilishi quyidagi 5.9-rasmda ko'rsatilgan:

Bunda elektronning boshlang'ich holati A va oxirgi holati B bo'lib, sohalararo o'tish ikki bosqichdan iborat bo'ladi. P_1 impulsni elektron $h\nu$ energiyali fotonning yutilishi natijasida valent sohadan to'g'ri o'tkazuvchanlik sohasiga vertikal chiqadi, undan so'ng, har xil nuqsonlarga sochilish natijasida P_2 impuls bilan B holatga o'tadi.



5.10-rasm. $h\nu$ foton yutgan elektronda sodir bo'ladigan jarayon

Sinov suvollari:

1. Fotoo'tkazuvchanlik nima va u nimalarga bog'liq?
2. Fotogeneratsiya nima?
3. Yorug'likning qattiq jismlarda yutilish koeffitsiyentining miqdori nima bilan aniqlanadi?
4. Xususiy va kirishma atomlari orqali fotoo'tkazuvchanligini aytib bering.
5. Zaryad tashuvchilarning yashash vaqti nima va u nimalarga bog'liq?
6. Fotosezgirlik nima?
7. Fotosezgirlikni oshiruvchi markazlar haqida ma'lumot bering.
8. Buger-Lambert qonunini aytib bering.
9. Rekombinatsiya nima va uning turlari?
10. Yutish yuzalari haqida ma'lumot bering.

Yarimo'tkazgichlarda fotoelektrik hodisalar mavzusiga doir masalalar:

1. Tushayotgan yorug'likning to'liq uzunligi va shu yorug'lik fotoenergiyasi orasidagi bog'lanishni $h\nu = E = \frac{1,24}{\lambda}$ ekanligini hisoblab chiqaring.

2. Yarimo'tkazgich yuzasiga energiyasi $h\nu = 0,7$ eV, intensivligi $I = 10^{16}$ foto/sm $\cdot$ s bo'lgan yorug'likning berayotgan energiyasini V_t da hisoblang.

3. Agar yarimo'tkazgichga to'liq uzunligi $\lambda = 2, 3, 5$ mkm bo'lgan yorug'liklar tushayotgan bo'lsa, bunda fotoo'tkazuvchanlikni sezishi uchun uning taqiqlangan sohasida qanday energetik sathlar bo'lishi kerak?

4. Buger-Lambert qonuniga asoslanib, yorug'likni jismda nisbatan yutilishini chizib bering. Yutilish koeffitsiyenti $\alpha = 10^4, 10^2, 10^1$ va 10^{-1} sm $^{-1}$ bo'lgan holatlar uchun.

5. Yarimo'tkazgichda harorat pasayishi bilan xususiy fotoo'tkazuvchanlikka mos keluvchi yorug'lik to'liq uzunligi qaysi tomonga siljiydi? Kremniy maeriali uchun $T = 0$ K, 100 K va 400 K haroratlarda hisoblang va tushuntirib bering.

6. Fotoo'tkazuvchanlikni sezish uchun muvozanat va nomuvozanat zaryad tashuvchilar nisbati qanday bo'lishi kerak?

7. Zaryad tashuvchilarning yashash vaqtini oshirish uchun nimalarga e'tibor berish kerak? Masalan, kremniyda $\tau=10^{-9}\div10^{-11}$ s va $\tau=10^{-3}\div10^{-4}$ s ga oshirish uchun nima qilish kerak?

8. To'liq uzunligi $\lambda = 500$ nm, 650 nm, 900 nm va 1500 nm bo'lgan yorug'lik oqimiga mos keluvchi fotonlar energiyasini hisoblang.

9. Inson o'zidan $\lambda=9,6$ mkm infraqizil nur tarqatadi ($T=36,6$ °C). Bunday nurlarni sezish uchun Si, Ge va GaAs kristallarida energetik sathlar holatini chizib ko'rsating.

10. Si, Ge kristallarida nur chiqishida rekombinatsiya bo'lishi mumkinmi, agar mumkin bo'lmasa, nima uchun?

Yarimo'tkazgichlarda fotoelektrik hodisalar mavzusiga doir masalalarning yechilishi:

Masalaning berilishi: Yarimo'tkazgichda harorat pasayishi bilan xususiy fotoo'tkazuvchanlikka mos keluvchi yorug'lik to'liq uzunligi qaysi tomonga siljiydi? Kremniy materialida $T=0$ K, 100 K va 400 K ga teng bo'lgan haroratlar uchun hisoblang va tushuntirib bering.

Masalaning yechilishi: Tushayotgan yorug'likning to'liq uzunligi va shu yorug'lik fotoenergiyasi orasidagi bog'lanish

$h\nu=E=\frac{1,24}{\lambda_{\min}}$ ifodasidan yorug'likning to'liq uzunliklari qiymatlari

topib olinadi:

$T_1=0$ K $T_2=100$ K $T_3=400$ K haroratlar uchun $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 - ?$

$$\lambda_1 = \frac{h\nu}{E_{g1}} = \frac{1,24 \text{ mkm}}{1,17} = 1,05 \text{ mkm} \\ = 1,1 \text{ mkm}$$

$$\lambda_2 = \frac{1,24}{1,13}$$

$$\lambda_3 = \frac{1,24}{1,01} = 1,22 \text{ mkm}$$

$$E_g = E_{g0} \pm \alpha T \quad (5.22)$$

$$E_{g2} = 1,17 - 4 \cdot 10^{-4} \cdot 10^2 = 1,17 - 0,04 = 1,13 \text{ eV}$$

$$E_{g3} = 1,17 - 4 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 10^2 = 1,17 - 0,16 = 1,01 \text{ eV}$$

Javob: Si da harorat oshsa, xususiy fotoo'tkazuvchanlikka mos keluvchi yorug'lik to'lqin uzunligi ham oshib borar ekan.

6. YARIMO'TKAZGICHLARDA KINETIK HODISALAR

6.1. Yarimo'tkazgichlarda kinetik hodisalar

Kinetik hodisalar deganda – yarimo'tkazgichga tashqaridan yo'naltirilgan ta'sir (elektr va magnit maydoni, harorat gradiyenti) natijasida zaryad tashuvchilarning ma'lum yo'nalish bo'yicha siljishi va natijada shunga mos tok hamda elektr yurituvchi kuchlar hosil bo'lishiga aytiladi.

Tashqaridan biror ta'sir bo'lmaganda yarimo'tkazgichlarda zaryad tashuvchilar muvozanat holatda bo'ladi. Demak, moddani tashkil etgan barcha atomlar va elektronlar energiyasi, moddani o'rab turgan muhit haroratiga mos issiqlik energiyasi – kT ga teng bo'lish bilan birga, elektronlarning energetik sathlar bo'yicha taqsimoti ham shu haroratga mos holda bo'ladi. Bu holatda yarimo'tkazgichdagi barcha elektronlar tartibsiz issiqlik harakatida bo'ladi. Ularning yo'nalishlar bo'yicha taqsimoti ham bir xil bo'lganligi uchun bir tomonga qancha elektron harakat qilayotgan bo'lsa, unga qarama – qarshi tomonga ham shuncha elektron harakatda bo'ladi. Natijada yarimo'tkazgichda tok hosil bo'lmaydi. Yarimo'tkazgichga tashqi elektr manba ulansa, har bir elektronga maydon yo'nalishi bo'yicha $F = eE$ – kuch ta'sir etadi. U holda, elektron o'z tezligini ham, miqdorini ham yo'nalish bo'yicha o'zgartiradi, ya'ni tezlanish oladi:

$$\alpha = \frac{eE}{m_n^\times}, \quad \alpha = \frac{\Delta V}{t}, \quad \Delta V = \frac{eE}{m_n^\times} \cdot t \quad (6.1)$$

Nazariy jihatdan qaraganda, (6.1) ifodaga mos elektronning tezligini cheksiz oshirish mumkin bo'lar edi. Ammo, yuqoridagi boblarda ko'rsatilganidek, elektronning harakatiga kristall panjarasidagi mavjud har xil nuqsonlar bilan (kirishma atomlar, boshqa elektron va kovaklar, panjara issiqlik tebranishi) to'qnashish oqibatida o'z yo'nalishini o'zgartirishi bilan birga, o'z energiyasini yo'qotib, avvalgidek maydon ta'sirida harakat qila boshlaydi. Bu

degani elektron ikkita to'qnashuv orasida erkin harakat qilib ma'lum masofa (l) ni bosib o'tadi. l – elektronning erkin yugurish masofasi, t – ikki to'qnashuv orasidagi vaqt (elektronning erkin yugurish vaqti) deyiladi.

$$\tau = \frac{l}{\Delta v} \quad (6.2)$$

Bunda τ – elektronning tashqi maydon ta'sirida olgan energiyasini to'qnashuv davomida to'la yo'qotib, avvalgidek yo'nalish bo'yicha harakat boshlashiga kerak bo'ladigan vaqt, ya'ni relaksatsiya vaqti.

Relaksatsiya vaqti deb, tashqi ta'sir to'xtagandan so'ng tizimning yana muvozanat holatiga qaytib kelishi uchun lozim bo'lgan vaqtga aytiladi.

Demak, kristallda elektron harakatiga faqat tashqi ta'sir – elektr maydon emas balki, ichki ta'sir, ya'ni elektronning kristall panjara nuqsonlari bilan to'qnashuvi ham sabab bo'lar ekan. Bu ikki kuch o'zaro qarama – qarshi yo'nalgan bo'lib, tashqi ta'sir elektronni maydon bo'yicha harakatga keltirib, muvozanatdan chiqarsa, ichki ta'sir kuchi uning yana takroran muvozanatga qaytarishiga olib keladi. Tashqi elektr maydon ta'sirida yarimo'tkazgichdan tok o'ta boshlaydi va uning qiymati elektr maydon E ga bog'liq bo'ladi:

$$j = \sigma \cdot E \quad (6.3)$$

Bunda: σ – proporsionallik koeffitsiyenti bo'lib, *elektr o'tkazuvchanlik* deb ataladi. Agar yarimo'tkazgichning bir qismida harorat oshirilsa, o'sha joyda elektronlar konsentratsiyasi oshib, harorat past bo'lgan tomonga diffuziya bo'la boshlaydi. Natijada yarimo'tkazgichning issiq va sovuq tomonlari orasida *elektr yurituvchi kuch* paydo bo'ladi, uning qiymati:

$$\Delta E = -\alpha \Delta T \quad (6.4)$$

Bunda: α – yarimoʻtkazgichni solishtirma issiqlik oʻtkazuvchanlik koeffitsiyenti deb ataladi.

Agar yarimoʻtkazgichga bir vaqtning oʻzida ikki xil tashqi kuch, masalan, elektr (E) va magnit maydoni (B) oʻzaro perpendikulyar holda taʼsir etsa, unda elektr va magnit maydon yoʻnalishlariga perpendikulyar boʻlgan yon tomonlarida Xoll elektr yurituvchi kuchi, yaʼni *Xoll elektr potentsiali* paydo boʻladi. Uning qiymati:

$$u_X = R_X \frac{J \cdot B}{t} \quad (6.5)$$

ga teng. Bunda: proporsionallik koeffitsiyenti R_X – *Xoll koeffitsiyenti* deb ataladi.

Xuddi shunday yarimoʻtkazgich materiallariga yorugʻlik taʼsir etganda yoki bir vaqtning oʻzida yorugʻlik va magnit maydon, yorugʻlik va elektr maydoni yoki boshqa kuchlar taʼsir etganda, shunga mos yangi fizik hodisalar – Dember effekti, fotomagnit effekt va boshqalar yuzaga keladi.

6.2. Yarimoʻtkazgichlarda zaryad tashuvchilarning harakatchanligi

Yuqorida keltirilgandek, tashqi elektr maydoni taʼsirida elektronlar oʻrtacha qoʻshimcha tezlik oladi:

$$\bar{V} = a \cdot \tau = -\frac{eE}{m} \cdot \tau \quad (6.6)$$

Ammo, bu tezlik elektronlarning kristall panjaradagi mavjud nuqsonlar bilan doimo toʻqnashuvi natijasida uzluksiz oshmasdan oʻz miqdori va yoʻnalishini oʻzgartirib turardi. τ – elektronning relaksatsiya vaqti boʻlib, uning qiymati panjaradagi nuqsonlar tabiati va konsentratsiyasiga bogʻliq boʻladi. Bizga maʼlumki, yarim-

o'tkazgichga elektr maydoni (E) ta'sir etganda undan o'tayotgan tok zichligi (6.7) ifodaga teng bo'ladi.

Ikkinchi tomondan o'tayotgan tok zichligi zaryadlangan zarralarning birlik vaqt ichida maydon yo'nalishiga teskari yo'nalish bo'yicha siljishi bilan aniqlanadi:

$$j = -en\vec{V} \quad (6.7)$$

yoki

$$j = \sigma E \quad (6.8)$$

(6.7) va (6.8) ifodalardan elektronning o'rtacha tezligi topilsa,

$$\vec{V} = -\frac{\sigma E}{en} \quad (6.9)$$

ga teng bo'ladi. Elektronning maydon ta'siridagi olgan tezligining qiymati (6.6) va (6.9) dan quyidagi ifoda

$$\frac{eE}{m} \cdot \tau = \frac{\sigma E}{en} \quad (6.10)$$

hosil bo'ladi. Bunda: σ — yarimo'tkazgichning solishtirma o'tkazuvchanligi bo'lib:

$$\sigma = en \frac{e}{m} \cdot \tau \quad (6.11)$$

(6.11) dagi

$$\frac{e}{m_n} \cdot \tau = \mu_n \quad (6.12)$$

elektronlarning harakatchanligi deyiladi.

Demak, bundan koʻrinib turibdiki, elektronning harakatchanligi faqat τ , yaʼni relaksatsiya vaqti bilangina aniqlanar ekan.

Oʻtkazuvchanlik ifodasi quyidagicha boʻladi:

$$\sigma = en\mu \quad (6.13)$$

Metallarda relaksatsiya vaqti – ulardagi mavjud $\sim 10^{22} \text{ sm}^{-3}$ elektronlarning oʻzaro toʻqnashuvi bilan aniqlanadi va $\tau \sim 10^{-12}$ sga teng boʻladi.

Yarimoʻtkazgich materiallarda esa elektronlar konsentratsiyasi $n \sim 10^{13} \div 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ boʻlganligi uchun τ ning qiymati asosan elektronning panjaradagi nuqsonlar bilan toʻqnashuvi bilan aniqlanadi. Yuqorida keltirilgan (6.11) ifodadan quyidagini yozamiz:

$$\tau = \frac{\sigma}{e^2 \cdot n} m^* \quad (6.14)$$

Bundan koʻrinadiki, agar relaksatsiya vaqti cheksiz boʻlsa, elektronlar harakatida hech qanday toʻqnashuvlar yuz bermaydigan holat kuzatilib, harakatchanlik va modda solishtirma oʻtkazuvchanligi oʻta oʻtkazuvchanlik holati kuzatiladi. Yuqorida elektronlarning har xil nuqsonlarda sochilishi mavjud ekanligini koʻrib chiqqan edik. Endi ushbu sochilish tushunchasini ham ozgina yoritib oʻtaylik.

Avvalo sochilish ikki xil boʻladi: **elastik sochilish**, yaʼni sochilishda elektron oʻzining kinetik energiyasini yoʻqotmaydi va faqat yoʻnalishini oʻzgartiradi. Bunday sochilish elektronning unga nisbatan massasi juda katta boʻlgan kirishma atomlar bilan toʻqnashganda sodir boʻladi.

Elastik boʻlmagan sochilish – elektron oʻz energiyasini oʻzgartirishi oqibatida, yaʼni oʻzidan massasi kichik boʻlgan nuqsonlar – fotonlar, fononlar bilan toʻqnashuvi asosida yuz beradi.

Endi toʻqnashuv va sochilish hodisalarining mohiyatini koʻrib chiqaylik. Elektronlarning kristalldagi kirishma atomlar yoki ionlar bilan toʻgʻridan – toʻgʻri toʻqnashmagan holda ularning taʼsir doirasi

chegarasiga kirishi bilan o'zining to'g'ri chiziqli harakat yo'nalishini o'zgartirishi, ya'ni sochilish jarayoni kuzatiladi. Agar nuqson manfiy ion bo'lsa, elektron undan uzoqlashadi, agar nuqson musbat ion bo'lsa, u tomonga og'adi, ya'ni elektron o'zining to'g'ri chiziqli harakat yo'nalishidan og'adi. Og'ish burchagi va elektronning ion ta'sirida og'masligini ta'minlovchi eng kam masofa ion tabiatiga, elektron energiyasiga va albatta, moddaning haroratiga bog'liq. Bularning hammasi elektron harakatchanligini chegaralovchi faktorlardir. Elektron harakatchanligi nuqsonlar tabiati va haroratga qarab, qanday o'zgarishi sochilish mexanizmlari bilan aniqlanadi. Bu mexanizmlarni ko'rib chiqishdan oldin unga asos bo'luvchi kinetik hodisalar mohiyatini ochib beruvchi Boltsman nazariyasi bilan tanishib chiqaylik.

6.3. Boltsman tenglamasi

Tizim muvozanat holatda bo'lganida taqsimot funksiyasi f (elektronlarning energetik sathlar bo'yicha taqsimoti) – zaryad tashuvchilar koordinatlari (r), to'liq in vektori (k) va albatta vaqt (t) ga bog'liq bo'lib, uning ifodaviy ko'rinishi quyidagicha bo'ladi:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} f(r, k, t) &= \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial t} - \frac{\partial f}{\partial k} \frac{\partial k}{\partial t} \\ &= \frac{\partial f}{\partial t} + (V \nabla_r f) + \frac{1}{h} (F \nabla_k f) \end{aligned} \quad (6.15)$$

Bunda: V – elektronning tezligi, F – elektronga umumiy ta'sir etuvchi kuch bo'lib, ichki va tashqi ta'sir kuchlari yig'indisidan iborat kattalik.

Tizim muvozanat holatida, ya'ni $df/dt=0$ bo'lganda (6.13) ifodani quyidagicha yozish mumkin:

$$-\frac{\partial f}{\partial t} = (V \nabla_r f) + \frac{1}{h} (F \nabla_k f) \quad (6.16)$$

Umumiy ta'sir kuchning ichki (F_i) va tashqi (F_t) ta'sir kuchlar yig'indisi ekanligini hisobga olsak, unda (6.13) ifoda quyidagi ko'rinishga keladi:

$$-\frac{\partial f}{\partial t} = (V \nabla_r f) + \frac{1}{\hbar} (F_i \nabla_k f) - \frac{1}{\hbar} (F_t \nabla_k f) \quad (6.17)$$

Ichki kuchlar – elektronlarning kristall panjara nuqsonlarida sochilishidan iborat bo'ladi.

Agar elektronlar sochiladigan nuqsonlar orasidagi masofa $\sim 10^{-6}$ sm, ya'ni bir necha o'n panjara doimiysiga teng deb olsak, elektronning nuqson bilan to'qnashish (unda sochilish) vaqti $t = \frac{1}{v} = \frac{10^{-6} \text{ sm}}{10^7 \text{ sm/s}} \sim 10^{-13} \text{ s}$ ga teng bo'lib, bu o'ta tezkor jarayon ekanligi kelib chiqadi. Shu vaqt ichida elektron o'z impulsi tezligini o'zgartira olishga erishadi. Demak, elektron to'qnashuvi o'ta qisqa vaqt ichida sodir bo'ladigan jarayon – fizik hodisa ekan. Mana shu to'qnashuv natijasida taqsimot funksiyasining o'zgarishini quyidagicha yozish mumkin:

$$-\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_i = \frac{1}{\hbar} (F_i \nabla_k f) \quad (6.18)$$

Tashqi ta'sir natijasida elektronlarning harakatga kelishi tufayli taqsimot funksiyasining o'zgarishi quyidagiga teng bo'ladi:

$$-\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_t = (V \nabla_r f) - \frac{1}{\hbar} (F_t \nabla_k f) \quad (6.19)$$

(6.18) va (6.19) – ifodalarning yig'indisi – taqsimot funksiyasining umumiy o'zgarishini ko'rsatadi. Bu *Boltsman tenglamasi* deb ataladi va quyidagicha ko'rinishga ega bo'ladi:

$$df/dt = (df/dt)_i + (df/dt)_t \quad (6.20)$$

Ikkala ta'sir kuchlari mavjud bo'lganda tizim ma'lum bir turg'un holatga ega bo'ladi. Taqsimot funksiyasining to'liq qiymati o'zgarmas qiymatga ega:

$$\frac{df}{dt} = 0. \quad \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_t + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_t = 0 \quad (6.21)$$

Tashqi ta'sir kuchlar tabiati umuman olganda ta'sir kuchlar tabiatini chuqurroq tahlil qilish va mohiyatini o'rganishni taqozo qiladi. Bunda tashqi ta'sir to'xtagandan so'ng tizimning muvozanat holatiga qaytish jarayoni quyidagicha ifodalanadi:

$$-\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_t = \frac{f(r, k, t) - f_o(r, k)}{\tau(k)} = \frac{\Delta f}{\tau(k)} \quad (6.22)$$

Bunda: $f(r, k, t)$ – tashqi ta'sir to'xtagan vaziyatdagi taqsimot funksiyasi, $f_o(r, k)$ – muvozanat holatdagi taqsimot funksiyasi, Δf – tashqi ta'sir natijasida taqsimot funksiyasining vaqt o'tishi bilan yo'qolishi lozim bo'lgan o'zgargan qiymati.

Agar (6.22) ifodani integrallaydigan bo'lsak, unda quyidagi ifodaga ega bo'lamiz:

$$f - f_o = \Delta f = [f - f_o]_{t=0} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (6.23)$$

Bu ifodadan ko'rinib turibdiki, τ – shunday vaqtqi, bu vaqt ichida $\Delta f = (f - f_o)e = 2.7$ marta kamayadi, ya'ni tashqi ta'sir natijasidagi taqsimot funksiyasining o'zgarishi kamayib, muvozanat qiymati tomon intiladi. Bundan ko'rinadiki, τ – tizimning qanchalik tez yoki sekin muvozanat holatiga qaytishini aniqlovchi kattalik ekanligi namoyon bo'ladi. O'z mohiyati nuqtai nazaridan bu kattalik ichki kuchlar elektronlarning kristall panjara nuqsonlar tabiatiga mos sochilish mexanizmi bilan aniqlanadi. Albatta, bu kattalik zaryad tashuvchilarning energiyasiga bog'liq bo'ladi.

6.4. Elektronlarning kristall panjara nuqsonlarida sochilishi

Kristall panjara nuqsonlari o'z tabiatiga ko'ra, elektr neytral, zaryadlangan (musbat, manfiy, bir karra, ikki karra), oddiy nuqtaviy va murakkab bo'lishi mumkin. Shuning uchun ham ulardagi elektronlarning sochilish mexanizmi va bu jarayonning haroratga bog'liqligi alohida o'rganishni talab etadi va elektronlarning harakatchanligi alohida-alohida o'zgarishni talab etadi

Elektronlarning zaryadlangan nuqsonlarda sochilishi

Ma'lumki, har qanday zaryadlangan nuqson o'z atrofida elektr potensial (maydon) hosil qiladi:

$$U(r) = \frac{e^2}{\kappa \cdot r} \quad (6.24)$$

Bunda: κ – moddaning dielektrik doimiysi, r – nuqsondan uzoqlashgan masofa. Zaryadlangan elektron yoki kovak o'z harakat yo'lida albatta, bu nuqson hosil qilgan elektr potensial ta'sirini sezadi. Ammo, elektron o'z to'g'ri chiziqli harakatini ta'sir natijasida o'zgartirishi, ya'ni $d\theta$ burchakka og'ish uchun u ion vonidan eng ko'pi bilan r masofadan o'tishi shart. Demak, $r + 2r$ – radius bilan cheralangan aylana ichida harakatdagi barcha elektronlar (kovaklar) $\theta + d\theta$ burchak oralig'ida og'adi. Demak, $2\pi r dr$ – halqa ichidagi barcha elektronlar zaryadlangan nuqsonda sochiladi. Bu halqa bilan chegaralangan yuza $\sim 2\pi r dr$ – *sochilishning diffirensial yuzasi* deb ataladi

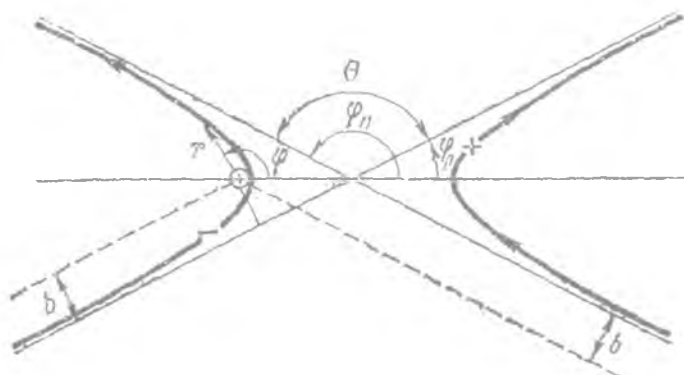
$$\sigma(\theta)d\Omega = 2\pi r \sin\theta d\theta \quad (6.25)$$

(6.25) ni hisobga olsak, quyidagiga ega bo'lamiz:

$$\sigma(\theta) = \frac{r}{\sin\theta} \left(\frac{dr}{d\theta} \right) \quad (6.26)$$

dr ning qiymatini (6.24) dan topsak, quyidagi hosil bo'ladi:

$$dr = -\frac{e^2}{2m\kappa v^2} \frac{1}{\sin \frac{\theta}{2}} d\theta \quad (6.27)$$



6.1-rasm. Elektron va kovaklarning kirishma ionlarida sochilishi

Demak.

$$\sigma(\theta) = \left(\frac{e^2}{2m\kappa v^2} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}} \quad (6.28)$$

bundan elektronlarning sochilish ehtimoli w va shunga mos relaksatsiya vaqtini aniqlash mumkin bo'ladi:

$$w(\theta) = \frac{1}{\sigma(\theta)}, \quad \tau = \frac{1}{\int w(\theta) d\Omega} \quad (6.29)$$

Qiyin bo'lmagan matematik almashtirishlar asosida zaryadlangan nuqsonlardagi sochilishning relaksatsiya vaqtini energiyaga bog'liqlik ifodasini quyidagicha yozish mumkin:

$$\tau = \frac{\kappa^2 \sqrt{2m^x} (kT)^{3/2} \epsilon^{3/2}}{\pi e^4 \cdot A} \quad (6.30)$$

(6.30) ifodaga asosan shuni ta'kidlash mumkinki, relaksatsiya vaqti bunday hollarda harorat oshishi bilan $T^{3/2}$ qonuniyat asosida oshar ekan. Buning fizik ma'nosi shundan iboratki, harorat oshishi bilan zaryad tashuvchilarning kinetik energiyasi oshadi. Bu zaryadlangan nuqson potensialining kamroq ta'sir etishiga olib keladi. Nuqsonlarning zaryadlanganlik darajasi oshib borishi bilan albatta, yuqorida keltirilgandek, ularning differensial sochilish yuzasi ortib boradi. Ma'lumki, zaryadlarning harakatchanligi ularning relaksatsiya vaqtiga bog'liq:

$$\mu = \frac{e}{m_n^*} \tau \quad (6.31)$$

Bundan kelib chiqadiki, sochilish zaryadlangan nuqsonlarda yuz berganda harakatchanlikning haroratga bog'liqligi (6.31) ifodaga mos holda bo'lib, quyidagiga teng bo'ladi:

$$\mu = \mu_0 T^{3/2} \quad (6.32)$$

Harorat ortgan sari harakatchanlik ham $T^{3/2}$ qonuniyat bilan o'zgarar ekan.

Elektrneytral nuqsonlarda sochilish

Kristall panjarada juda ko'p nuqsonlar elektr neytral holatda bo'ladi. Ammo ularning massasi, atom radiusi va tashqi elektron qobiqlari yarimo'tkazgichning asosiy atomlarini parametrlaridan farq qilganligi uchun ular ham nuqson va elektronlar (kovaklar)ga sochilish manbai bo'ladi. Bu holatda relaksatsiya vaqti faqat elektr neytral nuqsonlar konsentratsiyasiga (N_0) teskari proporsional holatda o'zgaradi, ammo haroratga bog'liq bo'lmaydi.

$$\tau = \frac{m^{*2} e^2}{20\pi \hbar^3 N_0} \quad (6.33)$$

Shuni ham eslab o'tish lozimki, barcha kirishma atomlari donor yoki akseptor bo'lsa ham o'ta past haroratda elektr neytral holatda

bo'ladi va ularning toki ionlashguncha neytral nuqson sochilish manbai sifatida ionlashgandan so'ng zaryadlangan nuqsonlar sifatida sochilish manbai bo'ladi. (6.33) ifodaga mos zaryad tashuvchilar harakatchanligi ham haroratga bog'liq bo'lmaydi.

Zaryad tashuvchilarning kristall panjara tebranishlarida sochilishi

Kristall panjarani tashkil etgan atomlar $T=0$ K dan boshqa har qanday haroratda kT energiyaga ega bo'lib, issiqlik kinetik energiyaga mos holda o'z muvozanat holatidan siljib tebranib turadi. Atomlar panjarada o'zaro bog'langan bo'lganligi sababli har bir atom tebranishi, albatta, qo'shni atomlarning ham siljishiga, ya'ni tebranishiga olib keladi. Natijada kristall panjarada elastik tebranishlar hosil bo'ladi. Bunday tebranishlar chastotasi haroratga, kristall panjara yo'nalishlariga bog'liq bo'lgani uchun har xil chastotali tebranishlar vujudga keladi.

Tebranish chastotalari tovush to'lqinlariga mos bo'lganligi uchun ular **akustik tebranishlar** deb ataladi.

Akustik tebranishlar asosan elementar yarimo'tkazgichlar (kremniy va germaniy) da mavjud bo'ladi. $A^{III}B^I$, $A^{II}B^{VI}$ va boshqa birikmali yarim o'tkazgich materiallarida panjaradagi qo'shni atomlar bir-biridan nafaqat massasi o'lchovlari bilan balki, ion holatlari bilan ham tubdan farq qiladi.

Shuning uchun qo'shni atomlar (musbat va manfiy zaryadlangan atomlar) ning o'zaro qarama-qarshi yo'nalish bo'yicha siljishi natijasida optik chastotalarga mos tebranishlar vujudga keladi. Bunday tebranishlar **optik tebranishlar** deb ataladi.

Kristall panjara tebranishlari energiyasini ifodalovchi kvazielementar zarra $h\nu$ energiyaga ega bo'lgan fonon deb qabul qilingan. Demak, kristall panjarada har xil chastotali optik va akustik fononlar mavjud. Shuning uchun zaryadlangan zarrachalarning panjara tebranishlarida sochilishini – ularning fononlarda sochilishi

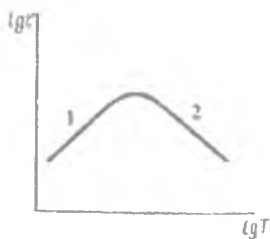
yoki ta'sirlashishi deb qarash mumkin. Murakkab nazariy hisoblashlar asosida relaksatsiya vaqtining akustik fononlarga bog'liqligi quyidagicha aniqlanadi:

$$\tau_L = \frac{9\pi}{4\sqrt{2}} \frac{\hbar^2 v_{3B}^2 M}{C^2 a^3 k m^{1/2}} T^{-1} E^{-1/2} = \frac{\tau_{0L}}{m^{1/2}} T^{-1} E^{-1/2} \quad (6.34)$$

Bunda: $\tau_{0L} = 9\pi\hbar^4 v_{3B}^2 M / 4\sqrt{2} a^3 k C^2$; a – panjara doimiysi.
Erkin yugurish masofasi

$$L = \tau_L v = \frac{\sqrt{2}\tau_{0L} T^{-1}}{m^{1/2}} \quad (6.35)$$

Yarimo'tkazgichlar kristall panjarasining akustik tebranishlarida elektronlarning sochilishi natijasida relaksatsiya vaqti haroratga (T^{-1}) va energiyaga ($E^{-1/2}$) teskari proporsional bog'langan ekan.



6.2-rasm. Zaryad tashuvchilarning kirishma ion (1) lar va akustik fonon (2) lar ta'sirida bir vaqtning o'zida sochilishining relaksatsiya vaqtining harorat o'zgarishiga bog'liqligi

Yuqorida relaksatsiya vaqtining haroratga bog'liqligi har xil nuqsonlarda sochilishida yuz bergan hollarni alohida ko'rib chiqdik. Ammo, real holatda bir vaqtning o'zida yuqoridagi sochilishlarning hammasi ham mavjud bo'ladi. Shuning uchun ham ko'rilayotgan aniq sharoitda qaysi sochilish mexanizmining tutgan o'rni va xossasiga qarab relaksatsiya vaqti va harakatchanlik aniqlanishi kerak. Yuqoridagi 6.2-rasmida kremniy kristallida relaksatsiya vaqti qiymatining harorat o'zgarishiga bog'liqligi keltirilgan:

Bu natijalar asosida τ^- va μ^- ni harorat $T \leq 100\text{K}$ gacha ionlashgan nuqsonlarda sochilish mexanizmi aniqlanadi. $T \geq 200\text{K}$ da sochilish asosan kristall panjara tebranishlari asosida bo'ladi. Kirishma atomlar (donor yoki akseptor) konsentratsiyasi oshishi bilan yoki kristallda ko'p zaryadli nuqsonlar mavjud bo'lganda kristall panjaralarda sochilish ta'siri harorat $T = 100\text{K}$ dan yuqoriroq haroratlarda ham yuz berishi mumkin.

Sinov savollari:

1. Kinetik hodisa deganda nima tushuniladi?
2. Moddaning muvozanat holati nima va bu holatda qanday jarayon yuz beradi?
3. Relaksatsiya vaqti deb nimaga aytiladi?
4. Metallarda va yarimo'tkazgichlarda relaksatsiya vaqti qanday?
5. Zaryad tashuvchilarning harakatchanligi nima va u nimalarga bog'liq?
6. Elektronning elastik va noelastik sochilishi deganda nimani tushunasiz?
7. Zaryad tashuvchilarning zaryadlangan nuqsonlarda sochilishida qanday jarayon yuz beradi?
8. Boltsman tenglamasini yozing va uni tushuntirib bering?
9. Harakatchanlik haroratga qanday bog'langan va nima sababdan?
10. Akustik va optik fononlar nima?
11. Nima uchun metallarda yarimo'tkazgichdagi sochilish turlari mavjud emas?

Yarimo'tkazgichlarda kinetik hodisalar mavzusiga doir masalalar:

1. Kremniy kristallida faqat akustik fononlarda sochilish mavjud bo'lganda quyidagi haroratlarda harakatchanlik topilsin $T = 50, 100, 150, 400\text{ K}$ ($T = 300\text{ K}$ da $\mu_n = 1300 \frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$).

2. Solishtirma qarshiligi $\rho \sim 10^3, 10^4, 10^5\text{ Om}\cdot\text{sm}$ bo'lgan kremniy kristallarida relaksatsiya vaqtini hisoblang ($m^* = 0.98 m$).

3. $T=50, 100 \text{ K}$ bo'lganda, kremniyda faqat akustik sochilish bo'lganda o'tkazuvchanlik $T=300 \text{ K}$ ga nisbatan qanchaga o'zgaradi ($\mu_n = 1300 \frac{\text{sm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$).

4. Bir xil elektron konsentratsiyasiga ega bo'lgan $n = 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ Si, Ge, GaAs va ZnAs kristallarining $T=300 \text{ K}$ dagi solishtirma qarshiligini hisoblang va tushuntirib bering.

5. Agar bir xil elektron va kovak konsentratsiyasiga ega bo'lgan n va p – turdagi GaAs kristallining $T=300 \text{ K}$ da solishtirma qarshiligi nimaga teng bo'ladi?

6. Kremniy kristallida xona haroratida elektronlar harakatchanligi $\mu_n = 1400 \frac{\text{sm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$ bo'lsa, uning qiymati $T=350, 400, 500 \text{ K}$ haroratlarda handay bo'ladi?

7. p – turdagi kremniyda $T=300 \text{ K}$ da kovaklar harakatchanligi $\mu_p = 500 \frac{\text{sm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$ bo'lsa, $T=200, 100, 50$ va 10 K haroratlarda qanday qiymatlarga ega bo'ladi?

8. Elektron konsentratsiyasi $n = 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ ga teng bo'lgan kremniy materialida harorat $T=250 \text{ K}$ dan 400 K o'zgarganda o'tkazuvchanlik qanday o'zgaradi? Olingan natijani tushuntirib bering.

9. Elektron konsentratsiyasi $n = 4 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$ bo'lgan n – turdagi kremniy materiali qanday haroratda xususiy o'tkazuvchanlikka ega bo'ladi?

10. Kovaklar konsentratsiyasi $p = 2 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ bo'lgan p – turdagi kremniy materiali qanday haroratda xususiy o'tkazuvchanlikka ega bo'ladi?

11. Elektron va kovaklar konsentratsiyasi bir xil bo'lgan n va p – turdagi Si materialining o'tkazuvchanligi qanchaga farq qiladi ($T=300 \text{ K}$)? Xuddi shunday masalani Ge va GaAs materiallari uchun ham yeching.

12. Relaksatsiya vaqtini formulasidan foydalanib, τ ni metall (Au) va yarimo'tkazgich (Si n – tur, $\rho \sim 10^2 \text{ Om}\cdot\text{sm}$) uchun hisoblang. Nima uchun τ qiymati materiallarda o'zgarmas (T) va yarimo'tkazgichlarda uning qiymati haroratga, kirishma atomlari soniga o'ta bog'liq?

7. METALL – YARIMO‘TKAZGICH KONTAKTI VA $p - n$ O‘TISH FIZIKASI

Har qanday yarimo‘tkazgich materiallarning fizik xossalarini o‘rganish va yarimo‘tkazgichli qurilmalarning xossalarini aniqlash hamda ularni zamonaviy qurilmalarda ishlatish uchun ularni manbalarga yoki boshqa qurilmalarga ulash, albatta, metall kontaktlar yordamida amalga oshiriladi. Shuning uchun metall – yarimo‘tkazgich kontaktining sifati, holati va tabiatiga qarab, bunday kontaktlarning xossalari tubdan farq qilishi mumkin. Shu sababli hozirgi zamon elektronikasi va integral sxemalarida kontaktlar masalasi o‘ta muhim o‘rin egallaydi. Bu muammoni batafsil ko‘rib chiqishdan oldin, metall – yarimo‘tkazgich kontaktlar tabiatini aniqlaydigan ba‘zi fundamental tushunchalar ustida to‘xtalib o‘tamiz.

7.1. Qattiq jismlarda chiqish ishi

Chiqish ishi – bu Fermi sathidan elektronlarni vakuumga chiqarish uchun kerak bo‘lgan energiya. Chiqish ishining qiymati qattiq jismlarda $A \sim 1-10$ eV oralig‘ida bo‘lishi mumkin.

Ma‘lumki, metallarda Fermi sathining qiymati haroratga, kirishma atomlar miqdoriga juda kam bog‘liqligi tufayli metallarda chiqish ishining qiymatini doimiy deb hisoblash mumkin. Chiqish ishining qiymati kristall yo‘nalishlariga [111], [110], [100] ham bog‘liq. Metallarda chiqish ishining qiymatini aniqlashni turli xil usullari mavjud. Masalan, ikki metallni kontakt potentsiallari farqidan ($\varphi = A_1 - A_2$), bunda kontaktdagi biror metallning chiqish ishi oldindan ma‘lum bo‘lsa, ikkinchi metallning chiqish ishini topish mumkin. Ko‘proq qo‘llaniladigan usul bu – *fotoelektrik usul* bo‘lib, unda asosan Eyshteyn formulasi

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2} \quad (7.1)$$

yordamida chiqish ishini juda katta aniqlik bilan topish mumkin, bunda: $h\nu$ – metall sirti (katod) ga tushayotgan foton energiyasi.

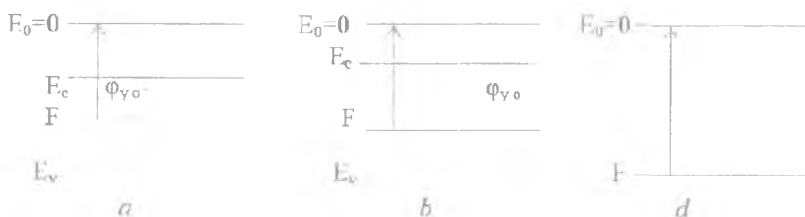
Metallarda chiqish ishini boshqarish (kamaytirish) faol ishlaydigan emitterlarni yaratishda juda muhim ahamiyatga ega. Metall sirtlarga qo'shimcha ishlov berish yoki vakuumda boshqa atomlarni purkash usullari bilan chiqish ishini o'zgartirish mumkin.

7.1-jadval

Turli materiallarda chiqish ishi

№	Element	Chiqish ishi, eV	№	Element	Chiqish ishi, eV	№	Element	Chiqish ishi, eV
1	Li	2.38	7	Co	4.41	13	Ni (Cs)	1.37
2	K	2.22	8	Mn	3.84	14	Ge	4.76
3	Cs	1.81	9	Cu	4.40	15	Si	4.8
4	Ni	4.5	10	Ag	4.3	16	W (111)	4.4
5	Fe	4.31	11	Au	4.3	17	W (110)	5.3
6	Cr	4.58	12	W	4.54	18	W (100)	4.6

Ma'lumki, yarimo'tkazgich materiallarida Fermi sathining qiymati harorat, yorug'lik va ayniqsa, kirishma atomlar tabiati va konsentratsiyasiga bog'liq bo'lganligi uchun ularda chiqish ishining qiymati o'zgarib turadi. Donor kirishma atomlarining konsentratsiyasini oshirish yo'li bilan Fermi sathini o'tkazuvchanlik sohasigacha, hatto uning ichigacha olib kirish mumkin. Aksincha, akseptor kirishma atomlar konsentratsiyasini boshqarish yo'li bilan Fermi sathini valent sohasini ichkarisida joylashtirishi mumkin bo'ladi.



7.1-rasm. a) *n* – turli yarimo'tkazgichlarda chiqish ishi, b) *p* – turdagi yarimo'tkazgichda chiqish ishi, d) metallda chiqish ishi

Demak, yarimo'tkazgichlarda Fermi sathi butun taqiqlangan soha kengligi bo'yicha o'zgartirish mumkin bo'lganligi uchun chiqish ishining qiymati shunga mos o'zgaradi.

7.2. Metall – yarimo'tkazgich kontakti

Metall – yarimo'tkazgich kontaktlar o'z tabiati, yaratilishi, ishlatilishi va xossalariga qarab ikki turga: **omik kontaktlar** va **Shottki diodlariga (omik bo'lmagan)** bo'linadi.

Har qanday qattiq jismdan vakuumga termoelektron emissiya orqali chiqadigan elektron tok zichligi shu qattiq jismdan elektronlarni chiqish ishi bilan aniqlanadi. Agar u yarimo'tkazgich bo'lsa, unda termoelektron emissiya tok zichligi, albatta, yarimo'tkazgichning chiqish ishi $A_{v.o.}$ ga bog'liq holda

$$J_{y.o.} = \frac{4\pi(kT)^2}{h^3} \cdot e^{-A_{y.o.}/(kT)} \quad (7.2)$$

aniqlanadi.

Agar u metall bo'lsa, unda termoelektron emissiya tok zichligi, albatta metallning chiqish ishi A_m ga bog'liq holda

$$J_m = \frac{4\pi(kT)^2}{h^3} \cdot e^{-A_m/(kT)} \quad (7.3)$$

aniqlanadi.

Yarimo'tkazgich va metallni to'g'ridan-to'g'ri o'zaro kontaktga keltirsak, (7.2) va (7.3) formulalarga asosan elektronlar oqimi, albatta, $A_{v.o.}$ va A_m lar qiymati bilan aniqlanadi. Birinchi holda $A_{v.o.} < A_m$ holatni ko'raylik (yarimo'tkazgich n – tur bo'lsin). Bu holda elektronlar yarimo'tkazgich kontakt sohasidan metall kontakt sohasiga o'ta boshlaydi. Bu o'tish natijasida yarimo'tkazgich kontakt sohasi elektronlarni yo'qotgan donor ionlar hisobiga musbat zaryadlanadi. Metallning kontakt sohasi esa mos holda yarimo'tkazgichdan o'tgan elektronlar hisobiga manfiy zaryadlanadi. Bunda kontaktda

yarimo'tkazgichdan metallga yo'nalgan elektr maydoni hosil bo'ladi. Elektronlarning yarimo'tkazgichdan metallga o'tishida kontaktida hosil bo'lgan elektr maydoni qiymati, elektronlarning o'tishiga yetarli darajada to'sqinlik qiladi. Bu holda yarimo'tkazgichdan metallga o'tadigan elektronlarning tok zichligi:

$$j_{y.o'} = \frac{4\pi(kT)^2}{h^3} \cdot e^{-(A_{y.o'} + \varphi)/kT} \quad (7.4)$$

ifoda bilan aniqlanadi, bunda φ — metall – yarimo'tkazgich kontakt sohasida hosil bo'lgan potensialning qiymati $\varphi = A_m - A_{y.o}$ ga teng bo'lib, metall dan yarimo'tkazgichga o'tadigan termoelektron emissiyaning tok zichligi o'zgarmaydi. Yarimo'tkazgichning kontakt sohasida elektronlarni yo'qotgan musbat donor ionlar hisobiga ma'lum qalinlikka ega bo'lgan *hajmiy zaryadlangan soha* ($L_{y.o}$) hosil bo'ladi. Xuddi shunday yarimo'tkazgichdan o'tgan qo'shimcha elektronlar hisobiga metall kontakt sohasida ham manfiy zaryadga ega bo'lgan *hajmiy zaryadlangan soha* (L_m) hosil bo'ladi. Bu hajmiy zaryad qalinligi metall va yarimo'tkazgichdagi elektronlarning konsentratsiyasi bilan aniqlanadi:

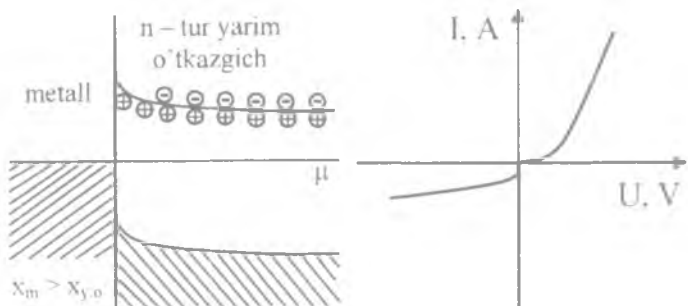
$$L_{y.o'} = \frac{A_m - A_{y.o'}}{4\pi e^2 \varepsilon n_{y.o'}} = \frac{A_m - A_{y.o'}}{4\pi e^2 \varepsilon N_d} \quad (7.5)$$

$$L_m = \frac{A_m - A_{y.o'}}{4\pi e^2 \varepsilon n_m}$$

(7.5) ga asosan, $A_m - A_{y.o} \sim 1\text{eV}$, $n_{y.o} \sim 10^{16}\text{sm}^{-3}$, $n_m \sim 10^{22}\text{sm}^{-3}$ qiymatlarini olsak, unda $L_{y.o}$ ning qiymati L_m dan 100.000 marta ko'p bo'ladi ($L_{y.o} \sim 30\text{ mkm}$, $L_m \sim 10\text{ \AA}$). Demak, hosil bo'lgan hajmiy zaryadlangan soha qalinligi asosan yarimo'tkazgich tomonida bo'lar ekan. Yarimo'tkazgich kontakt sohasida hosil bo'lgan hajmiy zaryadlar sohasi bu sohadagi elektronlar taqsimotiga ham ta'sir qiladi. Kontaktdan yarimo'tkazgich ichiga kirgan sari elektronlarning konsentratsiyasi oshadi va n_o ga, ya'ni yarimo'tkazgich hajmidagi elektronlarning konsentratsiyasiga tenglashadi:

$$n(x) = n_0 e^{-\varphi(x)/kT} \quad (7.6)$$

Bu holatdagi metall – yarimo‘tkazgich kontakt sohalar diagrammasi hamda bunday kontaktdagi tokning kuchlanishga bog‘liqlik Volt – Amper tavsifi (VAT) quyidagi 7.2-rasmda ko‘rsatilgan:

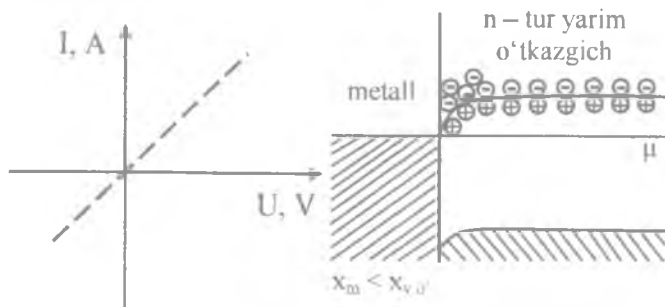


7.2-rasm. Metall va n – turdagi yarimo‘tkazgich kontakt sohalar diagrammasi hamda VAT ($A_m > A_{y.o}$, holat uchun)

Agar n – turdagi yarimo‘tkazgichda elektronlarning chiqish ishi ($A_{y.o}$) metalldagi chiqish ishidan katta ($A_{y.o} > A_m$) bo‘lsa, u holda yuqoridagi (7.5) va (7.6) ifodalarga asosan elektronlarning metallga termoemissiya bo‘yicha oqimi yarimo‘tkazgichdagi termoemissiyadagi elektronlar oqimidan ko‘p bo‘ladi. Natijada yarimo‘tkazgichning metall bilan kontakt sohasi metall dan o‘tgan elektronlar bilan boyitiladi va u yerdagi elektronlarning konsentratsiyasi yarimo‘tkazgich hajmidagi elektronlarning konsentratsiyasidan ko‘p bo‘ladi. Natijada yarimo‘tkazgichda kontakt sohasi va manfiy zaryadga ega bo‘lgan soha yuzaga keladi. Shu bilan birga metallda shunga mos elektronlarni yo‘qotgan ionlar hisobiga musbat zaryadlangan hajmiy zaryad sohasi yuzaga keladi. Metalldagi hajmiy zaryad sohaning qalinligi yarimo‘tkazgichda hosil bo‘lgan manfiy zaryad hajmiy sohasining qalinligidan juda kam bo‘ladi. Bu holda yarimo‘tkazgich kontakt sohasidagi elektronlar taqsimoti quyidagicha ifodalanadi:

$$n = n_0 \cdot e^{\frac{A_m - A_{y,o'}}{kT}} = n_0 \cdot e^{\varphi(x)/kT} \quad (7.7)$$

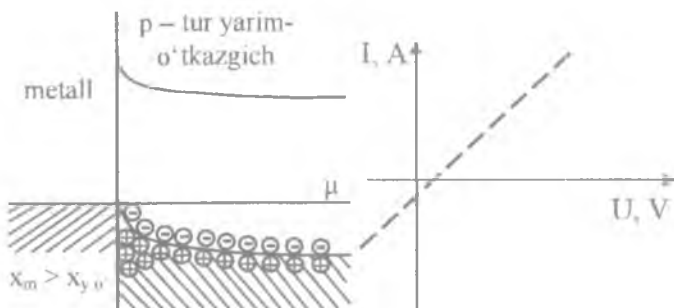
Bu holdagi metall – yarimo‘tkazgich kontakt sohalar diagrammasi va bunday kontaktdagi VAT quyidagi 7.3-rasmda keltirilgan.



7.3-rasm. Metall va n – turdagi yarimo‘tkazgich kontakt sohalar diagrammasi hamda VAT ($A_{y,o'} > A_m$ holat uchun)

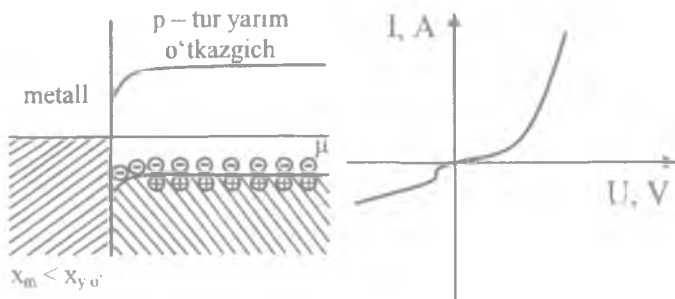
Endi p – turdagi kremniy bilan metall kontakt haqida ham biroz to‘xtalib o‘taylik. Dastlabki holatda bunday shart bajarilsin: $A_{y,o'} < A_m$. Bu holda yuqorida keltirilgandek, metall dan yarimo‘tkazgichga o‘tayotgan elektronlar oqimi yarimo‘tkazgichdan metallga o‘tayotgan elektronlar oqimidan ko‘p bo‘ladi. Natijada metall dan o‘tgan elektronlar yarimo‘tkazgich kontakt sohasidagi kovaklar bilan rekombinatsiyaga kirishib, kovaklarning konsentratsiyasini kamaytiradi. Bu jarayon to‘g‘ridan-to‘g‘ri kontakt sohasida juda faol va yarimo‘tkazgich ichiga kirgan sari sekinlashadi. Natijada yarimo‘tkazgich kontakt sohasida kovaklarini yo‘qotgan akseptor manfiy zaryadga ega bo‘lgan hajmiy zaryad sohasi hosil bo‘ladi (Bor atomlari hisobiga). Bu sohaning qalinligi (7.8) ifodaga asosan p – turdagi kovaklarning konsentratsiyasi bilan aniqlanadi, ammo u metall kontakt sohasida hosil bo‘lgan musbat zaryadli hajmiy zaryad qalinligidan juda katta bo‘ladi. Yarimo‘tkazgich kontakt sohasidagi kovaklarning taqsimoti quyidagicha aniqlanadi:

$$p = p_0 e^{\frac{-A_{y,o'} - A_m}{kT}} = p_0 e^{\frac{-\varphi(x)}{kT}} \quad (7.8)$$



7.4-rasm. Metall va p -turdagi yarimo'tkazgich kontakt sohalar diagrammasi hamda VAT ($A_m > A_{y.o}$, holat uchun)

Navbatdagi holatda p – turdagi yarimo'tkazgich materialida elektronning chiqish ishi $A_{y.o}$ katta bo'lsin, metallning chiqish ishi A_m dan, $A_{y.o} > A_m$. Bu holatda elektronlarning yarimo'tkazgichdan metallga o'tish oqimi teskari yo'nalishdagi elektronlar oqimidan ko'p bo'ladi. p – turdagi yarimo'tkazgichdan elektronlarning metallga o'tishi natijasida (albatta, elektronlar valent sohaga o'tadi) yarimo'tkazgich kontakt sohasida kovaklarning konsentratsiyasi ortadi, ya'ni bu soha kovaklar bilan boyitilgan bo'lib qoladi. Bunday kontaktlarning sohalar diagrammasi quyidagi 7.5-rasmda keltirilgan:

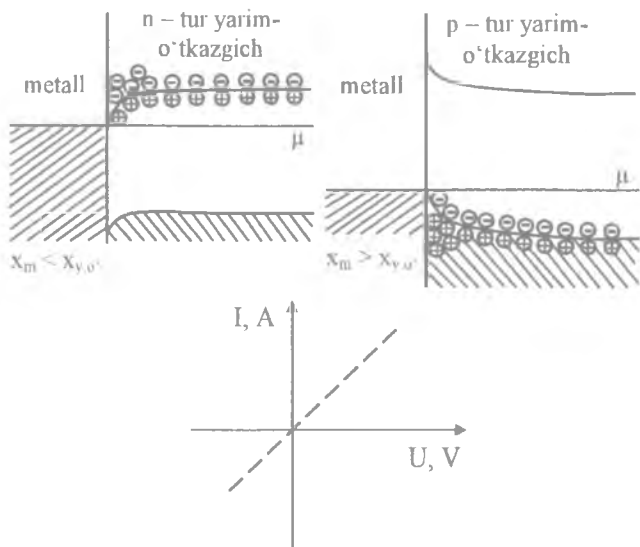


7.5-rasm. Metall va p – turdagi yarimo'tkazgich kontakt sohalar diagrammasi hamda VAT ($A_{y.o} > A_m$ holat uchun)

7.3. Omik kontakt

Omik kontakt deb, metall – yarimo‘tkazgich kontaktiga tashqaridan elektr manba ulanganda, elektr maydon yo‘nalishidan qat’iy nazar, kontaktdan o‘tayotgan tok qiymati qo‘yilgan elektr maydon qiymatiga mos holda to‘g‘ri chiziqli, ya’ni Om qonuni $J=U/R$ bo‘yicha o‘zgarishini ta’minlaydigan kontaktga aytiladi.

Bunday kontakt hosil qilishning asosiy sharti metall – yarimo‘tkazgich kontakt qarshiligi(asosan yarimo‘tkazgich kontakt sohasining qarshiligi) ni uning hajmiy solishtirma qarshiligidan o‘ta kichik bo‘lgandagina bajariladi. Bu o‘z navbatida yarimo‘tkazgich kontakt sohasining zaryad tashuvchilar (elektron yoki kovaklar) bilan boyitilgan holatida yuz beradi. Yuqorida ko‘rsatilganidek, bu faqat n – turdagi yarimo‘tkazgich uchun $A_{y.o'} > A_m$, p – turdagi yarimo‘tkazgich uchun $A_{y.o'} < A_m$ bo‘lgandagina bajariladi. Demak, yarimo‘tkazgichlarda metall omik kontakt sohalari tuzilishi quyidagi 7.6-rasmda tasvirlanganidek bo‘ladi. Bunday kontaktlarning Volt – Amper tavsifi quyidagicha bo‘ladi:



7.6-rasm. Omik kontakt sohalari diagrammasi va VAT

Quyidagi 7.2-jadvalda yarimo'tkazgich materiallarida omik kontakt hosil qilish uchun ishlatiladigan asosiy materiallar keltirilgan:

7.2-jadval

***Yarimo'tkazgich materiallarida omik kontakt hosil qilish uchun
ishlatiladigan materiallar***

Qotishma tarkibi	Qo'llash sohasi
Sn + (CH ₃ CHOHCOOH)	Ge
Au + Si + Al-90% : 7%:3%	Si p – tur
Au + Si + Sb-90% : 7%:3%	Si n – tur
In	GaAs ($n = 10^{18} : 10^{16} \text{ sm}^{-3}$)
In	GaSb
In	ISb
In + Te = 97% : 3%	Legirlangan GaAs va GaP n-tur ($n = 10^{16} : 10^{18} \text{ sm}^{-3}$)
In + Zn – 95% : 5%	Legirlangan GaAs va GaP p – tur
Sn : (SnCl ₂)	GaAs n – tur ($n = 10^{14} : 10^{16} \text{ sm}^{-3}$)
WNi (hajmiy nisbatda 2:1)	SiC n va p-turlar ($\rho = 10^{-3} - 10^2 \text{ Om sm}$)
Ta+Au+Al-45%: 40%:5%	SiC p – tur ($\rho > 10 \text{ Om sm}$)
Ta + Au – 50% : 50%	SiC n – tur ($\rho > 10 \text{ Om sm}$)

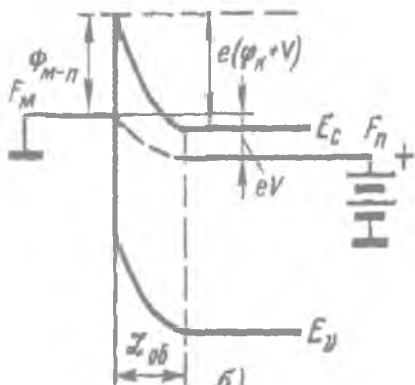
7.4. Shottki diodi

Yarimo'tkazgich metall bilan kontakt hosil qilganda n – turdagi yarimo'tkazgichda elektronlarning chiqish ishi metallardagi elektronlarning chiqish ishidan kichik bo'lganda ($A_{y.o} < A_m$) yoki p – turdagi yarimo'tkazgichda chiqish ishi qiymati metallnikidan katta bo'lganda ($A_{y.o} > A_m$) yarimo'tkazgich kontakt sohasida ma'lum qalinlikka ($10 \div 50 \text{ mkm}$) ega bo'lgan hajmiy zaryad sohasi hosil bo'ladi. Bu hajmiy zaryad sohalarida erkin zaryad tashuvchilar (elektron yoki kovak) ning konsentratsiyasi yarimo'tkazgichning hajmidagi zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasidan o'ta kam bo'ladi va ularning taqsimoti quyidagicha ifodalanadi:

$$n = n_0 e^{\frac{-\varphi(x)}{kT}}, \quad p = p_0 e^{\frac{-\varphi(x)}{kT}} \quad (7.9)$$

Bunda: $\varphi(x)$ – kontakt potentsiali.

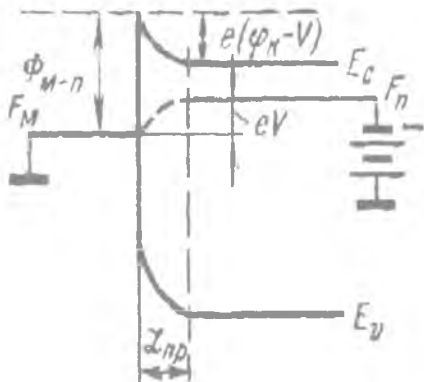
Bunday kontaktda zaryad tashuvchilarning harakatiga hosil bo'lgan kontakt potentsiali (φ) to'sqinlik qiladi. Bunday kontaktga tashqi manba ulanganda, metall va yarimo'tkazgichga manbaning qanday qutbi (+yoki -) ulanishiga qarab, kontakt potensialini yetarli darajada o'zgartirish mumkin. Demak, kontakt orqali o'tayotgan tok qiymati tashqi manba yo'nalishiga o'ta bog'liq bo'lar ekan. Yuqorida ko'rsatilgan kontaktda tashqi manba ulaylik. Bunda manbaning «+» qutbiga n – turdagi yarimo'tkazgich, «-» qutbiga esa metall ulanadi.



7.7-rasm. Metall – yarimo'tkazgich kontakti tashqi manbaga teskari ulungandagi holat

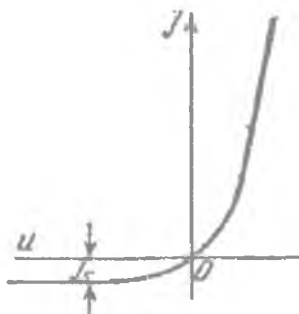
Kontakt potensialining qiymati (φ) tashqi qo'yilgan maydon yo'nalishiga mos holda ortadi. Bunga sabab kontaktda hosil bo'lgan va tashqi elektr maydon manba yo'nalishlari bir xil bo'lishi bilan birga, yarimo'tkazgichga ulangan manbaning «+» qutbi uning ichkarisidan elektronlarni tortadi, natijada, hajmiy zaryad kengligi ortadi. Bunday kontaktdan elektronlarning yarimo'tkazgichga o'tish ehtimoli tashqi maydon qiymati oshgan sari kamayib boradi va shunga mos holda tokning ham qiymati kam bo'ladi. Manbaning bunday ulanishi teskari yo'nalish ulanishi deb qabul qilingan.

Teskari ulanish holatida metall – yarimoʻtkazgich kontaktidan oʻtayotgan tok qiymati juda kichik va tashqi manba kuchlanishiga juda kam bogʻliq boʻlar ekan. Agar yarimoʻtkazgichga manbaning manfiy, metallga manbaning musbat qutblari ulansa, tashqi manba elektr maydon yoʻnalishi bilan metall – yarimoʻtkazgich kontaktdagi elektr maydon yoʻnalishlari bir-biriga qarama-qarshi holatda boʻladi.



7.8-rasm. Metall – yarimoʻtkazgich kontakti tashqi manbaga toʻgʻri ulangan holat

Yarimoʻtkazgichga tashqi manbadan elektr oqimi kirib kelishi bilan yarimoʻtkazgich kontakt sohasidagi hajmiy zaryad miqdori va hajmiy zaryad sohasi qalinligi kamayishi natijasida, kontakt potentsiallar farqi kamayadi ($\phi = A_{V0} - A_m$). Bu elektronlarning yarimoʻtkazgichdan metallga oʻtish oqimini oshiradi. Tashqi maydon ortgan sari kontakt potentsiali shuncha kamayadi. Agar bunday metall – yarimoʻtkazgich kontaktining Volt – Amper tavsifiga diqqat bilan eʼtibor bersak, bunday qurilmadan tok bir yoʻnalish boʻyicha juda kichik va tashqi elektr maydon qiymatiga bogʻliq boʻlmaydi. Ikkinchi yoʻnalish boʻyicha tokning qiymati tashqi elektr maydon oshishi bilan eksponensial ortadi:



**7.9-rasm. Metall – yarimo‘tkazgich kontaktining
Volt – Amper tavsifi**

Bunday qurilmalar elektronikada *to‘g‘rilagich* sifatida ishlatiladi va ular **Shottki diodlari** deb ataladi. Shottki diodi odatdagi $p - n$ diodi kabi to‘g‘rilagich vazifasini bajaradi, ammo undan asosiy farqi – Shottki diodida zaryad tashishda faqat elektronlar qatnashadi ($p - n$ o‘tish diodlarida elektron va kovaklar qatnashadi).

Elektronlarning harakatchanligi kovaklar harakatchanligidan odatda 5-6 marta katta bo‘lganligi uchun Shottki diodlarini $p - n$ diodlaridan yuqori chastotalarda ishlatish imkoniyatini beradi.

Kremniyli Shottki diodlarini olish texnologiyasi – juda yaxshi tozalangan SiO_2 qatlamlaridan holi bo‘lgan Si sirtiga **yuqori vakuumda metallarni purkash yo‘li** bilan hosil qilinadi.

So‘nggi yillarda juda yaxshi Shottki diodlari Si sirtida har xil metall silisidlarini hosil qilish bilan olindi. Quyidagi 7.3-jadvalda Shottki diodlarini olish uchun ishlatiladigan metallar va silisidlar haqida ma’lumotlar keltirilgan.

Shottki diodlarini olish uchun ishlatiladigan metall silitsidlar

Metall silitsidi	Hosil bo'lish harorati T (K)	Erish harorati T (K)	Metall silitsidi	Hosil bo'lish harorati T (K)	Erish harorati T (K)
CoSi	400	1460	Mn ₁₁ Si ₁₉	800a	1145
CoSi ₂	450	1326	MoSi ₂	1000a	1980
CrSi ₂	450	1475	TaSi ₂	750a	2200
HfSi	550	2200	TiSi ₂	650	1540
IrSi	300	-	ZrSi ₂	600	1520

7.5. Yarimo'tkazgichli $p - n$ o'tish

n va p turdagi yarimo'tkazgichlarni to'g'ridan-to'g'ri bir-biriga kontaktga keltirish yo'li bilan $p-n$ o'tishni hosil qilib bo'lmaydi. Chunki, sirlari har qanday yaxshi ishlangan ikki turdagi yarimo'tkazgichlarning sirtlarini kontaktga keltirilganda ular orasida ma'lum bo'shliq qolishi, sirlarda adsorbsiya qilingan begona atomlar va nuqsonlar hamda oksid qatlamlar mavjudligi bir-biri bilan birikishiga imkon bermaydi.

$p - n$ o'tishni hosil qilishning turli usullari mavjud:

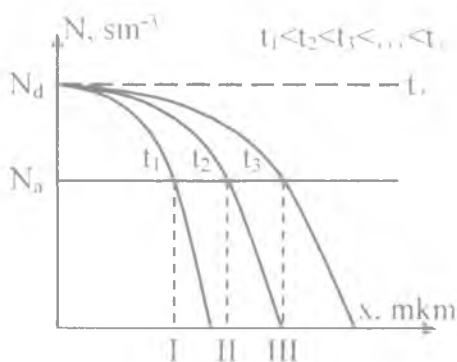
1. Yuqori vakuumda ma'lum metallni kremniyga kontaktga keltirib, kerakli haroratigacha qizdirish yo'li bilan masalan, $Al-nSi$ ni $T=550^{\circ}C$ qizdirdiganda kontakt sohasida yangi Al bilan boyitilgan p -turga ega bo'lgan soha hosil bo'ladi. Natijada $p - n$ o'tish paydo bo'ladi. Bunday usulni qotishmali $p-n$ o'tish hosil qilish usuli deyiladi.

2. Yarimo'tkazgich sirtiga qarama-qarshi o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan yuqqa epitaksial qatlamlarini hosil qilish yo'li bilan $p - n$ o'tish hosil qilinadi.

3. Yarimo'tkazgich sirtiga undagi kirishma atomlar tabiatiga teskari bo'lgan kirishma atom ionlarini implantatsiya qilish yo'li bilan ham $p - n$ o'tish mumkin.

Ammo hozirgi zamon elektronika va mikroelektronikasida eng asosiy qo'llaniladigan usul bu —diffuzion texnologiyadir.

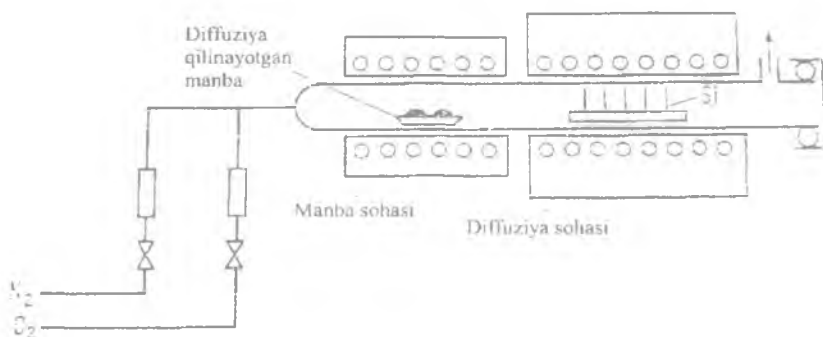
Diffuzion texnologiyada — $p - n$ o'tish hosil qilinadigan materialning asosiy parametrlari qanday turdagi kirishma atomlari bilan legirlangani, ularning konsentratsiyasi va qanday chuqurlikda $p - n$ o'tish hosil qilish kerakligini oldindan bilgan holda, unga qanday kirishma atomlarini qanday haroratda va qancha vaqtda diffuziya qilish hisoblab chiqiladi. Bunda diffuziya qilinayotgan kirishma atomlarining diffuziya koefitsiyentini va eruvchanligini haroratiga bog'liqligining qiymatlarini aniq bilishni talab etiladi. O'rganilayotgan material p - turga ega va undagi akseptor kirishma atomlarining konsentratsiyasi $N_A = 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ bo'lsa, unda diffuziya qilinadigan kirishma atomlari, albatta, donorlik xususiyatiga ega bo'lishi va shunday haroratda diffuziya qilinishi lozimki, unda yarimo'tkazgich sirtida diffuziya vaqtida kirgan donor kirishma atomlarining konsentratsiyasi materialdagi mavjud akseptor kirishma atomlar konsentratsiyasidan $10^2 \div 10^3$ marta katta bo'lishi kerak. Yuqoridagi mavzularda ta'kidlanganidek, diffuziya cheksiz (doimiy) manbadan amalga oshirilganligi uchun uning taqsimoti 7.10-rasmda ko'rsatilgandek bo'ladi:



7.10-rasm. Diffuziya o'zgarmas manbadan amalga oshirilganda kirishma atomlar taqsimoti

Bu ko'rsatilgan uchta sohani ko'rib chiqaylik. I sohada diffuziya natijasida kiritilgan donor kirishma atomlarning konsentratsiyasi mavjud akseptor kirishma atomlarning konsentratsiyasidan katta, albatta. 7.10-rasmda ko'rsatilganidek nisbat kristall sirtidan uning ichiga kirgan sari o'zgarib boradi. Demak, bu sohada $N_D > N_A$ yoki $n > p$ sharti bajarilganligi uchun material sirti n - turga ega bo'ladi (bu yerda donor kirishma atomlaridan chiqqan elektronlar akseptor kirishma atomlari hosil qilgan kovaklar bilan rekombinatsiyalashib, qolgan qismi o'tkazuvchanlik sohasiga bo'ladi ($n = N_D - N_A$) va material n - turga ega bo'ladi).

II sohada $N_D = N_A$ ($n = p$) bo'lib, bunda donordan chiqqan barcha elektronlar akseptor valent sohada hosil qilgan barcha kovaklar bilan rekombinatsiyalashadi natijada donor hamda akseptor kirishma atomlari hisobiga hosil bo'lgan erkin elektronlar va kovaklar qolmaydi. Faqat ko'rilayotgan haroratga mos xususiy zaryad tashuvchilar bo'ladi. Demak, bu sohada material xususiy yarimo'tkazgichga (eng katta solishtirma qarshilikka ega bo'lgan materialga) aylanadi. Mana shu $N_D = N_A$ bo'lgan soha $p - n$ o'tish sohasidir. Yarimo'tkazgich sirtidan mana shu sohagacha bo'lgan masofa $p - n$ o'tish chuqurligi deb ataladi.

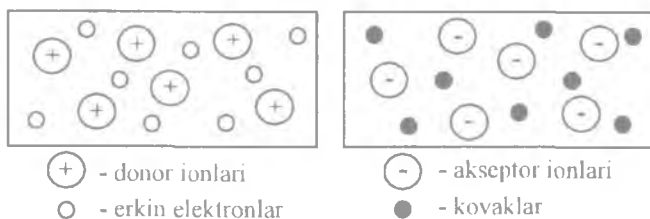


7.11-rasm. Diffuziya amalga oshiriladigan pechlar va unda joylashgan yarimo'tkazgich kristalli

III sohada donor kirishma atomlari mavjud akseptor kirishma atomlarning konsentratsiyasidan kam bo'lganligi uchun ($N_A - N_D = p_0 - N_D = p$) material p – turga ega bo'lganicha qoladi va $p - n$ o'tish chegarasidan uzoqlashgan sari kovaklar miqdori oshib, p_0 ga yaqinlashadi. $p - n$ o'tishning diffuzion texnologiyasi boshqa usullarga nisbatan farqi xohlagan chuqurlikda o'ta aniqlik bilan $p - n$ o'tish hosil qilish imkonini beradi. Shuning uchun ham bu *planar texnologiya* deb ataladi. $p - n$ o'tish hosil qilingan plastinkalarda yana qo'shimcha va boshqa operatsiyalarni bajarish orqali xohlagan o'lchovdagi oddiy yoki murakkab integral sxemalarni yaratish mumkin. 7.11-rasmda diffuziya amalga oshiriladigan pechlar va unda joylashgan yarimo'tkazgich plastinkalari ko'rsatilgan:

7.6. $p - n$ o'tish fizikasi

Quyidagi 7.12-rasmda hali kontaktga keltirilmagan n va p yarimo'tkazgich materiallarining modeli va energetik sohalar tuzilishi keltirilgan. Ko'rinib turibdiki, har qaysi materiallarning xohlagan nuqtasida hamma vaqt elektr neytrallik sharti bajariladi, chunki n – turdagi yarimo'tkazgichda erkin elektronlar soni ularni hosil qilgan donor atomlarining ionlari konsentratsiyasiga teng ($n = N_d$).

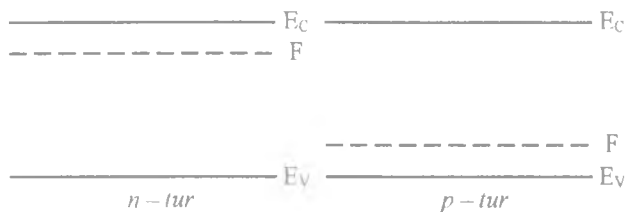


7.12-rasm. Yarimo'tkazgich materialida elektr neytrallik shartining bajarishi: a) n – tur yarimo'tkazgich, b) p – tur yarimo'tkazgich

Bu degan so'z, har bir qo'zg'almas musbat zaryadlangan ion donor atrofida, albatta, manfiy zaryadlangan harakatchan elektronlar bo'ladi. p – turdagi yarimo'tkazgich materialidagi kovaklar

konsentratsiyasi ularni hosil qilgan manfiy zaryadlangan akseptor atomlari konsentratsiyasiga teng ($p = N_a^-$). Bu holda ham tugunda joylashgan qo'zg'almas manfiy zaryadlangan akseptor ioni atrofida harakatchan kovaklar doim mavjud. n – turdagi materialda Fermi sathi o'tkazuvchanlik sohasiga yaqin, p – turdagi materialda esa u valent soha atrofida yotadi.

Bu ikki xil turdagi yarimo'tkazgichlarni o'zaro kontaktga keltiramiz. $p - n$ o'tish chegarasidagi elektron va kovaklarning taqsimotidagi gradiyent hisobiga n – turli yarimo'tkazgichning kontakt sohasidagi elektronlar diffuziya qilinib, p – turdagi material kontakt sohasidagi kovaklar bilan rekombinatsiyalashadi, natijada elektron zaryad tashuvchilar bu sohada kamayadi.

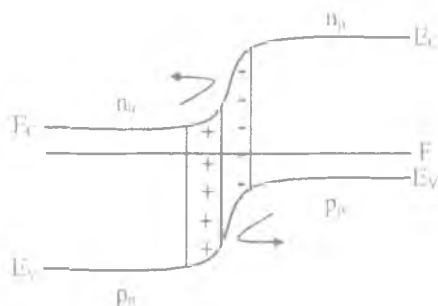


7.13-rasm. n va p – turdagi yarimo'tkazgichlarda Fermi sathi

Xuddi shunday p – turdagi yarimo'tkazgichdan n – turdagi yarimo'tkazgich kontakt sohasiga kovaklar diffuziya qilinib, u yerdagi elektronlar bilan rekombinatsiyalashadi. Zaryad tashuvchilarning diffuziyasidagi toki kontakt sohasida Fermi sathi tenglashguncha, ya'ni muvozanat holat o'rnatilguncha davom etadi. Natijada n – turdagi yarimo'tkazgichning kontakt sohasida elektronlarni yo'qotgan musbat zaryadlangan donor ionlar, p – turdagi yarimo'tkazgichning kontakt sohasida kovaklarini yo'qotgan manfiy zaryadlangan akseptor ionlari hosil bo'la boshlaydi. natijada n – va p – o'tish sohalarida qarama – qarshi zaryadlangan ionlar o'ziga mos elektr maydonini yuzaga keltiradi, ya'ni elektr potensial paydo bo'ladi.

$p - n$ o'tishda hosil bo'lgan elektr maydoni o'z yo'nalishi bo'yicha elektronlarning n – turdan p – turga va kovaklarning esa p – turdan n – turga o'tishiga to'sqinlik qiladi. Demak, $p - n$ o'tish

sohasida hosil bo'lgan elektr maydoni asosiy zaryad tashuvchilarning $p - n$ o'tishidagi diffuziyasiga qarshilik qiladi. Ammo bu hosil bo'lgan elektr maydoni $p -$ turda asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar elektronlarni $n -$ turga va $n -$ turda asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarni $p -$ turga o'tishiga yordam beradi. Bunda asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarga $p - n$ o'tishdagi potensial to'siq xalaqit bermaydi. $p - n$ o'tishning muvozanat holatdagi sohalar diagrammasi quyidagi 7.14-rasmida keltirilgan:



7.14-rasm. $p - n$ o'tishning muvozanat holatdagi sohalar diagrammasi

Bu holatda $p - n$ o'tishdagi potensial to'siqni yengishga energiyasi yetgan asosiy zaryad tashuvchilar hosil qilgan diffuzion tok (J_{nn}, J_{pp}) va $p - n$ o'tishdagi elektr maydoni ta'sirida teskari yo'nalishda harakat qilayotgan asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarni hosil qilayotgan Dreyf toklari (J_{np}, J_{pn}) bir-biriga teng bo'ladi va $p - n$ o'tishdan tok o'tmaydi.

$$J_{nn} + J_{pp} = J_{np} + J_{pn} \quad (7.10)$$

Demak, $p - n$ o'tishda hamma vaqt asosiy zaryad tashuvchilar diffuziyasi natijasida yuzaga keladigan diffuzion tok va unga qarama-qarshi yo'nalgan $p - n$ o'tishdagi elektr maydoni ta'sirida asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar harakati tufayli hosil bo'ladigan Dreyf toki vujudga keladi.

$p - n$ o'tishda hosil bo'ladigan potensial to'siq qiymati (φ) n va p turdagi yarimo'tkazgichlardagi Fermi sathlari qiymatlariga bog'liq va ularning farqiga teng bo'ladi:

$$\varphi = F_n - F_p \quad (7.11)$$

F_n va F_p qiymatlarini yuqorida keltirilgan ifodalarga asosan $p - n$ o'tishdagi potensial to'siqning to'g'ridan - to'g'ri n va p materiallardagi donor (N_d) hamda akseptor (N_a) kirishma atomlari yoki asosiy zaryad tashuvchilar n_n , p_p konsentratsiyasiga bog'liq nisbatini quyidagicha yozish mumkin:

$$\varphi = kT \ln \frac{n_n p_p}{(n_i)^2} = kT \ln \frac{N_d N_a}{(n_i)^2} \quad (7.12)$$

Bunda: n_i - berilgan haroratdagi xususiy zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi.

(7.12) ifodadan ko'rinib turibdiki, harorat oshishi bilan potensial to'siq qiymati kamayadi, chunki xususiy zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi (n_i) harorat oshishi bilan eksponensial qonuniyat bilan oshadi

$p - n$ o'tishda hosil bo'ladigan hajmiy zaryad sohaslar kengligi ham n va $p -$ turdagi yarimo'tkazgich materiallardagi donor va akseptor kirishma atomlarining konsentratsiyasiga bog'liq ekan:

$$L_n = \left(\frac{\kappa \cdot \varphi}{4\pi e N_d} \right)^{1/2}, \quad L_p = \left(\frac{\kappa \cdot \varphi}{4\pi N_a} \right)^{1/2} \quad (7.13)$$

Bunda: κ - materialning dielektrik doimiysi.

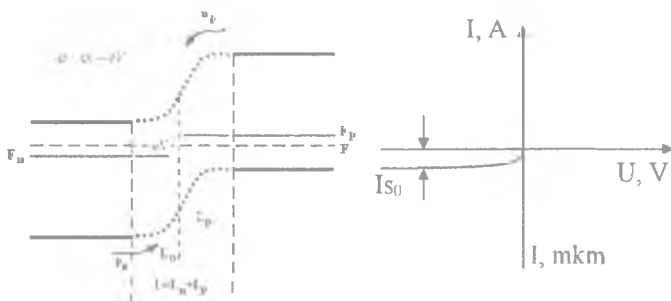
(7.13) ifodadan ko'rinib turibdiki, agar $N_d = N_a$ bo'lsa, $p -$ turdagi yarimo'tkazgich materialda hosil bo'ladigan hajmiy zaryad sohasining kengligi $n -$ turdagidan ko'proq bo'lishi mumkin. Unda hajmiy zaryad sohaslar kengligining nisbatlarini quyidagicha yozish mumkin:

$$\frac{L_n}{L_p} = \left(\frac{N_a}{N_d} \right)^{1/2} \quad (7.14)$$

7.7. $p - n$ o'tishga tashqi manba ulangandagi holat

$p - n$ o'tishli yarimo'tkazgich qurilmasidan elektronikada foydalanish uchun unga tashqi manba ulanadi va bunda ikki xil holatni ko'rib chiqamiz.

1) $p - n$ o'tishga ega bo'lgan yarimo'tkazgich materialining $n -$ turdagi tomoniga manbaning «+» $p -$ turdagi tomoniga manbaning «-» qutbi ulansin:



7.15-rasm. Teskari maydonda $p - n$ o'tish

Bu holda tashqi maydon bilan $p - n$ o'tishdagi elektr maydon yo'nalishlari bir - biriga mos tushadi. Natijada $n -$ turdan elektronlar manba ulangan kontakt tomonga, $p -$ turdan kovaklar ham manba ulangan kontaktga oqa boshlaydi. n va p kontakt sohasidagi hajmiy zaryad kengligi ortadi va to'siq balandligi ham tashqi maydon elektr kuchlaniganligiga mos holda ortadi va $\varphi = \varphi_0 + eV$ ga teng bo'ladi (7.15-rasm). Natijada $p - n$ o'tishdagi asosiy zaryad tashuvchilarning oqimi, ya'ni diffuzion tok miqdori kamayadi. Bu asosiy zaryad tashuvchilarning diffuziyasining kamayishiga va oqibatda yo'qolishiga olib keladi. Ammo bu holatdagi potensial to'siqning oshishi asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning harakatiga, ya'ni Dreyf toki qiymatiga ta'sir etmaydi. Endi $p - n$ o'tishdagi tok qiymati faqat Dreyf toki qiymati bilan aniqlanadi va tashqi manba kuchlanishiga bog'liq bo'lmay qoladi. $p - n$ o'tishda tashqi manbaning bunday ulanishi **teskari ulanish** deb qabul qilingan. Bunda o'ta kichik

va tashqi manba kuchlanishiga asosan bog'liq bo'lmagan o'tayotgan tok qiymati J_{so} – *teskari to'yingan tok qiymati* deyiladi. Bu holatdagi $p - n$ o'tish sohalar diagrammasiga e'tibor bersangiz, endi tizimda yagona muvozanat holatni ko'rsatuvchi Fermi sathi o'rniga n va p – turdagi elektron va kovaklarning tashqi manba qo'yilgandagi o'zgarishini aks ettiruvchi kvazi Fermi sathlari (F_p, F_n) hosil bo'ladi. Ularning farqi tashqi qo'yilgan potensialga teng ($F_n - F_p = eV$). J_{so} ning tashqi maydonga bog'liqlik grafigi $p - n$ o'tishning *teskari Volt-Amper tavsifi* deyiladi. J_{so} tokining qiymati asosan asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning qiymati bilan aniqlangani uchun uning miqdori o'ta kichik bo'lib, harakatdagi massalar qonuniga asosan asosiy zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi ortishi bilan yanada kamayadi ($n_n \cdot p_n = (n_i)^2$, $p_p \cdot n_p = (n_i)^2$). Bunday tokning qiymatini harorat va yarimo'tkazgichning fundamentall parametrlariga bog'liqlik ifodasi quyidagiga teng bo'ladi:

$$J_{so} = e(N_c \cdot N_v) \left(\frac{1}{N_a} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + \frac{1}{N_d} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \right) \cdot e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (7.15)$$

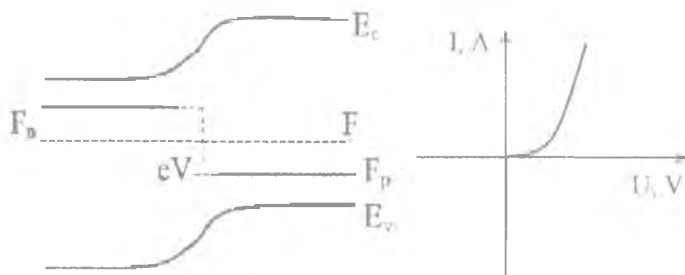
Bunda: D_n, D_p, τ_n, τ_p – elektron va kovaklarning diffuziya koeffitsiyenti va ularning yashash vaqti, N_a va N_d – donor va akseptor kirishma atomlari konsentratsiyasi, E_g – taqiqlangan soha kengligi. D_n va D_p lar Eynshteyn munosabatiga ko'ra quyidagi ifodalar yordamida aniqlanadi:

$$D_n = \frac{\mu_n}{e} \cdot kT, \quad D_p = \frac{\mu_p}{e} \cdot kT \quad (7.16)$$

(7.15) ifodadan ko'rinib turibdiki, harorat oshishi bilan J_{so} ning qiymati ortib boradi. Chunki harorat oshishi bilan xususiy zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi eksponensial qonun bilan oshib, ya'ni asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi oshadi.

2. Endi $p - n$ o'tishning n tomoniga tashqi manbaning «-», p tomoniga «+» qutblarini ulaylik. Bunda tashqi manbaning elektr

maydonini yo'nalishi $p - n$ o'tishdagi elektr maydon yo'nalishiga qarama – qarshi bo'ladi. Bu holatda $n -$ turga tashqi manbaga ulangan kontaktdan elektronlar, $p -$ turga esa kovaklar oqimi kira boshlaydi. Natijada $n -$ turda injeksiya qilingan elektronlarning konsentratsiyasi oshishi bilan $p - n$ o'tishning n sohasidagi musbat zaryadlangan hajmiy zaryad konsentratsiyasi kamayadi. Bunga sabab injeksiya qilingan elektronlar musbat hajmiy zaryadlarda yutiladi. Natijada hajmiy zaryad soha kengligi kamayadi. Xuddi shunday $p -$ turga ulangan manbadan kirib kelayotgan kovaklar oqimi ham $p - n$ o'tishning p tomonida hosil bo'lgan manfiy hajmiy zaryadlar konsentratsiyasini kamaytiradi. Shunga mos holda sohadagi hajmiy zaryad qalinligi ham kamayadi. Demak, $p - n$ o'tishdagi potensial to'siq miqdori ham qo'yilgan tashqi maydon kuchlanishiga mos holda kamayadi ($\varphi - \varphi_0 - eV$). Bu esa asosiy zaryad tashuvchilar bo'lgan $n -$ turdagi elektronlarni $p -$ turga va $p -$ turdagi kovaklarni $n -$ turga diffuziya oqimining oshishiga olib keladi, ya'ni diffuziya tokining miqdori oshadi. Bu oshish tashqi manba kuchlanishi oshgan sari yanada ko'proq ortib boradi. Bu holatda asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar hosil qilayotgan Dreyf toki o'z qiymatini o'zgartirmaydi. Natijada diffuzion tok miqdori Dreyf tok miqdoridan juda katta bo'ladi hamda eV oshgan sari ortishi tufayli $p - n$ o'tishdan o'tayotgan tok tashqi manba kuchlanishni oshishi bilan eksponensial holatda ortadi. Bu $p - n$ o'tishning to'g'ri yo'nalishiga mos keladigan Volt – Amper tavsifini ifodalaydi. Bu holatdagi $p - n$ o'tish sohalar diagrammasi quyidagi 7.16-rasmda ko'rsatilgan: $\varphi_k = \varphi_0 - eV$



7.16-rasm. To'g'ri maydonda $p - n$ o'tish

Bunda paydo bo'ladigan kvazi Fermi sath (F_n va F_p) lar mos holda o'tkazuvchanlik va valent sohalar tomon siljiydi. Bu siljish qiymati $F_n - F_p = eV$ ga teng.

Kvazi Fermi sathi – bu yarimo'tkazgich nomuvozanat holatda bo'lgandagi (injeksiya, yoritish va boshqa ta'sirlar mavjud bo'lgandagi) Fermi sathidir.

$p - n$ o'tishning umumiy Volt-Amper tavsifi quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$I = I_{so} \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right) \quad (7.17)$$

Bu ifodaga asosan eV , ya'ni tashqi maydon yo'nalishiga qarab ($-eV$, $+eV$) $p - n$ o'tishda tok o'ta kichik yoki juda katta qiymatga ega bo'ladi ($T = \text{const}$). Harorat oshishi bilan to'g'ri yo'nalishdagi tok miqdori kamayadi. Yuqori haroratda teskari tokning oshishi to'g'ri yo'nalishdagi tokning kamayishiga olib keladi. Oqibatda bu toklar qiymatining berilgan kuchlanishdagi farqlari asta – sekin kamayib, VAT endi Om qonunini aks ettiruvchi to'g'ri chiziq bilan ifodalanadi, ya'ni $p - n$ o'tishning to'g'rilagich xossasi yo'qoladi. Demak, har qanday $p - n$ o'tishga ega bo'lgan diodning to'g'rilagich xossasi harorat oshishi bilan yomonlashar ekan.

$p - n$ o'tish ulangan manba yo'nalishiga qarab, tokni bir tomonlama juda yaxshi o'tkazar ekan, ikkinchi yo'nalishda esa $p - n$ o'tishdan o'tayotgan tok juda kichik bo'ladi. $p - n$ o'tishning bunday noyob xususiyati uning *to'g'rilagich* sifatida foydalanish imkonini beradi. Agar $p - n$ o'tishga o'zgaruvchan manba ulasak, unda manbaning bir yo'nalishda tok o'tadi, ikkinchi yo'nalishida esa tok o'tmaydi. Demak, $p - n$ o'tish *o'zgaruvchan tokni o'zgarmas tokga aylantirib berar ekan*.

$p - n$ o'tishli diodlarda teskari tok qiymati J_{so} juda kam bo'lganligi uchun ularning to'g'rilagich xossalari metall – yarimo'tkazgich diodlariga nisbatan yaxshiroqdir. Har qanday to'g'rilagich diodlarining sifati ularning to'g'rilash ko'effitsiyentiga qarab aniqlanadi. U qancha katta bo'lsa, diodning to'g'irlagich xossasi shuncha yaxshi bo'ladi. To'g'rilash ko'effitsiyenti k – to'g'ri va teskari yo'nalishda $U = IV$ berilgandagi to'g'ri va teskari toklar qiymati bilan aniqlanadi:

$$k = \frac{J_{to'g'ri}}{J_{teskari}} = \frac{J}{J_{so}} \quad (7.18)$$

7.8. Geteroo'tishlar

Yuqorida bitta yagona kristall ichida diffuziya yo'li bilan hosil qilingan $p - n$ o'tishning xossalarini o'rganildi.

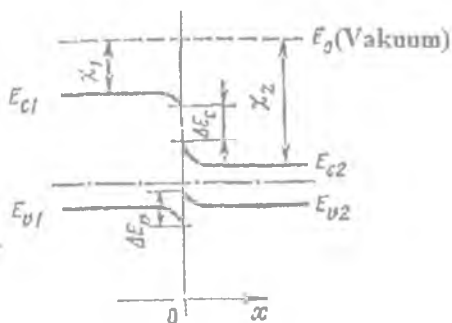
U holda p va n tomonlarni kristall panjara tuzilishi, ularning taqiqlangan sohalari va boshqa xususiyatlarida hech qanday farq mavjud emas. chunki ular yagona kristallda hosil qilingan. Bunday $p - n$ o'tishlar **gomo $p-n$ o'tish** deb ataladi.

Taqiqlangan energetik sohalari har xil bo'lgan ikki xil yarimo'tkazgich kontakti **geteroo'tish** deb ataladi.

Bunda ikki xil atom tuzilishlardagi yarimo'tkazgichlarni kristall panjara doimiysi va ularning issiqlikdan kengayish ko'effitsiyentlari har xil bo'ladi. Shuning uchun ham geteroo'tishning xossalari yuqorida keltirilgan: panjara doimiysi, issiqlikdan kengayish ko'effitsiyenti va atom tuzilishidagi farqlarga o'ta bog'liq bo'ladi. Geteroo'tishni hosil qilishda bu farqlar eng kam bo'lgan yarimo'tkazgich materiallari tanlab olinadi. Geteroo'tishli qurilmalarning mono $p - n$ o'tishlardagi materiallardan eng asosiy ahamiyati ular asosida yarimo'tkazgichli lazerlar, yorug'lik chiqaradigan diodlar, o'ta faol ishlaydigan samaradorligi yuqori bo'lgan quyosh elementlarini yaratish mumkin.

p – turdagi Ge kristalli bilan n – turdagi $GaAs$ kristalli asosidagi geterooʻtish strukturasi koʻrib chiqaylik (Ge va $GaAs$ kristall panjara doimiylari va boshqa xossalari bir – biriga juda yaqin). Bu materiallarning energetik soha tuzilishlaridan koʻrinib turibdiki, Ge da elektronlarning oʻtkazuvchanlik sohasidan vakuumga chiqish uchun zarur boʻlgan energiya (κ_2) $GaAs$ materiallarniki (κ_1) dan katta. Taqiqlangan soha kengliklari mos ravishda $E_{g(Ge)}=0,67$ eV, $E_{g(GaAs)}=1,43$ eV qiymatlarga teng.

$p - n$ getero oʻtishdagi energetik sohalar tuzilishi $p - n$ mono oʻtish energetik sohalar tuzilishidan farqi Ge va $GaAs$ materiallarining taqiqlangan sohalar kengligidagi farq taʼsiridan iborat boʻladi. Geterooʻtishda oʻtkazuvchanlik va valent sohalar energiyasi uzluksiz oʻzgarmasdan ularda ΔE_C va ΔE_V uzilgan sohalar hosil boʻlishiga olib keladi.



7.17-rasm. Geterooʻtishning sohalar diagrammasi

Bunda: κ_1 va κ_2 elektronlarning $GaAs$ va Ge oʻtkazuvchanlik sathidan vakuumga chiqishi uchun kerak boʻladigan energiya. Buni *atomning elektronga moyilligi* deb ataladi.

Ge (p – turdagi) ÷ $GaAs$ (n – turdagi) geterooʻtishda kovaklar Ge kristallining kontakt sohasidan $GaAs$ kontakt sohasiga oʻtib, undagi elektronlar bilan rekombinatsiyalashadi va elektronlar $n - GaAs$ kontakt sohasidan $p - Ge$ kontakt sohasiga oʻtib, undagi kovaklar bilan rekombinatsiyalashadi. Zaryad tashuvchilarning oʻzaro oʻtish

jarayoni muvozanat o'rnatilguncha, ya'ni Fermi sathlari tenglashguniga qadar davom etadi. Natijada *Ge* kontakt sohasi manfiy zaryadlanadi (kovaklar yo'qotgan akseptor ionlari hisobiga). *GaAs* kontakt sohasi esa shunga mos holda elektronlarni yo'qotgan donor ionlari hisobiga musbat zaryadlanib, hajmiy zaryad sohalari paydo bo'ladi va *GaAs* o'tkazuvchanlik sohasining yuqori (φ_1 qiymati) ga, *Ge* ning o'tkazuvchanlik sohasi esa past (φ_2 qiymati) ga siljishiga olib keladi. Natijada geteroo'tishda erkin zaryad tashuvchilar harakatiga to'sqinlik qiluvchi kontakt potensial to'siq hosil bo'ladi. Bu potensial to'siq qiymati quyidagiga teng bo'ladi:

$$\varphi = F_n - F_p = (\chi_{2Ge} - E_{g(Ge)} - \Delta\delta_{G_2}) - (\chi_{1GaAs} + \Delta\delta_{GaAs}) = \varphi_1 + \varphi_2 \quad (7.19)$$

7.17-rasmda keltirilgan sohalar diagrammasidan geteroo'tish o'tkazuvchanlik sohalaridagi uzilish qiymati ΔE_c ni topish mumkin:

$$\Delta E_c = \Delta\delta_{GaAs} + \chi_{1GaAs} - (E_{g(Ge)} - \Delta\delta_{G_2}) + \chi_{2Ge} \quad (7.20)$$

φ_1 va φ_2 ning qiymatlarini (7.19) ifodadan foydalanib, quyidagi tenglik yordamida topiladi:

$$\Delta E_c = \chi_{2Ge} - \chi_{1GaAs} \quad (7.21)$$

Demak, bu qiymat geteroo'tishni hosil qilayotgan yarimo'tkazgich materiallarida atomlarning elektronga moyillik (srodstva) larining farqiga teng bo'lar ekan (ya'ni, *Ge* va *GaAs* elektronlarni o'tkazuvchanlik sohadan vakuumga chiqishi uchun kerak bo'lgan energiya farqi). Xuddi shunga o'xshab valent sohadagi uzilish qiymatini ham topamiz:

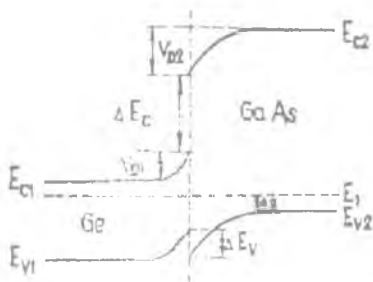
$$\Delta E_v = (E_{g(GaAs)} - E_{g(Ge)}) - (\chi_{2Ge} - \chi_{1GaAs}) \quad (7.22)$$

Valent sohasidagi uzilish ΔE_v ning qiymati yarimo'tkazgichlarning taqiqlangan sohalarini ayirmasi ularning energetik

qiymatlarining ayirmalarini farqiga teng bo'ladi (7.21) va (7.22) ifodalardan quyidagi tenglik kelib chiqadi:

$$\Delta E_V + \Delta E_C = (E_{g(GaAs)} - E_{g(Ge)}) \quad (7.23)$$

Demak, ΔE_C va ΔE_V larni geteroo'tishlarni tashkil etgan ikkita yarimo'tkazgich materiallarini taqiqlangan sohalar qiymatlari bilgan holda har qanday geteroo'tish uchun sohalar diagrammasini keltirish mumkin ekan. Masalan p -GaAs va n -Ge geteroo'tish sohalar diagrammasi quyidagi 7.18-rasmda keltirilgan.



7.18-rasm. p - GaAs va n - Ge geteroo'tish sohalar diagrammasi

Sohalar diagrammasidan ko'rinib turibdiki, potensial to'siqning qiymati kovaklar uchun elektronlarga qaraganda ancha kam, bu geteroo'tishda asosiy tok kovaklar harakati bilan aniqlanishini ko'rsatadi.

Geteroo'tishning Volt - Amper tavsifini quyidagi ifoda bilan aniqlash mumkin:

$$J = A \cdot \exp\left(-\frac{eV}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV_2}{kT}\right) - \exp\left(\frac{eV_1}{kT}\right) \quad (7.24)$$

Bunda,

$$\begin{aligned} V_2 &= k_2 V_0, & V_1 &= k_1 V_0, \\ k_2 &= \frac{1}{1 + \frac{N_A - \varepsilon_2}{N_A - \varepsilon_1}}, & k_1 &= 1 - k_2 \end{aligned} \quad (7.25)$$

V_o – tashqi manba kuchlanishi, V_1 , V_2 lar $p - GaAs$ hamda $n - Ge$ geteroo tishdagi kontakt sohalariga tushayotgan kuchlanish, N_d , $N_a - GaAs$ va Ge donor hamda akseptor kirishma atomlarining konsentratsiyasi.

Geteroo'tishga musbat yo'nalish berilganda, ya'ni manbaning «+» qutbi Ge kristalliga, «-» qutbi $GaAs$ kristalliga ulanganda VAT ifodasi quyidagicha bo'ladi:

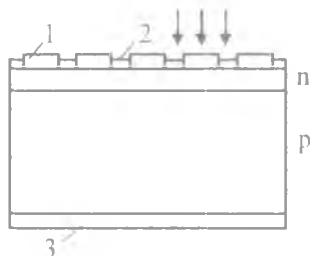
$$J = A \cdot \exp\left(-\frac{eV_2}{kT}\right) \exp\left(\frac{ek_2V_o}{kT}\right) \quad (7.26)$$

Bunda tok eksponensial qonuniyat bilan oshadi, ammo amaliyotda bu munosabat geteroo'tishdagi tunnel toklari va rekombinatsiya hisobiga o'zgarishi mumkin.

7.9. Quyosh elementi

Yorug'lik oqimi ta'sirida elektr yurituvchi kuch (yorug'lik EYuK) hosil bo'ladigan yarimo'tkazgichli asboblarga **quyosh elementlari** deyiladi.

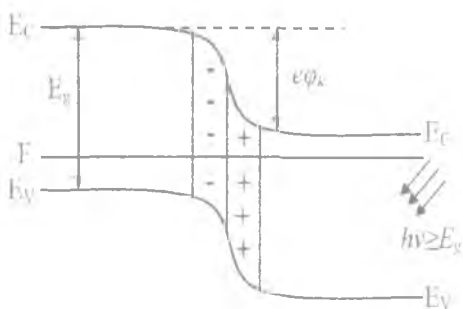
Quyosh elementlari yorug'lik energiyasini to'g'ridan-to'g'ri elektr energiyasiga aylantirib beradi. Bu jarayonning fizik mohiyatini quyidagicha tushuntirish mumkin. Quyosh elementlari yoki quyosh elementlarning asosi butun kristall (plastinka) yuzasi bo'yicha diffuziya usuli bilan hosil qilingan $p - n$ o'tish qurilmadir.



7.19-rasm. Quyosh elementining tuzilishi: 1 – quyosh elementini yoritiladigan tomondagi omik kontakt setkalari, 2 – SiO_2 qatlami, 3 – quyosh element yoritilmaydigan tomondagi yuza bo'yicha hosil qilingan omik kontakt

SiO_2 qatlam – Quyosh spektrining quyosh elementida maksimal yutilishini ta'minlovchi qalinligi – 1000 Å (0.1 mkm) bo'lgan yupqa qatlamdir. Bu qatlam dielektrik bo'lib, quyosh elementini tashqi ta'sirlardan ham himoya qiladi.

Endi bunday qurilmani yorug'lik nuri bilan yoritganimizda yutilgan fotonlar hisobiga (albatta, tushayotgan fotonlar energiyasi $h\nu \geq E_g$ bo'lganda) qo'shimcha fototok tashuvchilar, elektronlar Δn va kovaklar $+\Delta p$ paydo bo'ladi. Asosan bu jarayon n – yarimo'tkazgich qatlamida yuz beradi. Bunda asosiy zaryad tashuvchilar (n_0) ga Δn qo'shiladi, ammo bu n_0 nisbatan juda kam bo'lganligi uchun $n_0 = n_0 + \Delta n$. O'tkazuvchanlik sohadagi elektronlarning konsentratsiyasining o'zgarishi juda kam bo'ladi ($\Delta n \ll n_0$).



7.20 –rasm. Quyosh elementining energetik diagrammasi

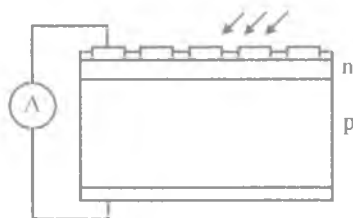
Ammo bunday materiallarda asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar miqdoriga (p_0) qo'shilgan Δp konsentratsiya p_0 ga nisbatan juda katta bo'ladi ($p_n \ll \Delta p$). Natijada paydo bo'lgan fotozaryad tashuvchilar $p - n$ o'tishda mavjud bo'lgan elektr maydon hisobiga ajralib, kovaklar potensial to'siqqa uchramasdan p materialga o'tib, undagi manfiy hajmiy zaryad akseptor ionlariga yutilishi natijasida hajmiy zaryad konsentratsiyasi va uning kengligi kamayadi. Bu hodisa n sohada ham Δn elektronlarning musbat ionlarga yutilishi hisobiga sodir bo'ladi

Natijada $p - n$ o'tishdagi potensial to'siq miqdori φ_0 kamayadi. Bu asosiy zaryad tashuvchilarning diffuziyasini, ya'ni $p - n$ o'tishdagi diffuzion tok miqdorining oshishiga olib keladi. Bu go'yoki $p - n$ o'tishga tashqaridan to'g'ri yo'nalishdagi manba ulangandagi holatning o'zidir. Demak, yorug'lik go'yoki tashqi manba vazifasini bajarib, $p - n$ o'tish sohasidan tok o'ta boshlaydi.

$p - n$ o'tish muvozanat holatidagi potensial to'siq (φ_0) ning yoritilish vaqtidagi kamayishi $\Delta\varphi$ quyosh elementida paydo bo'lgan elektr maydon kuchlanganligini hosil qiladi. Buni **quyosh elementining salt yurish kuchlanishi** deb ataladi va uni U_{xx} deb belgilash qabul qilingan.

Agar quyosh elementining p va n tomonlarini o'zaro ulansa, ulardan o'tayotgan tok **qisqa tutashuv toki** deb ataladi va I_{qt} bilan belgilanadi.

U_{xx} va I_{qt} qiymatlari, albatta, tushayotgan yorug'likning intensivligiga kuchli bog'liq bo'ladi ($h\nu > E_g$). Demak, quyosh elementining eng asosiy parametrlaridan biri berilgan yorug'lik oqimi va haroratda olinadigan U_{xx} bilan I_{qt} ekan.



7.21 –rasm. Quyosh elementining tuzilishi

Yuqorida ta'kidlanganidek, quyosh elementining U_{xx} va I_{qt} qiymatlari yorug'lik ta'sirida hosil bo'layotgan fototok tashuvchilarning $p-n$ o'tishga yetib borib, to'la ajralib hajmiy zaryadlarda yutilishiga bog'liq. Shuning uchun quyosh elementlarida ajralish koeffitsiyenti (x) kiritilgan

Ajralish koeffitsiyenti (x) – bu yoritish natijasida paydo bo‘lgan foto zaryad tashuvchilarning (Δn va Δp) o‘zaro rekombinatsiya bo‘lmasdan qancha qismi p - n o‘tishga yetib borib ajralishini ko‘rsatadi.

Faqat mana shu $p - n$ o‘tishga yetib kelgan va to‘la ajralgan (ya‘ni, hajmiy zaryadlarda yutilgan) qismigina I_{qt} va U_{xx} qiymatini aniqlab beradi. Bunda asosan n – yoritilganlik sohasidagi asosiy bo‘lmagan zaryad tashuvchilarning yashash vaqti asosiy parametr bo‘ladi. Shuning uchun yarimo‘tkazgich yuzasidan (n - tur) to $p - n$ o‘tishgacha bo‘lgan masofa ($p - n$ o‘tish chuqurligi – L) asosiy bo‘lmagan zaryad tashuvchilarning erkin yugurish yo‘li l dan ($l = \sqrt{D_p \tau_p} \cdot D_p$ – kovaklarning diffuziya koeffitsiyenti, τ_p – ularning yashash vaqti) kam bo‘lishi kerak ($L \leq l = \sqrt{D_p \tau_p}$).

Bu shart bajarilishi uchun ikki narsani hisobga olish kerak: yoki L ni kamaytirish yoki τ_p ni oshirish. L juda kamayib ketsa, yorug‘lik yutilishi ham kamayadi. Shuning uchun hozirgi zamon quyosh elementlarida $L=0.3 \div 1$ mkm ga teng. Bundan kelib chiqadiki, τ_p ni oshirish texnologiyasini o‘ylash kerak.

Quyosh elementlarining yana eng asosiy parametrlaridan biri bu – VATni to‘ldirish koeffitsiyentidir. Tekshirilayotgan quyosh elementiga optimal qarshilik (R_{yukopt}) ulanganda olish mumkin bo‘lgan maksimal tok (I_{max}) va kuchlanishning (U_{max}) ko‘paytmasi maksimal quvvat ($P_{max}=I_{max} U_{max}$) ni qisqa tutashuv toki (I_{qt}) va salt yurish kuchlanishi (U_{xx}) ga bo‘lish orqali aniqlanadi. Son qiymati birdan kichik va odatda $FF \sim 0.8$ ga teng bo‘ladi.

To‘ldirish koeffitsiyenti (FF) quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$FF = \frac{I_{max} \cdot U_{max}}{I_{qt} \cdot U_{xx}} \quad (7.27)$$

Bunda: I_{max} va U_{max} – quyosh elementidan olinadigan foydali tok kuchi va kuchlanishning maksimal qiymatlari.

Bulardan kelib chiqqan holda quyosh elementining FIKni quyidagi ifoda yordamida aniqlash mumkin:

$$\eta = \frac{I_{qt} \cdot U_{xx} \cdot FF}{W} \quad (7.28)$$

Bunda, W – quyosh elementiga tushayotgan quyosh nurining quvvati.

Quyosh elementining foydali ish koeffitsiyenti (FIK) quyosh elementiga tushayotgan yorug'lik energiyasining qancha qismi to'g'ridan-to'g'ri elektr energiyasiga aylanganligini ko'rsatadi.

Quyosh elementining FIK unga ishlatiladigan yarimo'tkazgich material tabiatiga va tuzilishiga, Omik kontakt sifatiga, materiallar qarshiligiga, tushayotgan yorug'lik oqimining qancha qismi yuzadan qaytishi va qancha qismi yarimo'tkazgichda yutilmasdan o'tib ketishiga, hosil bo'lgan elektron – kovaklarning qancha qismi $p - n$ o'tish sohasida ajralganligiga bog'liq bo'ladi. Shunga o'xshash jarayonlar yorug'lik energiyasidan to'liq foydalanish imkonini bermaydi, ya'ni energiya bir qismi yo'qolishiga olib keladi.

Yarimo'tkazgichda yorug'lik nuri yutilganda elektron va kovak hosil bo'ladi. Yarimo'tkazgichdagi $p - n$ o'tish elektr maydoni ta'sirida erkin elektronlar n - sohaga kovaklar esa p – sohaga o'tadi. Natijada yarimo'tkazgichning n - sohasida ortiqcha erkin elektronlar, p – sohasida esa kovaklar to'planadi va $n - soha$ manfiy, p - soha musbat zaryadlanadi. Agar yarimo'tkazgichning $n - va$ $p - sohalari$ ni tashqi zanjir bilan tutashtirilsa, berk zanjirdan tok oqadi.

Quyosh elementining VAT

$p - n$ o'tishning qorong'ulikdagi VAT quyidagicha aniqlanadi:

$$I = I_s \cdot \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (7.29)$$

Agar $p - n$ o'tish yoritilsa, qo'shimcha yorug'lik toki (I_f) hosil bo'ladi:

$$I = I_f - I_s \cdot \left(e^{\frac{e\varphi}{kT}} - 1 \right) \quad (7.30)$$

Bu ifodani quyidagicha yozish mumkin:

$$\begin{aligned} I_s \cdot \left(e^{\frac{e\varphi}{kT}} - 1 \right) &= I_f - I_s, & e^{\frac{e\varphi}{kT}} &= \frac{I_f - I}{I_s} + 1, & \frac{e\varphi}{kT} \\ &= \ln \left(\frac{I_f - I}{I_s} + 1 \right), \\ \varphi &= \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{I_f - I}{I_s} \right) \end{aligned} \quad (7.31)$$

Agar quyosh elementiga ($p - n$ o'tishga) tashqi zanjir ulansa, u holda (7.29) va (7.30) ifodadagi tok

$$I = \frac{U_{yuk}}{R_{yuk}} \quad (7.32)$$

ifodaga teng bo'ladi. Shundan kelib chiqib, (7.30) ifodani quyidagicha yozish mumkin:

$$I_f - I_s \left(e^{\frac{e\varphi}{kT}} - 1 \right) = \frac{U_{yuk}}{R_{yuk}} \quad (7.33)$$

Bu ifodadagi fototok (I_f) yuklama qarshiligi (R_{yuk}) dan o'tayotgan tok $I_{yuk} = \frac{U_{yuk}}{R_{yuk}}$ ifoda bilan $p - n$ o'tishdan o'tayotgan tok

$I_u = I_s \cdot \left(e^{\frac{e\varphi}{kT}} - 1 \right)$ ifoda yig'indisiga teng bo'ladi:

$$I_f = I_{yuk} + I_u \quad (7.34)$$

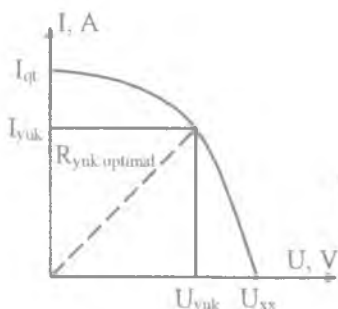
$R_{yuk} \rightarrow 0$ kichik bo'lganda (qisqa tutashuv toki holatda) (7.34) ifodada $I_u \approx 0$ va $I_{yuk} \approx I_f$ ga teng bo'ladi.

$$\begin{aligned} (I_{yuk} = I_{qt}), \quad I_f = \Delta\sigma \cdot E \\ = e \cdot \beta \cdot k \cdot l (\mu_n \cdot \tau_n + \mu_p \cdot \tau_p) \cdot E \end{aligned} \quad (7.35)$$

$R_{yuk} \rightarrow \infty$ katta bo'lganda (foto EYuK holati) (7.34) ifodadagi $I_{yuk} = 0$ va $I_u \approx I_f$ teng bo'ladi va u holda (7.31) ifodadan

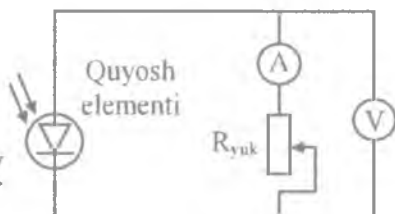
$$\Delta\varphi = U_{xx} = \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{I_f}{I_s} \right) \quad (7.36)$$

Yorug'lik tushganda potensial to'siq kamayishi $\Delta\varphi$ salt yurish kuchlanishga teng bo'ladi.



7.22-rasm.

Quyosh elementining VAT grafigi



7.23-rasm.

Quyosh elementining VAT ni o'lchash sxemasi

Yuqoridagi rasmlardan ko'rinadiki, $R_{yuk} = 0 \Omega$ bo'lganda,

$$I_{yuk} = I_{qt}, U_{yuk} = 0, P_{yuk} = I U = 0$$

ga teng bo'ladi.

$R_{yuk} \rightarrow \infty \Omega$ da

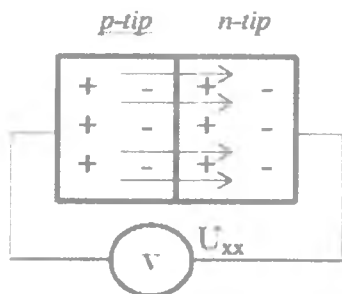
$$I_{yuk} = 0, U_{yuk} = U_{xx}, P_{yuk} = I \cdot U = 0$$

ga teng bo'ladi.

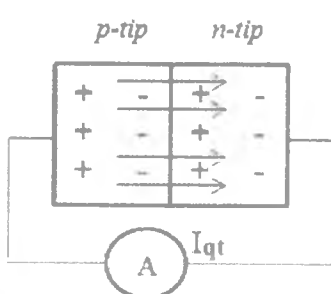
$$R_{yuk} = R_{optimal} \Omega \text{ da}$$

$$I_{yuk} > 0, U_{yuk} < 0, P_{yuk} = I_{max} \cdot U_{max} = P_{max}$$

ga teng bo'ladi.



7.24 rasm. Quyosh elementining salt yurish kuchlanishini (U_{xx}) o'lchash



7.25 rasm. Quyosh elementining qisqa tutashuv tokini (I_{qt}) o'lchash

Sinov savollari:

1. Chiqish ishi nima?
2. Yarimo'kazgichlarda chiqish ishining qiymati nimalarga bog'liq?
3. Metall – yarimo'kazgich kontaktlari necha turga bo'linadi va ular qanday hosil qilinadi?
4. Metall – yarimo'kazgich kontakt sohalar diagrammasi va VAT ini chizing va tushuntiring.
5. Omik kontakt hosil qilishning asosiy sharti nima?
6. $p - n$ o'tish potensial to'sig'i harorat oshganda qanday o'zgarishi mumkin?
7. $p - n$ o'tishning sohalar diagrammasini chizing va tushuntirib bering.
8. Shottki diodi qanday hosil qilinadi?

9. Shottki va $p - n$ o'tish diodlarining asosiy farqi nima va ular qayerlarda ishlatiladi?

10. Quyosh elementi qanday materiallardan tayyorlanadi?

11. Quyosh elementi qanday maqsadda ishlatiladi?

12. Quyosh elementining yuza va orqa omik kontaklarining tuzilish qanday bo'ladi?

13. Quyosh elementida yorug'lik energiyasining elektr energiyaga aylanishi qanday sodir bo'ladi?

14. Quyosh elementining qisqa tutashuv toki deganda nimani tushunasiz?

15. Quyosh elementining salt yurish kuchlanishini tushuntiring.

16. Quyosh elementining foydali ish koeffitsiyentini tushuntiring.

17. Quyosh elementining VAT ni tushuntiring.

18. Quyosh elementining VAT sining to'ldirish koeffitsiyentini tushuntiring.

19. Quyosh elementining tuzilishini tushuntiring?

Metall – yarimo'tkazgich kontakti va $p-n$ o'tish fizikasi mavzusiga doir masalalar:

1. Elektronlar konsentratsiyasi $n=5 \cdot 10^{15} \text{sm}^{-3}$ bo'lgan n -tur va kovaklar konsentratsiyasi $p = 2 \cdot 10^{16} \text{sm}^{-3}$ bo'lgan p -tur kremniy materialida hosil bo'lgan $p - n$ o'tish potensial to'sig'ining qiymatini aniqlang ($T=300\text{K}$).

2. Elektronlar konsentratsiyasi $n=6 \cdot 10^{15} \text{sm}^{-3}$ va kovaklar konsentratsiyasi $p=5 \cdot 10^{16} \text{sm}^{-3}$ bo'lgan germaniy materialidagi $p - n$ o'tish potensial to'siq qiymatini hisoblang ($T=300\text{K}$).

3. Elektronlar konsentratsiyasi $n = 6 \cdot 10^{15} \text{sm}^{-3}$ va kovaklar konsentratsiyasi $p = 5 \cdot 10^{16} \text{sm}^{-3}$ bo'lgan $GaAs$ materialidagi $p - n$ o'tish potensial to'sig'ining qiymatini hisoblang ($T=300\text{K}$).

4. Nima uchun bir xil elektronlar va kovaklar konsentratsiyasiga ega bo'lgan Si , Ge , $GaAs$ kristallarida $p - n$ o'tish potensial to'siq qiymati juda katta farq qiladi? Tushuntirib bering.

5. Harorat pasayishi bilan $p - n$ o'tish potensial to'siq qiymati qanday o'zgaradi? Natijani Si materialida $n=10^{14} \text{sm}^{-3}$ va $p=4 \cdot 10^{14} \text{sm}^{-3}$ $p - n$ o'tishda $T=300, 200, 100 \text{ K}$ uchun hisoblab tushuntirib bering.

6. Elektronlar konsentratsiyasi $n=5 \cdot 10^{15} \text{sm}^{-3}$ va kovaklar konsentratsiyasi $p=5 \cdot 10^{16} \text{sm}^{-3}$ bo'lgan diodda hajmiy zaryad qalinligini hisoblang.

7. Elektronlar konsentratsiyasi $n=5 \cdot 10^{18}$, 10^{19} , $2 \cdot 10^{19} \text{sm}^{-3}$ va kovaklar konsentratsiyasi ham xuddi shunday mos ravishdagi qiymatlarga ega bo'lgan kremniy materialidan tayyorlangan diodning hajmiy zaryad qalinligini hisoblang va tushuntiring ($T = 300 \text{ K}$).

8. Elektronlar konsentratsiyasi $n=5 \cdot 10^{15} \text{sm}^{-3}$ va kovaklar konsentratsiyasi $p=5 \cdot 10^{16} \text{sm}^{-3}$ bo'lgan diodda n va p – turdagi hajmiy zaryad kengligini hisoblang ($T=300 \text{ K}$).

9. Harorat $T=300$, 350 , 400 K bo'lganda elektronlar konsentratsiyasi $n=10^{17} \text{sm}^{-3}$ va kovaklar konsentratsiyasi $p=5 \cdot 10^{17} \text{sm}^{-3}$ bo'lgan kremniydagi $p - n$ o'tish potensial to'siq qiymatini hisoblang va olingan natijani tushuntirib bering ($T=300 \text{ K}$).

10. Harorat $T=300$, 350 , 400 K bo'lganda elektronlar konsentratsiyasi $n=10^{17} \text{sm}^{-3}$ va kovaklar konsentratsiyasi $p=5 \cdot 10^{17} \text{sm}^{-3}$ bo'lgan kremniydagi $p - n$ o'tish potensial to'siq qiymatini hisoblang va olingan natijani tushuntirib bering ($T=300 \text{ K}$).

11. Qisqa tutashuv toki 25 mA erkin holatdagi kuchlanishi 600 mV VATning to'ldirish ko'effitsiyenti 70% va yuzasi 1.5 sm^2 bo'lgan quyosh elementining FIK hisoblansin. Quyosh nurlarining quvvati 800 Wt/m^2 deb olinsin.

12. FIK 11% , VATning to'ldirish ko'effitsiyenti 65% va yuzasi 0.8 sm^2 bo'lgan quyosh elementidagi qisqa tutashuv toki 21 mA , erkin holatdagi kuchlanishi 600 mV bo'lsa, tushayotgan quyosh nurini quvvati topilsin.

13. Quyosh elementining fototoki 100 mA , teskari to'yinish toki 10^{-9} A bo'lsa, uyning va 70° C haroratidagi erkin holatidagi kuchlanishi aniqlansin.

14. Erkin holatidagi kuchlanishi 600 mV va fototokini qiymati 25 mA bo'lgan Quyosh elementining teskari to'yinish toki topilsin.

15. Fototokining qiymati 65 mA , teskari to'yinish toki $6.5 \cdot 10^{-8} \text{ A}$ bo'lgan quyosh elementining harorati 1° C ga ortgandagi erkin holatidagi kuchlanishini o'zgarishi hisoblansin. Fototokning o'zgarishi hisobga olinmasin.

16. Quyidagi 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9; 1.0 mkm to‘lqin uzunliklar uchun kremniyning yutilish koeffitsiyenti aniqlansin. Yuqoridagidek hisoblashlar *GaAs*, *GaP* va *Ge* uchun ham bajarilsin.

17. To‘lqin uzunligi 0.55 mkm bo‘lgan fotonlar oqimining zichligi monokristall kremniyning quyidagi 1.5 mkm 5.0 mkm: 100.0 mkm qatlamlarida necha marotaba o‘zgaradi?

18. Monokristall kremniy, germaniy, galliy arsenid va indiy fosfidlari uchun yutiladigan to‘lqin uzunliklarining qiymatlari topilsin.

19. Agar tushayotgan fotonlarning boshlang‘ich zichligi 10^{20} sm^{-3} bo‘lsa, monokristall kremniy asosida yasalgan quyosh elementi bazalarining qalinliklari qanday bo‘lganda, quyidagi to‘lqin uzunliklar 0.25 mkm; 0.45 mkm; 0.65 mkm; 0.85 mkm; 1.05 mkm uchun to‘la yutilish kuzatiladi?

20. Kremniy asosida yasalgan quyosh elementidagi asosiy bo‘lmagan zaryad tashuvchilar: elektronning yashash vaqti 10^{-6} s , kovakning yashash vaqti 10^{-7} s , bo‘lganda ularning diffuziyasining uzunliklari hisoblansin.

21. Quyosh elementining ko‘rish mumkin bo‘lgan qismidagi eng katta (0.76 mkm) va eng kichik (0.4 mkm) to‘lqin uzunliklariga to‘g‘ri kelgan foton energiyalari aniqlansin.

22. Rentgen va infraqizil nurlar uchun fotonlarning massasi va impulsi topilsin.

23. Quvvati 100 Vt bo‘lgan yorug‘lik manbai 1 sekund davomida $5 \cdot 10^{20}$ ta foton chiqarayotgan bo‘lsa, nurlanishining o‘rtacha to‘lqin uzunligi topilsin.

24. Fotoelektronlarning maksimal tezliklari 3000 km/sek ga erishishi uchun chiqish ishi 6.3 eV ga teng bo‘lgan plastinka yuziga qanday chastotali nurlarni yo‘naltirish kerak bo‘ladi?

25. Quyosh har sekundda fazoga $3.75 \cdot 10^{26} \text{ Dj}$ ga yaqin energiya nurlantirib turadi. Shu munosabat bilan Quyoshning massasi har sekundda qanchaga kamayadi?

26. Quyoshning tashqi qatlamini harorati 5800 K bo‘lsa, Quyosh nurlanishining maksimal energiyasiga to‘g‘ri kelgan to‘lqin uzunligi topilsin. To‘lqin uzunligiga to‘g‘ri kelgan maksimal nurlanish odam tanasining haroratiga mos deb hisoblansin.

27. O'z bo'yingizni bilgan holda soyangizni o'lchab, atmosfera massasini aniqlang.

28. Qizil nur energiyasi yashil nur energiyasidan qancha marotaba kichik?

Metall – yarimo'tkazgich kontakti va p-n o'tish fizikasi mavzusiga doir masalalarning yechilishi:

Masalaning berilishi. Elektronlar konsentratsiyasi $n=5 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ bo'lgan n – tur va kovaklar konsentratsiyasi $p=2 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ bo'lgan p – tur kremniy materialida hosil bo'lgan p-n o'tish potensial to'sig'ining qiymatini aniqlang ($T=300\text{K}$).

Masalaning yechilishi. Berilgan: $n_n=5 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$, $p_p=2 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$, $T=300\text{K}$. Topish kerak $\varphi=?$

Masalada berilgan qiymatlardan foydalangan holda $p - n$ o'tishning potensial to'sig'ining ifodasidan p – turdagi kremniy materialida hosil bo'lgan $p - n$ o'tishning potensial to'sig'ini aniqlaymiz:

Berilgan:

$n_0=5 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$, $p_0=2 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$, $T=300\text{K}$, $\varphi=?$ $n_i=21,45 \cdot 10^{10} \text{ sm}^{-3}$

$$\begin{aligned}\varphi &= kT \ln \frac{n_n p_p}{(n_i)^2} = kT \ln \frac{5 \cdot 10^{15} \cdot 2 \cdot 10^{16}}{(21,45 \cdot 10^{10})^2} = kT \ln \frac{10^{32}}{4,6 \cdot 10^{22}} \\ &= kT \ln(2,17 \cdot 10^9) = kT \cdot 21,5 \\ &= 8,625 \cdot 10^{-5} \cdot 300 \cdot 21,5 = 0,56 \text{ eV}\end{aligned}\quad (7.37)$$

$$\varphi = 0,56 \text{ eV}.$$

8. TRANZISTORLAR

8.1. Bipolyar tranzistorning tuzilishi

Bipolyar tranzistor tuzilishining sxemasi quyidagi 8.1-rasmda ko'rsatilgan.

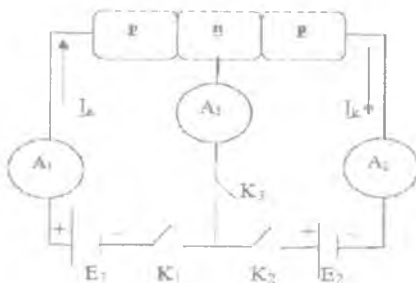
Emitter Baza Kollektor



8.1-rasm. Tranzistorning ekvivalent tuzilishi

Yuqoridagi rasmdan ko'rinadiki, tranzistor ikkita $p - n$ o'tishdan iborat bo'lar ekan: birinchi $p - n$ o'tish emitter o'tish, ikkinchi $n - p$ o'tish kollektor o'tish deyiladi. O'rtadagi n soha tranzistor bazasi, chap tomondagi p soha emitter, o'ng soha kollektor deb ataladi.

Tranzistorning ishlash prinsipi



8.2-rasm. Tranzistorning tashqi elektr kuchlanishga ulanishi tartibi

Tranzistorning emitter o'tishiga E_1 to'g'ri kuchlanish, kollektor o'tishiga E_2 teskari kuchlanish ulangan. K_1 va K_2 kalitlar ulanganda emitterdan bazaga kovaklar, bazadan emitterga elektronlar o'tadi

(injeksiyalanadi). Emitter o'tishdan quyidagi yo'nalishda emitter toki I_e o'tadi (8.2-rasm).

$$"+E_1" \rightarrow A_1 \rightarrow \text{emitter} \rightarrow \text{baza} \rightarrow A_3 \rightarrow K_3 \rightarrow K_1 \rightarrow "-E_1"$$

Agar K_1 uzilgan va K_2, K_3 ulangan bo'lsa, kollektor o'tishiga teskari kuchlanish ulangan bo'lgani uchun bazadan kollektorga kovaklar va kollektordan bazaga elektronlar o'tishi hisobiga I_k toki kollektor o'tishidan quyidagi yo'nalishda o'tadi:

$$"+E_2" \rightarrow K_2 \rightarrow K_3 \rightarrow A_3 \rightarrow \text{baza} \rightarrow \text{kollektor} \rightarrow A_2 \rightarrow "-E_2"$$

Agar uchta K_1, K_2, K_3 ulansa, emitter o'tishiga to'g'ri kuchlanish berilgani uchun emitterdan bazaga kovaklar diffuziyanadi (injeksiyalanadi). Baza sohasi yupqa bo'lgani uchun bu kovaklar rekombinatsiyanishga ulgurmasdan kollektor o'tishiga yetib keladi va kollektor o'tishidagi elektr maydoni ta'sirida kollektor sohasiga tortib olinadi (ekstraksiyalanadi). Odatda emitter sohasidagi akseptor kirishma atomlari konsentratsiyasi (N_a) baza sohasidagi donor kirishma atomlari konsentratsiyasi (N_d) dan ko'p bo'lgani ($N_a \gg N_d$) uchun bazadan emitterga diffuziyanib o'tayotgan elektronlar soni emitterdan bazaga diffuziyanib o'tayotgan kovaklar sonidan juda kam bo'ladi ($I_{en} \ll I_{ep}$). Shuning uchun emitter o'tishidagi tok kovaklar hosil qilgan tok I_{ep} ga teng bo'ladi $I_e \approx I_{ep}$. Emitterning samaradorligi *injeksiya koeffitsiyenti* (γ) bilan aniqlanadi:

$$\gamma = \frac{I_{ep}}{I_e} = \frac{I_{ep}}{I_{ep} + I_{en}}, \quad \text{ya'ni} \quad \frac{I_{en}}{I_{ep}} \ll 1 \quad (8.1)$$

bo'lgani uchun $\gamma \approx 0,999$ ga teng bo'ladi.

Emitter sohasidagi bazaga diffuziyanib (injeksiyanib) o'tgan kovaklar kollektor o'tishiga deyarli to'liq yetib keladi va juda kam qismigina baza sohasida rekombinatsiya bo'lgani sababli kollektor tokini (I_k) emitter toki (I_e) ga taxminan teng ($I_k \approx I_e$) deyish mumkin. Baza sohasida rekombinatsiya bo'lgan kovaklar baza toki (I_b) ni hosil qilishda qatnashadi:

$$I_b = I_e - I_k \quad (8.2)$$

Emitter toki

$$I_e = I_b + I_k \quad (8.3)$$

Tranzistorning kuchaytirish xossasiga zaryad tashuvchilar (elektron va kovaklar)ning baza sohasidagi rekombinatsiyasining taʼsirini baholash uchun zaryad tashuvchilarning emitter oʻtishidan kollektor oʻtishiga yetib borishida oʻtish koeffitsiyenti δ (koeffitsiyent perenosa) dan foydalaniladi:

$$\delta = \frac{I_{kp}}{I_{ep}} \quad (8.4)$$

baza sohasi qancha yupqa va elektronlar kam boʻlsa, δ - koeffitsiyent birga yaqin boʻladi. Tranzistorlarning asosiy parametrlaridan biri emitter tokining uzatish koeffitsiyenti boʻlib, u quyidagiga teng boʻladi:

$$\alpha = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_e} \quad (8.5)$$

yaʼni α emitter tokining ΔI_e oshishi kollektor tokining qancha oshishini (kollektor oʻtishiga berilgan kuchlanish oʻzgarmas boʻlganda) koʻrsatadi. Odatda $\alpha = 0,95 \dots 0,99$ qiymatlarga ega boʻladi. α qancha katta boʻlsa, tranzistorning kuchaytirish xossasi shuncha yuqori boʻladi. Kollektor oʻtishida emitterdan kollektorga yetib kelgan kovaklar hosil qiladigan kollektor tokidan tashqari kollektor oʻtishining teskari toki I_{kbs} ham oʻtadi:

$$I_k = \alpha I_e + I_{kbs} \quad (8.6)$$

Odatda $\alpha I_e \gg I_{kbs}$ shuning uchun

$$I_k = \alpha I_e \quad (8.7)$$

Bu ifodadan ko'rinadiki, tranzistorning chiqish toki I_k ni kirish toki I_e bilan boshqarish mumkin ekan.

Tranzistorning emitter va kollektor o'tishlariga tashqi elektr manbaining qutblarini turlicha ulash yo'li bilan uch xil holatda ishlatish mumkin.

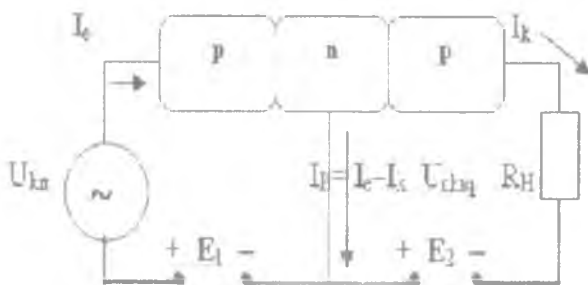
Faol holat – emitter o'tishiga to'g'ri kuchlanish, kollektor o'tishiga teskari kuchlanish beriladi.

Otsechka holat– emitter o'tishiga ham, kollektor o'tishiga ham teskari kuchlanish beriladi. Tranzistor yopiq holatda bo'ladi.

To'yinish holat– emitter o'tishiga ham, kollektor o'tishiga ham to'g'ri kuchlanish beriladi. Tranzistorning chiqish zanjirida tok eng katta qiymatiga ega va kirish zanjiridagi toki bilan boshqarilmaydi. Tranzistor ochiq holatda bo'ladi.

Tranzistorlarni ulash sxemalari

I. Tranzistorni umumiy baza sxemasi bo'yicha ulash



8.3-rasm. Tranzistorni umumiy baza sxemasi bo'yicha ulash

Sxemada kirish signali manbai (U_{kirish}) dan emitter toki (I_e) o'tadi (aniqrog'i kirish signali manбайдan o'tadigan tok **kirish toki** deyiladi) $I_{kirish} = I_e$. Bu sxemada chiqish toki kollektor tokidir: $I_{chiqish} = I_{kirish}$. Agar kirish signali I_{kirish} ta'sirida emitter toki ΔI_e ga ortsa, u holda tranzistorning boshqa toklari ham mos ravishda ortadi:

$$I_e + \Delta I_e = I_k + \Delta I_k + I_b + \Delta I_b \quad (8.8)$$

Tranzistorlar qanday ulanishidan qat'iy nazar tokni to'g'ri uzatish differensial koeffitsiyenti bilan xarakterlanadi. Tranzistor umumiy baza sxemasi bo'yicha ulanganda bunday koeffitsiyent sifatida emitter tokining uzatish koeffitsiyenti xizmat qiladi:

$$\alpha = \frac{\Delta I_{chiqish}}{\Delta I_{ktrish}} = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_e}, \quad E_2 = const \quad (8.9)$$

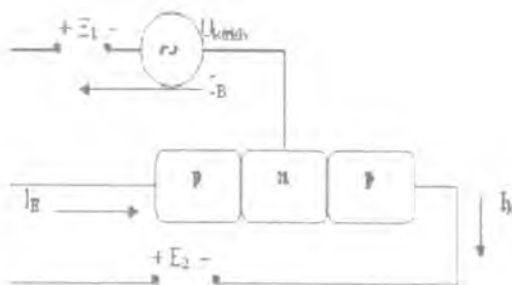
Emitter toki tranzistorning barcha toklaridan katta bo'lgani uchun umumiy baza sxemasida kirish tokining o'zgaruvchan tashkil etuvchisidan kirish qarshiligi kichik bo'ladi (to'g'ri kuchlanish berilgandagi emitter o'tish qarshiligi r_e ga teng)

$$R_e = \frac{\Delta U_{ktrish}}{\Delta I_{ktrish}} = \frac{\Delta U_{ktrish}}{\Delta I_e} \approx r_e \quad (8.10)$$

Umumiy baza sxemasida kirish qarshiligining kichikligi uning asosiy kamchiligidir, chunki ko'p kaskadli kuchaytirgichlarda bu qarshilik o'zidan oldingi kaskad yuklama qarshiligi uchun shuntlovchi qarshilik bo'lib qoladi va kaskadning kuchlanish va quvvat bo'yicha kuchaytirishni kamaytiradi.

II. Tranzistorni umumiy emitter sxemasi bo'yicha ulash

Emitter elektrodi kirish va chiqish zanjirlari uchun umumiydir (8.4-rasm).



8.4-rasm. Tranzistorni umumiy emitter sxemasi bo'yicha ulash

Umumiy emitter sxemasining afzalligi kirish tokining qiymati kichik bo'lgan baza tokiga teng bo'ladi. I_b kirish, chiqish toki esa kollektor toki (I_k) bilan aniqlanadi.

Tokni uzatish koeffitsiyenti:

$$\beta = \frac{\Delta I_{\text{chIQish}}}{\Delta I_{\text{ktIrish}}} = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b} \quad (8.11)$$

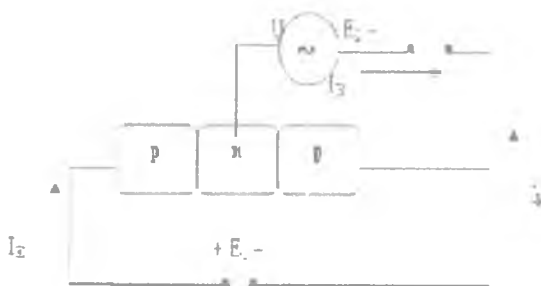
Umumiy emitter sxemasi bo'yicha ulanganda tranzistorning kirish qarshiligi, umumiy baza sxemasi bo'yicha ulangandagiga nisbatan katta bo'ladi:

$$\frac{\Delta U_{ktIrish}}{\Delta I_b} \gg \frac{\Delta U_{ktIrish}}{\Delta I_e} \quad (8.12)$$

chunki $\Delta I_b \ll I_e$. Shuning uchun tranzistorlarning umumiy emitter sxemasi bo'yicha ulash ko'proq qo'llaniladi.

III. Tranzistorni umumiy kollektor sxemasi bo'yicha ulash

Tranzistor umumiy kollektor sxemasi bo'yicha ulanganda kirish signali baza kollektorga beriladi (8.5-rasm). Kirish toki baza toki (I_b), chiqish toki emitter toki (I_e) bo'ladi.



8.5-rasm. Tranzistorni umumiy kollektor sxemasi bo'yicha ulash

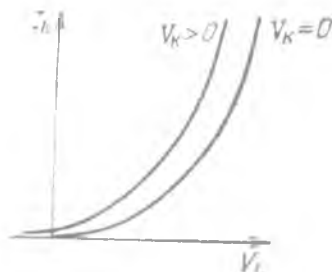
Tokni uzatish koeffitsiyenti quyidagiga teng bo'ladi:

$$\frac{\Delta I_k}{\Delta I_B} = \beta + 1 \quad (8.13)$$

Tranzistorni umumiy kollektor sxemasi bo'yicha ulash kirish signalini kuchlanish bo'yicha kuchaytirish imkonini beradi, shuning uchun juda kam hollardagina ishlatilishi mumkin.

Tranzistorning statik xarakteristikalar

Tranzistorning statik xarakteristikalar kirish tokining kirish kuchlanishiga va chiqish tokining chiqish kuchlanishiga bog'liqligini ko'rsatadi.

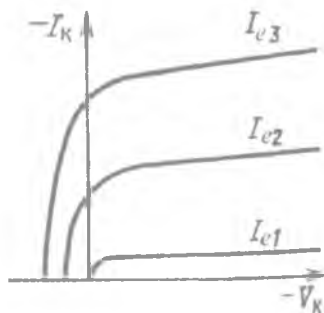


8.6-rasm. Tranzistor umumiy baza sxemasi bo'yicha ulanganda kirish statik xarakteristikasi

Emitter toki (I_e) ning emitter-baza orasidagi kuchlanishga (U_{eb}) bog'liqligini (kollektor-baza kuchlanishi o'zgarmas bo'lganda $U_{kb}=const$): $I_e=f(U_{eb})$, $U_{kb}=const$.

8.7-rasmdan ko'rinadiki, kirish xarakteristikasi $p-n$ o'tishning to'g'ri toki bilan bir xil. U_{kb} kuchlanish I_e tokiga kuchsiz ta'sir qiladi.

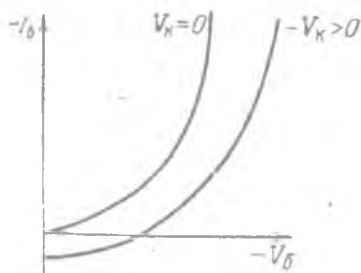
Tranzistorning chiqish tavsifi kollektor toki (I_k) ning kollektor-baza kuchlanishi (U_{kb}) ga bog'liqligi (emitter toki o'zgarmas bo'lganda $I_e=const$) (8.7-rasm).



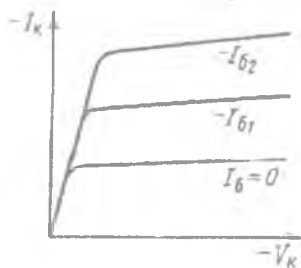
8.7-rasm. Tranzistor umumiy baza sxemasi bo'yicha ulanganda chiqish statik xarakteristikasi

Rasmdan ko'rinadiki, kollektor toki (I_k) U_{kb} ga juda kuchsiz bog'liq (tavsif qiyaligi juda kam) va asosan I_e tokiga bog'liq. Hatto $U_{kb}=0$ bo'lganda ham I_k katta qiymatga ega, chunki emitter o'tishidan o'tgan zaryad tashuvchilar kollektor o'tishiga yetib kelib, I_k ni hosil qiladi. $I_e=0$ bo'lganda tavsif koordinata boshidan boshlanadi va kichik qiymatga ega, ya'ni $p-n$ o'tishning teskari tokiga mos keladi. I_k ya U_{kb} kuchlanishini qutblarini o'zgartirilsa, ya'ni kollektor o'tishiga to'g'ri kuchlanish berilsa, I_k toki keskin nolgacha kamayadi.

Umumiy emitter sxemasi bo'yicha ulanganda kirish statik xarakteristikasi kollektor-emitter kuchlanishi o'zgarmas bo'lganda ($U_{ke}=const$). baza toki (I_b) ning baza-emitter kuchlanishi (U_{be}) ga bog'liqligini ifodalaydi.



8.8-rasm. Tranzistor umumiy emitter sxemasi bo'yicha ulanganda kirish statik xarakteristikasi



8.9-rasm. Tranzistor umumiy emitter sxemasi bo'yicha ulanganda chiqish statik xarakteristikasi ($I_k = f(U_{ke})$, $I_b = \text{const}$)

Umumiy emitter ulanishida kollektor o'tishiga berilgan kuchlanish ($U_{ke} - U_{be}$) ayirmaga teng, chunki bu kuchlanishlar kollektor-baza nuqtalari oralig'ida qarama-qarshi qutb bilan ulangan. Shuning uchun $|U_{ke}| < |U_{be}|$ bo'lsa, kollektor o'tishiga to'g'ri kuchlanish berilgan bo'ladi. Bunda chiqish tavsifining ortishi $U_{ke} = 0$ dan $|U_{ke}| = |U_{be}|$ gacha katta o'zgarish bo'ladi. $|U_{ke}| > |U_{be}|$ kuchlanishlarda ortish sekinlashib qoladi. Chiqish tokining qiymati asosan baza toki (I_b) ning qiymatiga bog'liq bo'ladi.

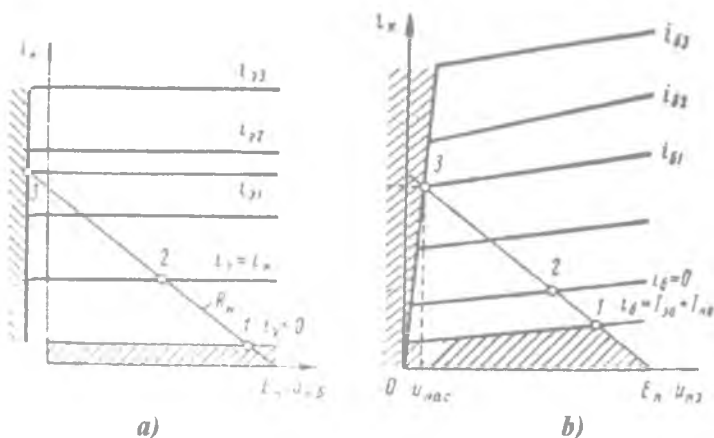
8.2. Tranzistorning dinamik holatda ishlashi

Tranzistorli kuchaytirgichlar amaliy sxemalarida tranzistorning chiqish zanjiriga kuchlanish manbai va yuklama qarshiligi (R_N) ulanadi, kirish zanjiriga esa kuchlanish manbai va kuchaytirilishi zarur bo'lgan signal manbai ulanadi.

Tranzistorning yuklama qarshiligi (R_N) bilan ishlashi **dinamik holatda ishlash** deyiladi.

Bu holatda tranzistor elektrodlarida kuchlanish va tokning qiymatlari uzluksiz o'zgarib turadi. Umumiy emitter sxemasi bo'yicha ulangan tranzistorning dinamik holatda ishlashini ko'ramiz. Bu sxemada E_K tok manbaining kuchlanishi kollektor-emitter va yuklama qarshiligi (R_N) ga taqsimlanadi:

$$U_{ke} = E_K - I_k R_N \quad (8.14)$$



8.10-rasm. Bipolyar tranzistorning statik tavsiflari:

a) umumiy baza, b) umumiy emitter

Tranzistorning kirishida kuchlanish o'zgarsa, emitter toki (I_e), baza toki (I_b) va kollektor toki (I_k) o'zgaradi. Bu esa yuklama

qarshiligi (R_N)da kuchlanish tushishi o'zgarishiga olib keladi. Natijada kollektor-emitterga tushayotgan kuchlanish o'zgaradi. Tranzistorning chiqish statik tavsiflari va AB (yuklama to'g'ri chizig'i) dinamik tavsifi (R_N – yuklama qarshiligiga mos kelgan) keltirilgan.

Statik tavsiflaridagi yuklama to'g'ri chizig'ining joylashishi mos ravishda tok manbaining kuchlanishi (E_K) bilan yuklama qarshiligi (R_N) dan aniqlanadi.

Yuklama to'g'ri chizig'ining B nuqtasi kollektorga berilgan kuchlanish E_K ga teng bo'lgan holatga mos keladi. Bunda kollektor toki nolga teng ($I_k=0$), u holda yuklama qarshiligidan tok o'tmaydi va kuchlanish tushishi nolga teng bo'ladi

$$U_{R_{yuk}} = I_k \cdot R_{yuk} = 0 \cdot R_{yuk} = 0 \quad (8.15)$$

Yuklama to'g'ri chizig'ining A nuqtasi kollektor tokining

$$I_k = \frac{E_K}{R_{yuk}} \quad (8.16)$$

qiymatga mos keladi, ya'ni tranzistor qisqa tutashuv qilinsa, kollektor toki (I_k) faqat yuklama qarshiligi (R_{yuk}) bilan cheklangan bo'ladi.

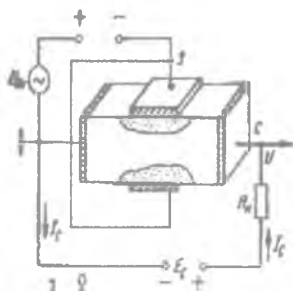
Yuklama to'g'ri chizig'ining A va B nuqtalaridan boshqa barcha nuqtalari kirish signali berilganda tranzistor zanjiridagi mumkin bo'lgan kuchlanish va tok qiymatlarini ifodalaydi. Har qanday baza toki (I_b) ga ma'lum qiymatdagi kollektor toki (I_k) va kollektor kuchlanishi (U_{ke}) mos keladi (8.10-rasm, b). Tashqi signal nol bo'lganda I_{be} tokka P – ishchi nuqta U_{ke} ishchi kuchlanish va I_k ishchi tokka mos keladi).

Kirish dinamik tavsifi dinamik holatda kirish tokining kirish kuchlanishiga bog'liqligini ifodalaydi. Kirish dinamik tavsifni chizish uchun har bir kollektor kuchlanishiga chiqish dinamik tavsifidan mos kelgan baza toklarini aniqlash kerak. So'ngra kirish statik tavsifida shu nuqtalarni belgilab (A', P', B'), nuqtalarni birlashtirsak kirish dinamik tavsifi hosil bo'ladi (punktir chiziq).

8.3. Maydonli tranzistorlari

Maydonli tranzistor deb, uch elektrodli yarimo'tkazgichli asbobga aytiladi.

Unda tok bo'ylama elektr maydoni ta'sirida asosiy zaryad tashuvchilar tomonidan hosil qilinadi, bu tokni boshqarish ko'ndalang elektr maydonni boshqaruvchi elektrodga berish orqali amalga oshiriladi.



8.11-rasm.p – n o'tishli maydonli tranzistorning sxemasi

Barcha maydonli tranzistorlar tuzilishi jihatidan ikki guruhga bo'linadi:

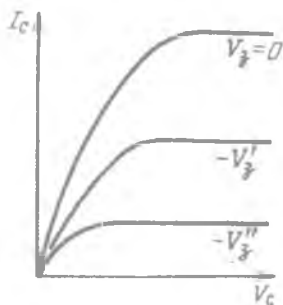
1) $p - n$ o'tishli maydonli tranzistorlar (kanalli yoki unipolyar tranzistorlar);

2) zatvori izolyatsiyalangan maydonli tranzistorlar (MDYa yoki MOYa-tranzistorlar).

$p-n$ o'tishli maydonli tranzistor

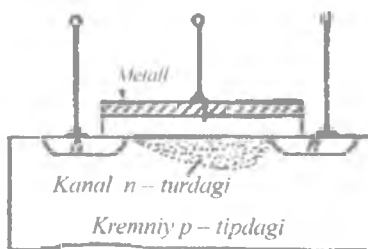
Ikki tomondan $p - n$ o'tish bilan chegaralangan tor $n -$ sohaga kanal deyiladi. Kanalni elektr zanjirga ulash ikki tomondagi omik elektrodlar orqali amalga oshiriladi. Bu elektrodlardan bittasi istok (U), ikkinchisi stok (S) deyiladi. $p -$ soha elektроди boshqaruvchi elektrod bo'lib, zatvor (Z) deyiladi.

Kanaldan oqayotgan tokning kattaligi istok-stok oralig'iga berilgan kuchlanish (U_S) qiymatining kattaligiga, yuklama qarshiligi (R_{yuk}) ga va yarimo'tkazgich plastinkasining istok-stok oralig'idagi qarshiligiga bog'liq. $U_S=const$ va $R_{yuk}=const$, ya'ni o'zgarmas bo'lganda kanaldan oqayotgan tok (I_S)ning kattaligi kanalning ko'ndalang kesim yuzasiga bog'liq bo'ladi. E_{ZU} manbaining manfiy qutbi zatvorga ulangan, shuning uchun $p - n$ o'tish hajmiy zaryad sohasi kengayadi. Natijada tok o'tadigan kanalning ko'ndalang kesim yuzasi kamayadi. Kanal ko'ndalang kesim yuzasining kamayishi kanal qarshiligining ortishiga va kanaldan oqayotgan tok I_S (stok toki) ning kamayishiga olib keladi. Zatvorda kuchlanish kamaysa, kanal qarshiligi kamayadi va stok toki (I_S) ortadi. E_{ZU} manbada ketma-ket kuchaytirilishi kerak bo'lgan signal manbai U_{kirish} ulansa, U_{kirish} signalining o'zgarishiga mos ravishda kanaldan oqayotgan stok toki (I_S) o'zgaradi. Stok toki (I_S) yuklama qarshiligi (R_{yuk}) dan o'tayotganda kuchlanish tushishi U_{chiq} yuzaga keladi, bu kuchlanish kirish signalining (U_{kirish}) o'zgarishiga mos ravishda o'zgaradi.



8.12-rasm. $p - n$ o'tishli maydonli tranzistorning chiqish Volt – Amper tavsifi (VAT)

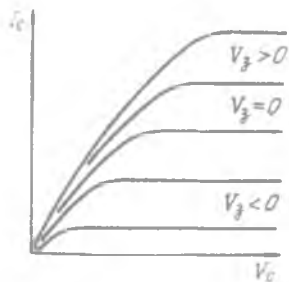
Zatvori izolyatsiyalangan maydonli transistorning strukturasi: metall-diektik (oksid) – yarimo'tkazgich (MDYa yoki MOYa – tranzistor) dan iborat bo'lib, uning konstruksiyasi quyidagi 8.13-rasmda ko'rsatilgan.



8.13-rasm. Zatvori izolyatsiyalangan maydonli transistor

Tranzistorning asosi p – turdagi monokristall kremniy plastinkasi bo‘lib, istok va stok sohalari plastinkaning kuchli legirlangan n – turdagi qismlaridir. Istok bilan stok oralig‘i 1 mkm bo‘ladi. Bu oraliq tor, ensiz va qarshiligi katta n – turli kanaldir. Zatvor kanalning qalinligi $0,1\text{ mkm}$ bo‘lgan dielektrik (oksid – SiO_2) qatlam bilan izolyatsiyalangan metall plastinkada bo‘ladi.

Istokka nisbatan zatvorga berilgan kuchlanishning ishorasiga qarab (“+” yoki “-”), kanalda elektronlar ko‘payishi yoki kamayishi mumkin. Zatvorga manfiy (“-”) kuchlanish berilganda kanaldagi elektronlar yarimo‘tkazgich (ichkarisiga) hajmiga tomon siqib chiqariladi. Bunda kanalda elektronlar kamayib ketadi va kanaldan oqadigan tok kamayadi. Zatvorga musbat (“+”) kuchlanish berilganda yarimo‘tkazgich hajmidan elektronlar kanal sohasiga tortiladi va kanaldan oqadigan tok ortadi.



8.14-rasm. MDYa maydonli tranzistorning chiqish Volt – Amper tavsifi (VAT)

Zatvor-istok orasidagi kuchlanish $U_{ZI}=0$ bo'lganda, istok-stok orasidagi kuchlanish (U_S) ortishi bilan I_S toki ortadi. $I_S=f(U_S)$ bog'liqlikda dastlab I_S tok chiziqli ortadi. Stok toki (I_S) ortishi bilan kanalga kuchlanish tushishi ortadi, $p-n$ o'tishdagi teskari kuchlanish (ayniqsa stok yaqinida) ortadi, bu kanal ko'ndalang kesim yuzasi kamayishiga olib keladi va stok toki (I_S) ortishi sekinlashadi. Istok-stok kuchlanishi (U_S) ning ma'lum bir qiymatidan boshlab, stok toki (I_S) o'zgarmasdan qoladi va to'yinish holatiga chiqadi.

Stok toki to'yinish (o'zgarmas)ga chiqadigan U_S kuchlanish to'yinish kuchlanishi ($U_{S\text{to'yin}}$) deyiladi.

Stok tokining (I_S) zatvor-istok kuchlanishi (U_{ZI}) ga bog'liqligi $I_S=f(U_{ZI}), U_S=\text{const}$ (o'zgarmas) bo'lganda, tavsif – stoko-zatvor tavsifi deyiladi.

Zatvori izolyatsiyalangan maydonli tranzistorning chiqish VATlari $p-n$ o'tish maydonli tranzistorlarinikiga o'xshash ko'rinishga ega, farqi faqat $p-n$ o'tish maydonli tranzistor kanali torayish holatida ishlaydi, MDYa (yoki MOP) tranzistorlar kanali qarshiligini kamayishi (zatvorga musbat kuchlanish berilganda, elektronlar kanali boyidi) va kanal qarshiligining ortishi (zatvorga manfiy kuchlanish berilganda, elektronlar kanali kamayadi) holatlarida ishlaydi. Shuning uchun stoko-zatvor tavsifi [$I_S=f(U_{ZI}), U_S=\text{const}$] zatvor-istok kuchlanishi (U_{ZI})ning musbat qiymatlarida ham mavjud bo'ladi.



8.15-rasm. MDYa maydonli tranzistori to'yinish tokining boyitish rejimida zatvor kuchlanishiga bog'liqligi

8.4. Maydonli tranzistorlarning asosiy parametrlari

Tavsifning egriligi

$$S = \frac{\Delta I_S}{\Delta U_{ZI}}, \quad U_S = \text{const} \quad (8.17)$$

Bu parametr zatvorning boshqarish samaradorligini ifodalaydi.
 U_{ZUots} – kuchlanishi kanal to‘liq yopiladigan kuchlanish.

Zatvor-istok orasidagi kirish qarshiligi (R_{kirish}) (zatvor-istok elektrodleri orasidagi mumkin bo‘lgan eng katta kuchlanishda):

$$R_{kirish} = \frac{\Delta U_{ZI\max}}{\Delta I_{Z\max}} \quad (8.18)$$

Chiqish qarshiligi ($R_{chiqish}$) (to‘yinish holatida):

$$R_{chiqish} = \frac{\Delta U_S}{\Delta I_S}, \quad U_{ZU} = \text{const} \quad (8.19)$$

Maydonli tranzistorlarning afzalliklari:

1. Katta kirish qarshiligiga ega ($p - n$ o‘tishli maydonli tranzistorlarda $10^6 - 10^9 \text{Om}$ zatvori izolyatsiyalangan maydonli tranzistorlarda $10^{13} - 10^{15} \text{Om}$) bo‘ladi;

2. Xususiy shovqin juda kam. Tok hosil qilishda faqat bitta turdagi zaryad tashuvchi ishtirok etadi, shuning uchun rekombinatsiya bo‘lmaydi, rekombinatsiya shovqini yo‘q;

3. Harorat va radiatsiya ta‘siriga chidamli;

4. Integral sxemalarda juda katta zichlikda tranzistorlar hosil qilinadi (integratsiya darajasi yuqori).

Sinov savollari:

1. Tranzistorlarning turlari
2. Bipolyar tranzistorlarning turlari
3. Bipolyar tranzistorlarning ishlash asosi

4. Bipolyar tranzistorlarning ulash: umumiy baza, umumiy emitter, umumiy kollektor
5. Maydonli tranzistorlarning turlari
6. $p - n$ o'tish maydonli tranzistorning tuzilishi
7. $p - n$ o'tish maydonli tranzistorning ishlash asosi
8. Zatvorli izolyatsiyalangan maydonli tranzistorning tuzilishi
9. MDP – tranzistorning tuzilishi
10. Bipolyar tranzistorlarning kirish va chiqish statik xarakteristikalari
11. Maydonli tranzistorlarning kirish va chiqish statik xarakteristikalari
12. Bipolyar tranzistorlarning asosiy parametrlari
13. Maydonli tranzistorlarning asosiy parametrlari

9. MIKROELEKTRONIKANING RIVOJLANISHIDA TEKNOLOGIYANING O'RNI

Yarimo'tkazgichli asboblarni ishlab chiqarish texnologiyasi rivojlanishi natijasida integral sxema (IS)lar yaratildi. Integral sxemalarni ishlab chiqarish 1959-yillarda taklif etilgan planar texnologiya asosida boshlandi

Planar texnologiyani yaratishga asos bo'lib, quyidagi bir qancha fundamental texnologik usullar xizmat qildi:

– 1957-yilda kremniyga donor va akseptorli kirishmalarni lokal diffuziya qilish (kiritish) uchun kremniy yuzasida termik o'stirilgan SiO_2 qatlamidan *niqob* sifatida foydalanish mumkinligi ko'rsatib berildi;

– 1958-yilda lokal diffuziya qilib, kichik o'lchamli va murakkab shakldagi *p-n* o'tishlar hosil qilish imkonini beruvchi fotolitografiya (FL) usuli yaratildi;

– 1959-yilda *p-n* – o'tish sohaslarini atrof-muhit ta'siridan himoyalashda SiO_2 qatlamidan foydalanish usuli yaratildi.

Integral sxemalarni tayyorlashda bajariladigan asosiy texnologik jarayonlar:

1. Kremniy quymasidan plastinka qirg'ish, mexanik ishlov berish.
2. Kimyoviy ishlov berish bilan plastinka sirtini tozalash.
3. Oksidlash yo'li bilan kremniy plastinka sirtida SiO_2 qatlam hosil qilish, bu qatlam lokal diffuziyalash jarayonida kirishmadan himoya vazifasini bajaradi.

4. Kremniy yoki boshqa material (masalan, sapfir Al_2O_3) plastinka yuzasida kremniy epitaksial qatlamini o'stirish.

5. Kremniy plastinkasida diffuziya va ionli legirlash usullari bilan kirishma kiritilgan sohalarni hosil qilish.

6. Plastinka ishchi yuzasiga metall qatlamlari hosil qilish bilan omik tutashuv, elementlarni o'zaro ulash yo'lchalarini yaratish.

7. Lokal diffuziyaga SiO_2 qatlamida darcha ochish va elementlarni o'zaro ulash yo'lchalarini yaratish uchun fotolitografiya jarayonini bajarish.

8. Bitta plastinkada yaratilgan integral sxemalarning parametrlarini tekshirish va yaroqlilarini saralash.

9. Plastinkani kristallarga bo'lish va yaroqli integral sxemalarni korpuslarga joylashtirish.

10. Mexanik mustahkamligini, harorat o'zgarishiga va namlikka chidamliligini texnologik sinash.

11. Integral sxemalarning parametrlarini yakuniy tekshirish.

Katta va o'ta katta (KIS va O'KIS) integral sxemalarda elementlarning soni 10^4 – 10^6 tagacha bo'lib, ularni tayyorlash uchun izoplanar texnologiya yaratildi. Bu texnologiya yuqoridagi jarayonlarga qo'shimcha ravishda kremniy plastinka yuzasida kimyoviy yemirish yo'li bilan sirt relyefli shakl hosil qiladi. Nitrid kremniy qatlami o'stiriladi. Fotolitografiya o'rniga rentgen nurlari litografiyasi va elektron nurli litografiya usullari qo'llaniladi. Lokal yemirish uchun ion plazmali yemirish usullaridan foydalanish elementlar o'lchamini kichraytirish imkonini beradi.

Planar texnologiyauning muhim jihati uning universalligidadir. Texnologik jarayon uchta takrorlanib turuvchi operatsiyalar: kimyoviy ishlov berish, termik ishlov berish va fotolitografiyalardan iborat bo'ladi.

Integral sxemalarning afzalliklari:

- Integral sxemalarning o'lchamlari kichikligi va massasining kamligi tufayli EHM lar yaratish va aloqa tizimlarida (tezkorligi tufayli) keng qo'llaniladi;

- Tannarxining arzonligi va ekspluatatsion xarakteristikalarining yaxshiligi tufayli integral sxemalar o'ta murakkab sxemalarning sifatini oshirish imkonini beradi.

Integral sxemalarning kamchiliklari:

- Yuqori chastotalarda integral sxema xarakteristikalari yomonlashadi;

- Passiv elementlar harorat koeffitsiyentlari ancha katta qiymatlarga ega;

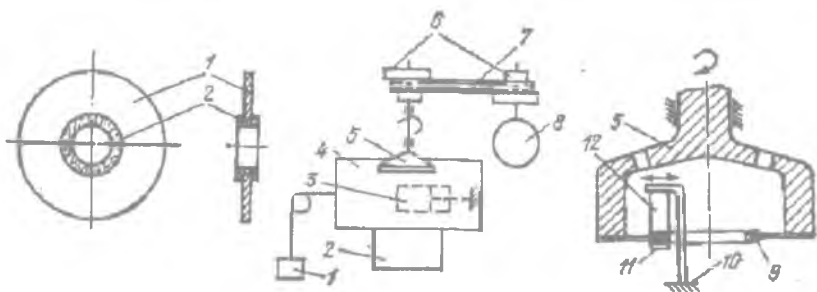
- Rezitsorlar qarshiligi 10-50 kOm, kondensatorlar sig'imi esa 200 pF dan kam;

- Induktiv g'altaklarni integral sxemalarda yaratish juda murakkab.

9.1. Kremniy tagligiga mexanik ishlov berish

Integral sxemalar asosan kremniy monokristallidan tayyorlanadi, bunga sabab nisbatan sodda usul bilan hosil qilinadigan SiO_2 qatlam yuqori sifatlidir. Katta diametrli Si monokristallini olish texnologiyasi ancha arzon va yaxshi o'zlashtirilgan.

Kremniy monokristall quymasidan qirqib olingan ma'lum mexanik va kimyoviy ishlov berilgan plastinka **integral sxema tagligi** deyiladi.



9.1-rasm. Kremniyga mexanik ishlov berish

Kremniy quymasidan plastinka qirqish uchun olmos kukuni surilgan metall disklardan foydalaniladi. Disk qalinligi 0.1-0.15 mmni tashkil etadi.

Qirquvchi uskunadagi kremniy quymasi ushlagichining siljish tezligi 20-30 mm/min ni tashkil qiladi. Qirqilgan plastinka sirtida abraziv material (poroshok) ta'siri tufayli monokristall struktura buzilgan qatlam yuzaga keladi, bu qatlam qalinligi 10-30 mkm bo'lib, 7-8 sinf tozalikka to'g'ri keladi. Integral sxema hosil qilish uchun plastinka sirtidagi notekislik 0,02-0,1 mkm dan oshmasligi kerak. Bu 14-sinf tozaligidan ham yuqori tozalikdir. Bunday tekislikka erishish uchun plastinkalar mikrokukunlar yordamida maxsus yuqori aniqlikdagi qurilmada jilvirlanadi, (shlifovka), so'ngra sayqallanadi (polirovka). M14-M15 markali mikrokukun yordamida jilvirlanganda

shishali shlifovalnik (jilviratgich) ishlatiladi. Olmos pastasi yordamida sayqallash sirti lattali bo'ladi.

Plastinkaning ikki tomoni jilvirlanadi. Sayqallash faqat integral sxema hosil qilinadigan yuzada bajariladi. M14-mikrokukunda kukunlar o'lchami 14-10 mkm, M10-mikrokukunda esa 10-7 mkm ga teng bo'ladi. ASM-3/2- sintetik olmos kukuni, 3/2 - kukunlarining o'lchami, yiriklari 3 mkm, maydalari 2 mkm ga teng bo'ladi.

9.1-jadval

Plastinka sirtining tozalik sinfi

Mikrokukun	Buzilgan qatlam qalinligi, mkm	Plastinka sirtining tozalik sinfi
M14	20-30	7
M10	15-25	8-9
ASM 3/2	9-11	12-13
ASM 1/0.5	5-7	13
ASM 0.5/0.3	3-dan kichik	13-14
ASM 0.3/0.1	1-dan kichik	14

9.2. Kremniy sirtini tozalash

Jilvirlash va sayqallashdan so'ngra plastinka sirti mikrokukun qoldiqlari va texnik dog'lardan tozalanadi.

Buning uchun eritgichlarda va kislotalarda kimyoviy tozalanadi. Ikkinchi usul fizikaviy tozalash usuli, unda kremniy molekulalari bilan bog'langan kirishma molekulalariga qizdirish yoki ionli bombardirovka yordamida katta energiya berib, uchirib yuboriladi. Ultratovushli uskuna yordamida kukun qoldiqlari uchxloretilen, toluol, to'rtxlorli uglerod eritgichlardan foydalanib tozalanadi.

Organik moddalarni molekulalaridan tozalash uchun sulfat kislota (H_2SO_4) da qaynatiladi.

Metall atomlaridan tozalashda HCl va HNO_3 da qaynatiladi va HF da yuviladi. Hamma vaqt texnologiyani eng oxirida ionlardan tozalangan (deionli) suvda yuviladi. Plastinka sirtining tozaligini tekshirish usullaridan biri sayqallangan sirtini mikroskopda kuzatish.

Yorug'lik nuri plastinka sirtlariga juda kichik burchak ostida tushadi. Toza joylar qorong'i bo'lib, iflos joylardan sochilgan nur mikroskopga tushadi va yorug' bo'lib ko'rinadi.

Boshqa usul: plastinka sirti ho'llanganda agar yog'lar bo'lsa, suv bir tekis qatlam hosil qilmaydi. balki bir qancha bo'laklarga ajralib ketadi.

Deionlashgan suv olish texnologiyasi

Plastinkani tozalash jarayonida har xil suvlar ishlatiladi:

- **distillangan suv**, solishtirma qarshiligi $\rho=200$ kOm-sm. Vodoprovod suvini bug'latib va qayta sovutib olinadi;
- **bidistillangan suv**, solishtirma qarshiligi $\rho=500$ kOm-sm. Distillangan suvni bug'latib qayta sovutib olinadi.

Ionlardan tozalangan (deionli) suv solishtirma qarshiligi $\rho=20$ mOm-sm ga teng bo'ladi. Distillangan suvni ion almashuvchi smolalardan o'tkazish orqali olinadi. Bu smolalar ikki xil bo'lib, 1 – kationlar (metall ionlarni yutadi), 2 – anionlar (kislota qoldiqlaridagi ionlarini yutadi).

Kationlarning kimyoviy formulasi : $R-H$; anionlarniki: $R-OH$.

Misol: $FeCl_3$ dan tozalash quyidagicha hosil bo'ladi:



(1) dagi Fe^{3+} ioni R bilan bog'lanib qoladi va H^+ ioni hosil bo'ladi.

(2) dagi Cl^- ioni R bilan bog'lanib qoladi va OH^- ioni hosil bo'ladi.

H^+ va OH^- ionlari bog'lanib, suv hosil bo'ladi.

"V" markali ionlardan tozalangan suv tabiiy vodoprovod suvini distillab, so'ngra ionlardan tozalab olinadi. Solishtirma qarshiligi $T=20^\circ C$ da 1 MOm-sm bo'ladi.

“B” markali ionlardan tozalangan suv “V” markali deionlashgan suvdan qayta deionlashtirilib, so’ngra g’ovakliklari o’lchami 10 mkm bo’lgan inert filtrlovchi materialdan o’tkazib, erimagan zarralardan tozalab olinadi. Solishtirma qarshiligi 10 MOM·sm ni tashkil etadi.

“A” markali ionlardan tozalangan suv “B” markali deionlashgan suvdan g’ovaklar o’lchami 0,5 mkm bo’lgan maxsus filtrlovchi materiallarda filtrlanib olinadi. Bunda solishtirma qarshiligi 20 MOM·sm ga teng bo’ladi.

9.3. Abraziv materiallar

“Abraziv” so’zi lotinchadan olingan bo’lib, “skoblit”, “parchalash” degan ma’noni bildiradi. Abraziv materiallarning asosiy xossasi ularning qattiqligidir. Eng qattiq material olmos bo’lib, Moss shkalasi bo’yicha 10-sinf, korund 9-sinf, topaz 8-sinf, kvarts 7-sinf ga to’g’ri keladi.

Materiallarning abrazivlik qobiliyati abraziv material yordamida ishlov berilayotgan material sirtidan birlik vaqtda qirib olingan miqdori bilan baxolanadi. Agar olmosning abrazivlik qobiliyati 1 ga teng deb olinsa, u holda bor karbidiniki 0.6; kremniy karbidiniki 0.5; monokorundniki 0.25; elektrokorundniki 0.15 ga teng bo’ladi.

Yarimo’tkazgichli asboblari va integral sxemalarni ishlab chiqarishda quyidagi abraziv materiallar ishlatiladi:

- Olmos – sanoatda grafitdan yuqori bosim va haroratda hosil qilingan su’niy olmos ishlatiladi.

- Karbid kremniy – kremniyning uglerod bilan kimyoviy birikmasi. Karbid kremniyning rangi kimyoviy tozalash darajasiga qarab, yashildan qora ranggacha o’zgarishi mumkin. Kimyoviy tozasi rangsiz, yashildan qora ranggacha bo’ladi. Qora rangligini mustahkamligi kam bo’ladi.

- Karbid bor – borning uglerod bilan kimyoviy birikmasi.

- Elektrokorund – kristall alyuminiy oksidi (Al_2O_3) oq modda. Sanoatda uch xil elektrokorund ishlab chiqariladi:

- ❖ Oq – 98,5-99,5% Al_2O_3 bor;

- ❖ Normal elektrokorund – 91- 96 % Al_2O_3 bor;

❖ Qora elektrokorund – 65-75 % Al_2O_3 bor.

- Xrom oksidi – yashil rangli kukun (poroshok).
- Aerosil - g'ovak ko'kimtir - oq kukun, toza kremniy ikki oksidi.

Ularning quyidagi markalari ishlab chiqariladi A-175, A-300, A-380, zarralarining o'rtacha o'lchami mos ravishda 10-40, 5-20, 5-15 mkm bo'ladi.

Yarimo'tkazgichli plastinkalardan kristall qirqish

Yarimo'tkazgich plastinkalardan kristall qirqish usullari:

- olmosli disk yordamida qirqish;
- metall simlar bilan abraziv material yordamida qirqish;
- ultratovush qurilmasida qirqish;
- olmos bilan chizib, so'ngra sindirish;
- elektron-nur dastasi bilan chizib, so'ngra sindirish;
- lazer nurida chizib, so'ngra sindirish.

Olmos disk yordamida qirqish. Bu usul bilan plastinkani qirqishda ishlab chiqarish unumdorligini oshirish uchun bir qancha disklarni birlashtirib, plastinkalardan kristallar qirqiladi. Disklar orasidagi prokladka qalinligi kristall o'lchamini beradi. Kristall geometrik o'lchamlari orasidagi farq 0,03 mmdan oshmaydi.

Sim yordamida abraziv material bilan qirqish usuli plastinkadan kvadrat va to'rtburchak shaklidagi kristallar qirqish uchun qo'llaniladi. Bu usul ikki xil ko'rinishga ega.

Birinchi holda sim maxsus vilkaga o'rnatilgan rolikka o'raladi. Vilka krivoship – shatun mexanizmi yordamida oldinga va orqaga harakatlanadi. Bunda sim ham oldinga va orqaga vilka bilan birgalikda harakatlanadi va sekin rolikka o'ralib boradi. Simni o'rashdan maqsad butun ishchi uzunligi bo'yicha sim bir xil yedirilishidir. Kesuvchi modda ishchi yuzaga uzluksiz yuborib turiladigan abraziv kukunning suv bilan qorishmasidir. Sim esa abraziv kukunni kesiluvchi sirtida harakatga keltirishga xizmat qiladi. Abraziv zarralar sim ta'sirida harakatlanib, bir tomoni bilan simni yediradi, ikkinchi tomoni bilan plastinka sirtini o'yadi. Simning harakat tezligi 200-600 harakat/min ni tashkil etadi.

Sim yordamida qirqish ma'lum afzalliklarga ega. Qirqilayotgan plastinka kichik tezlik bilan simga yaqinlashtirsa, uning sirtida buzilishlar kam sodir bo'ladi. Bu suv sirtida *Au*, *Al*, *Ni*, *Cu* va boshqa moddalarning qatlami bo'lgan plastinkani qirqishda yupqa qatlami ko'chib ketmaydi. Simni almashtirish ko'p vaqt talab qilmaydi. Bu usul bilan qirqilgan kristallarning eng kichik o'lchami 0,5 x 0,5 mmni tashkil etadi.

Yarimo'tkazgich plastinkalarni qirqish uchun volfram, po'lat, nikel, nixrom va MV-50 qotishmasi simlaridan foydalaniladi. Sim diametri 0.05-0,15 mm bo'lib, qirqiluvchi soha kengligi mos ravishda 0,08-0,2 mm bo'ladi.

Bu usulning asosiy afzalligi: qirqiluvchi sohaning torligi, kristall qirralarining sinmasligi.

Ultratovush qurilmasida plastinkalardan kristall qirqish. Bu usuldan dumaloq yoki murakkab shakldagi kristallarni qirqishda foydalaniladi. Qirqish jarayoni quyidagicha: ultratovush tebranishli generatoridan 15-70 kGts chastotali tok tebragichning elektr simiga beriladi. O'zgartirgich tokni mexanik tebranishga aylantiradi va tebranish qirquvchi moslamaga uzatiladi. Qirquvchi moslama plastinka sirtiga tegib turgan sohaga uzluksiz abraziv qorishma berib turadi. Abraziv zarralari ultratovush tebranishi ta'sirida harakatga kelib plastinkaning qirquvchi moslama tegib turgan qismini qirqadi. Qirquvchi uskuna shakli qirqiladigan kristall shakliga o'xshash bo'ladi.

Olmos bilan chizib sindirish usuli plastinkadan kvadrat va to'rtburchak shaklidagi kristallarni qirqishda ishlatiladi. Yarimo'tkazgich plastinka yuzasiga olmos yordamida ikkita o'zaro perpendikulyar yo'nalishda chiziq chiziladi. Chiziq chuqurligi 5-10 mkm. kengligi 20-40 mkmni tashkil etadi. Plastinka yuzasida chiziq atrofida lokal sohada materialni kuchsizlantiruvchi mexanik kuchlanishlar yuzaga keladi.

Plastinkani egganda chizilgan joylaridan sinadi. Bu usulning afzalligi materialni qirqish jarayonida isrof bo'lmaydi. Chizishda eng kichik qadam 0,5 mm ga teng bo'ladi. Qirquvchi qismidagi olmosning geometrik shakliga qarab, uch turga bo'linadi: uch tomonli piramida; to'rt tomonli piramida; to'rt tomonli qirqilgan piramida.

Elektron – nur bilan qirqish. Bunda elektron – nur dastasi plastinka sirtida ma'lum qadam bilan x va y o'q bo'yicha harakatlanadi. Elektron – nur tushgan mikrosohalar eriydi. Erish va qotish qisqa vaqtda bo'lib, shu sohalarida issiqlik ta'sirida mexanik kuchlanishlar yuzaga keladi. Plastinka egilsa shu sohalarida sinadi. Ma'lum sharoitda (plastinka qalinligi, elektron nur diametri, qurilma quvvati va boshqalarga qarab) elektron – nur usuli bilan plastinka to'liq qirqilishi mumkin. Bunda nur tushgan sohalarida plastinka materiali erib bug'lanib ketadi.

Lazer nuri bilan chizish usuli zamonaviy elektronikada ko'proq qo'llanilmoqda. Bu usulda ham elektron – nur bilan chizish usulidagi kabi juda kichik soha bug'latiladi. Bu usul yordamida plastinkaning yuzasida har qanday qatlam bo'lganda ham istalgan chuqurlikkacha va to'liq qirqish mumkin.

Chiziq o'lchamlari (eni va chuqurligi), lazer nuri ta'sir qiladigan soha, chizish tezligi, plastinka materialining butun chiziq uzunligi bo'yicha bir tekis yedirilishi plastinkaning lazer nuriga nisbatan harakatlanish tezligi, lazerning quvvati, lazer nuri impulsining chastotasi va davomiyligi fokuslangan nur o'lchamiga bog'liq bo'ladi.

Plastinkaning chizilgandan so'ng sindirish. Plastinkaning kristallga bo'lishda chizilgandan so'ng sindirish juda muhim jarayon hisoblanadi. Noto'g'ri sindirish, hatto yaxshi chizilgan plastinkalardan ham juda ko'p yaroqsiz kristall chiqishiga sabab bo'lib, kristalning qirralarini notekis, geometrik shaklini buzilishga olib keladi. Plastinka yuzasida chiziq chizib sindirish chizuvchi kuchlanish hosil qilishga asoslangan bo'lib, bunda chiziq bo'yicha yoriq paydo bo'ladi. Plastinkalar turli xil usullar bilan sindiriladi. Shulardan ko'p qo'llaniladigan uchta usulni ko'ramiz:

- **Birinchi usulda** plastinkani yumshoq taglikka (rezina, paralon va boshqalar) chiziqni pastga qaratib qo'yiladi va plastinka ustidan rezinali valik ikki o'zaro perpendikulyar yo'nalishda yurg'iziladi. Valik o'q chiziqlari katta aniqlikda parallel yo'nalgan bo'lishi kerak, aks holda plastinka chiziqlardan sinmasdan har xil tomonlarga sinishi mumkin. Valikni birinchi yurgizganda plastinka uzun bo'laklarga bo'linadi, ikkinchi marta perpendikulyar yurgizilganda uzun bo'laklar kvadrat va to'rtburchaklarga bo'linadi. Sindirish jarayonida uzun

bo'laklar va kristallar siljib ketmasligi uchun avval plastinka qog'ozga yoki polietilen qatlamiga kleylanadi.

- *Ikkinchi usul* mexanizatsiyalashtirilgan usuldir. Plastinka kleylagandan so'ng ma'lum egrilik radiusiga ega bo'lgan harakatlanayotgan ikkita lenta orasidan o'tkaziladi. Plastinka lentaning egri qismidan o'tayotganda chizilgan joylardan bo'laklarga bo'linadi.

- *Uchinchi usulda* chizilgan plastinka sferik sirtga ega bo'lgan linza sirtiga jipslashtiriladi. Natijada plastinka bir vaqtda ikki yo'nalishda sinadi. Qurilma sferik linza va rezinali membranadan iborat bo'ladi. Plastinka chiziqlari pastga qaratib, membrana ustiga qo'yiladi. Plastinka ustidan sferik linza qo'yiladi. Membranaga havoning ma'lum bosimi berilganda plastinka sferik linzaga jipslashadi va bo'laklarga bo'linadi. Bu usulning afzalligi – oddiyligi, avtomatlashtirish mumkinligi, unumdorligidadir. Bu usul bilan plastinkani faqat kvadrat shakldagi kristallarga bo'laklash mumkin. Har xil o'lchamdagi kvadrat kristallar uchun alohida har xil egrilik radiusidagi sferik linzalar ishlatiladi.

Sindirish sifati uchchala usulda ham egish kuchlanishiga bog'liq. Sindirish uchun zarur bo'lgan egish kuchlanishi quyidagi ifoda bilan aniqlanishi mumkin.

$$H = \frac{mh^2}{bl^2} = \frac{m}{b} \left[\frac{h}{l} \right]^2 \quad (9.1)$$

Bunda, m – egilish momenti, h – chizilganda hosil bo'lgan chuqurlik, b – kristall uzunligi, l – kristall qalinligi, $\left[\frac{h}{l} \right]$ – sinish imkoniyati kattaligi deyiladi.

9.4. Yarimo'tkazgichli plastinkani jilvirlash

Yarimo'tkazgich quymadan qirqib olingan plastinkada bir qancha quyidagi nuqsonlar mavjud bo'ladi:

- mexanik buzilgan qatlam;
- tomonlari tekis va parallel emasligi;

– egri va qalinligi turli nuqtalarda har xil bo‘lishi;

Bu nuqsonlarni yo‘qotish uchun plastinkalar jilvirlanadi. Bunda yaxshi natijaga erishish uchun jilvirlashga quyidagi talablar qo‘yiladi:

– jilvirlashni toza, changsiz xonada amalga oshirish kerak;

– jilvirlovchi qurilmalar har xil abraziv materiallar uchun alohida bo‘lishi kerak;

– barcha abraziv materiallar alohida germetik skafandrlarda saqlanishi kerak.

Jilvirlashda qo‘llaniladigan disklar cho‘yan, shisha, po‘lat, mis yoki latundan tayyorlangan bo‘ladi.

Jilvirlash uchun ishlatiladigan mikrokukunning o‘lchami 14÷5 mkm (markasi M14 dan M5) gacha bo‘ladi. Jilvirlash yordamida 9-12 – sinf tozalikka erishish mumkin. Jilvirlash jarayoni texnologik, konstruktiv va abraziv material turiga qarab sinflanadi. Ular quyidagilar:

–*texnologiyasiga qarab*: oraliq va yakuniy jilvirlash;

–*konstruktiv belgisiga qarab*: bir tomoni va ikki tomonini jilvirlash;

– *qo‘llanayotgan abraziv materialga qarab*: erkin va bog‘langan abrazivda jilvirlash.

Oraliq jilvirlashdan maqsad – plastinka sirtini tezroq tekislash. Bu jarayon holatlarida jilvirlovchi diskning aylanish tezligi va bosimi kattaroq bo‘ladi. Abraziv mikrokukunning zarralari kattarog‘idan (M14, M10) foydalaniladi.

Yakuniy jilvirlash – jilvirlash diskining aylanish tezligi va bosimi kichikroq bo‘ladi, mikrokukunning zarralari maydasidan (M7, M5) foydalaniladi. Maqsad – plastinkaning geometrik parametrlarini yaxshilash va sirtining tekislik sifatini oshirish.

Bir tomonini jilvirlash – plastinkaning bir tomoni maxsus moslamaga yopishtiriladi. Ikkinchi tomoni jilvirlovchi disk bilan mikrokukun qorishmasi yordamida jilvirlanadi.

Ikki tomoni jilvirlash – ikkita jilvirlovchi diskka ega bo‘lgan qurilmada amalga oshiriladi. Yarimo‘tkazgich plastinka separatorga joylashtirilib, ikkita jilvirlovchi disk o‘rtasiga o‘rnatiladi. Pastki jilvirlovchi disk odatda qo‘zgalmas bo‘ladi, yuqorisidagisi esa aylanadi. Plastinka jilvirlovchi disk aylanishi, separator

aylanishlarining natijasida murakkab aylanma harakat qiladi. Abraziv qorishma yuqoridagi jilvirlovchi diskka beriladi va plastinkaning hamma tomonini qoplab oladi. Jilvirlangan sirt juda ko'p chiziqlardan iborat bo'ladi. Chiziqlar chuqurligi abraziv material zarralarining o'lchamiga, jilvirlovchi disk bosimiga va jilvirlash tezligiga bog'liq bo'ladi. Jilvirlash plastinkaning bir tomonini va ikki tomonini jilvirlovchi qurilmada abraziv material qorishmasi yoki pasta yordamida amalga oshiriladi. Jarayonda abraziv material zarralari biri-biri bilan bog'lanmagan, *erkin holatda* harakatlanadi.

Bog'langan abraziv materialida jilvirlash sirtida olmos kukuni yopishtirilgan jilvirlovchi metall diskli qurilma yordamida amalga oshiriladi. Yarimo'tkazgich plastinka maxsus moslamaga bir tomoni bilan yopishtiriladi va shu moslama bilan birga aylanma harakat qiladi. Jilvirlovchi disk 15000 – 18000 ayl/ min tezlik bilan aylanib, plastinka sirti bilan jipslashadi. Olmos kukunlari plastinka sirtini qirib, o'zaro kesuvchi juda ko'p chiziqlardan iborat setkasimon shakl hosil qiladi. Bunday jilvirlashda juda ko'p issiqlik ajralib chiqadi. Jilvirlovchi disk va plastinka qizib ketmasligi uchun suv bilan sovutib turiladi. Agar jilvirlovchi disk aylanish tezligi kamaytirilsa, sirt jilvirlanish sifati yomonlashadi.

Yarimo'tkazgich plastinkalarni sayqallash

Yarimo'tkazgich plastinka sirtiga ishlov berish sifatini oshirish va mexanik buzilgan sirt chuqurligini kamaytirish uchun sayqallash amalga oshiriladi. Sayqallash yumshoq sayqallagichda bajariladi. Yumshoq sayqallagichda qattiq disk ustiga yumshoq material qoplangan bo'ladi (duxoba, ipak, chit va hokazo). Abraziv material sifatida zarralar o'lchami 3 mkmdan kichik bo'lgan sintetik olmos kukuni, alyuminiy oksidi, xrom oksidi, kremniy ikki oksidi yoki sirkoniy ikki oksidi ishlatiladi. Sayqallovchi material o'zining g'ovaklarida abrazivning zarralarini ushlab qolishi kerak. Oraliq sayqallashda tuksiz material ishlatiladi. Yakuniy sayqallashda tukli material va zarralar o'lchami 1 mkmdan kichik bo'lgan abraziv kukuni ishlatiladi.

Yumshoq sayqallagichlarning chidamliligi yuqori emas. Masalan, batistli sayqallagichda 20-30 plastinkani, satinlisida 50-70 ta

plastinkani; zamshligida 100-120 plastinkani, duxobada 500-600 plastinkani sayqallash mumkin. Sayqallash uch bosqichdan iborat:

Birinchi bosqich (oraliq sayqallash), abraziv qorishmasini tayyorlash va sayqallagichni tayyorlash. Shisha diskka yumshoq material (batist) qoplanadi. Abraziv zarralari bir tekis taqsimlanishi uchun, batist sirti spirt yoki soat moyi bilan ho'llanadi, yordamchi shisha disk sirtiga olmos kukunli pasta (ASM 3) suriladi va bir necha tomchi soat moyi tomiziladi. Hosil bo'lgan qorishmani boshqa shisha disk yordamida shisha disklar yuzasida bir tekis surilguncha bir-biriga ishqalanadi. Bu diskarning har biri navbat bilan batist qoplangan sayqallagichga suriladi va olmos kukun batist sirtiga o'tkaziladi. Kremniy plastinkasi bir tomoni bilan maxsus moslamaga yopishtiriladi va sayqallovchi qurilmaga o'rnatiladi. Sayqallash jarayonida qizish kuchli bo'lmashligi uchun sayqallagichning aylanish tezligi 30-40 ayl/min dan ortmasligi kerak (qiziganda plastinka ko'chib ketishi va mexanik ta'sirlanishi mumkin).

Ikkinchi bosqich (oraliq sayqallash), sayqallagich materialining almashtirish va ASM1 olmos kukunidan foydalanish. Buning uchun shisha diskka boshqa yumshoq material (duxoba) qoplanadi, issiq suv yoki spirt bilan ho'llanadi. Duxobaga olmos kukunli pasta (ASM1) suriladi va soat moyi tomiziladi. Maxsus moslamaga yopishtirilgan (birinchi bosqichda) plastinka moslama bilan birgalikda tozalanadi va sayqallovchi qurilmaga o'rnatiladi hamda sayqallash davom ettiriladi. Ikkinchi bosqichda sayqallagichning plastinkaga bosimi ko'paytiriladi, aylanish tezligi 25-30 ayl/min gacha kamaytiriladi.

Uchinchi bosqich (yakuniy nozik sayqallash), sayqallagich va abraziv material almashtiriladi. Sayqallagich materiali sifatida yangi batist va abraziv sifatida xrom oksidi, kremniy ikki oksidi yoki sirkoniy ikki oksidi ishlatiladi.

Xrom oksidining ikki turidan foydalaniladi:

- 1) Yirik, zarralar o'lchami 0,6-0,8 mkm, bixromat (ikki xromli birikma) kaliyning oltingugurt bilan reaksiyasidan olinadi;
- 2) Mayda zarralar o'lchami 0,2-0,4 mkm, bixromat ammoniyning termik parchalanishidan olinadi.

Xrom oksidi bilan sayqallash jarayoni sekin kechadi, bir necha soat davom etadi. Kremniy ikki oksidi yoki sirkoniy ikki oksidi

yordamida sayqallash tezligi ancha yuqori bo'ladi. Kremniy ikki oksidi kukuni zarralarining o'lchami 0,1 mkmdan kam bo'ladi. Kremniy ikki oksidi kukunining qorishmasi: bir qism kukunga besh qism suv qo'shib tayyorlanadi. Qorishmani sayqallash jarayonida aralashtirib turilishi kerak. Yumshoq material sifatida zamsh ishlatiladi, sayqallagichning aylanish tezligi 100 ayl/min gacha bo'ladi. Sirkoniy ikki oksidi kukuni zarralari o'lchami 0,1 mkm dan kichik, qorishmasi bir qism kukunga o'n qism suv qo'shilgan bo'ladi. Oxirgi bosqichda avvalgi ikki bosqichdagi olmos zarralari sirtidan ketkaziladi, mexanik buzilgan qatlam qalinligi keskin kamayadi va plastinkaning tozalik darajasi 13-14 – sinfga to'g'ri keladi.

Yarimo'tkazgich plastinka sirtiga kimyoviy ishlov berish

Sirdagi kirlar miqdori (kontsentratsiyasi) yarimo'tkazgichli asboblarda va integral sxemalarning parametrlari turg'unligiga ta'sir qilmagan holdagina sirt texnologik toza deyiladi.

Plastinka sirtini tozalashning fizik usullari:

- ultratovushli tozalash;
- kirlarni oquvchi suyuqlikda cho'tkalar bilan yuvish;
- gaz oqimini purkab tozalash (inert azot gazida);
- ionlar va elektronlar oqimi bilan bombardimon qilish;
- plazma muhitida ionlar bilan ishlov berish;
- vakuumda yoki inert muhitda yuqori haroratda qizdirish.

Kimyoviy tozalash usullari:

- iflosliklarni kimyoviy eritib yuborish;
- kirlangan plastinkaning yupqa sirt qatlamini kimyoviy yemirib ketkazish.

Plastinka sirtidagi fizikaviy kirlar

Fizikaviy adsorbsiyalangan fizikaviy kirlarga quyidagilar kiradi:

- *Organik bo'lmagan kirlar:* turli chang zarralari, abraziv materiallarning zarralari.

• *Organik kirlar*: yogʻ qatlamlari, ion almashuvchi smolalar qoldiqlari, fotorezits zarralari, oʻlchami 1-20 mkm oraligʻida boʻlgan mikroorganizmlar va hokazolar.

Yarimoʻtkazgich material sirtida kirlarning fizikaviy adsorbsiyasi molekulalar orasida Van-der-Vaals kuchlari yuzaga kelishi tufayli hamda elektrostatik qutblanish (zaryadlangan zarralarning Kulon kuchi bilan taʼsirlanishi) sababli qaytuvchi jarayonlardir.

Organik boʻlmagan kirlar gidromexanik yoʻl yoki toza azot inert gaz oqimini purkash orqali tozalanadi.

Organik kirlar kremniy plastinkasiga termik ishlov berilganda uglerod atomini hosil qilib parchalanadi.

Organik kirlar qutbli va qutbsizga boʻlinadi:

Qutbli organik kirlar: moylar, oqsillar, sirdagi faol moddalarning qoldiqlari. Bu moddalarning molekulalari sirt boʻyicha yoʻnalgan boʻlib, oʻzaro tortilib, kirlar yuzasining qisqarishiga olib keladi.

Qutbsiz organik kirlar: mineral yogʻlar, parafinlar, vazelinlar. Bu moddalarning molekulalari sirt energiyasi katta boʻlib, katta yuzalarni qoplab oladi.

Suvda erimaydigan organik moy kirlar plastinka sirtini gidrofob holatga keltiradi, yaʼni suv bilan hoʻllanmaydi. Sirtni bir tekis tozalash uchun gidrofil holatga keltirish kerak.

Moy kirlardan tozalash orqali sirtni gidrofob holatdan gidrofil holatga oʻtkazish yogʻsizlantirish deyiladi.

Organik kirlar organik eritgichlarda yoki ularning bugʻida yuvib tozalanadi. Avval qutbsiz yoki kuchsiz qutbli eritgichlarda (benzol, toluol, toʻrt xlorli uglerod, ayrim freonlarda) qutbsiz kirlar yuviladi, soʻngra spirt, atseton, uchxlor etilenda qutbli kirlar tozalanadi.

Plastinka sirtidagi kimyoviy kirlar

Kimyoviy kirlar yarimo'tkazgich material sirtida kimyoviy adsorbsiya (xemosorbsiya) langan bo'ladi. Xemosorbsiyada adsorbsiyalangan modda atomlari bilan yarimo'tkazgich plastinka sirtidagi atomlar orasida mustahkam kovalent yoki ion bog'lar hosil bo'ladi. Bu qaytmas jarayondir.

Kimyoviy kirlar ionli va atomli bo'ladi:

Ionli kirlar suvda eruvchi tuzlar, kislotalar va ularning asoslari bo'lib, plastinka sirtiga yuvuvchi va yemiruvchi eritmalaridan, sayqallovchi qorishma (suspenziya) lardan, qirquvchi, jilvirlovchi va sayqallovchi disklarning metall asoslaridan o'tadi.

Atomli kirlar kimyoviy reaktivlar tarkibida mavjud bo'lgan *Au*, *Ag*, *Su*, *Fe* atomlarining plastinka sirtiga mikromurtak shaklida o'tirishi yoki butun sirtini qoplashi, hatto mikroskopik qatlamlar hosil qilishidir.

Kimyoviy kirlar kuchli oksidlovchi aralashmalar, kompleks hosil qiluvchi eritmalar, sirdagi faol moddalar, kislotalarda ketkaziladi.

Tozalashda birinchi navbatda organik kirlar va sirt bilan kimyoviy bog'langan qatlamlar ketkaziladi. so'ngra ionli va atomli kirlar ketkaziladi.

Turli kirlarning asosiy manbalari:

- yarimo'tkazgichli plastinkaga mexanik ishlov berishda ishlatiladigan ishlab chiqarish xonalarida havoda mavjud bo'lgan chang;
- plastinkalarni tashish va saqlashda qo'llaniladigan idishlar, moslamalar va qurilmalar;
- texnologik muhit,
- organik va organik bo'lmagan reagentlar;
- yuvishda ishlatiladigan suv;
- kirlarning sezilarli manbai texnolog kiyimi, tanasi, kosmetikasi, bakteriyalar, viruslar. qo'llardagi moy qoldiqlari.

Tozalashda qo'llaniladigan usullar va moddalar tozalanuvchi yarimo'tkazgich materialiga nisbatan inert, yong'indan xavfsiz va zahariligi kam bo'lishi kerak. Yarimo'tkazgich plastinkalarni ifloslantirmaslik uchun kimyoviy refaktivlar, gazlar va suv yuqori darajada toza bo'lishi kerak. Tozalashda ishlatiladigan qurilmalar "cheksiz kamaytirib borish"ga asoslangan holda loyihalangan bo'lishi kerak (ketma-ket vannalar, bug'da tozalash va boshqalar).

9.5. Fizikaviy va kimyoviy yog'sizlantirish usullari

Fizikaviy yog'sizlantirish usulida organik kirlar issiq yoki qaynab turgan organik eritgichlarda eritiladi. Moy molekulalari plastinka sirtidan ajralib eritgichda bir tekis taqsimlanadi. Bir vaqtda teskari jarayon – tozalangan plastinka sirtiga moy molekulalari adsorbsiyasi ham bo'ladi. Bu jarayon kamaytirilishi uchun ketma-ket vannalarda yuvish usulidan foydalaniladi.

Kirlarni organik eritmalarda eritib tozalash juda samarador, lekin ko'p marta toza eritgichga solinishi tufayli organik eritgich isrofi ko'p bo'ladi. Ayrim organik eritgichlar zaharli va yonish xavfi yuqori bo'ladi.

Yarimo'tkazgich plastinkalarni organik eritgichlar bug'da tozalanganda ham cheksiz kamaytirib borish asosiga amal qilinadi. Qaynab turgan organik eritgich bug'lari tozalanayotgan sirt yuzasida kondensatsiyalanadi. Kondensatsiyalangan bug' tomchilari plastinka sirtidan oqib tushayotib, kirlarni o'zi bilan olib ketadi. Bu usulda plastinka yuzasi cheksiz ko'p marta toza organik eritgich bilan yuviladi, ifloslangan organik eritgich esa boshqa vannaga oqib tushadi. Bunday tozalashni izopropil spirt, freon-113, xlorlangan uglevodorod bug'larida bajariladi. Bulardan eng qulayi freon-113 bo'lib, yonmasligi, zaharli bo'lmagan suyuqligi va qaynash harorati $47,6^{\circ}\text{C}$, zichligi $1,57\text{ g/sm}^3$ ni tashkil etadi. Eritgichlar bug'da sovun, erigan moylar, tarkibida suv bo'lgan birikmalar yaxshi tozalanmaydi. Bu usulning kamchiligi: bug'lanish hisobiga organik eritgichning ko'p isrof bo'lishi va qurilmaning yuqori darajada germetik berkligidadir.

Kimyoviy yog'sizlantirish moy molekulalarini parchalovchi, lekin tozalanayotgan materialga ta'sir qilmaydigan aralashmalarda amalga oshiriladi. Shuning uchun aralashmada moy molekulalari yo'q va tozalanayotgan sirtidan ularning desorbsiyasi bo'lmaydi.

Kimyoviy yog'sizlantirish uchun qaynoq ($75-80^{\circ}\text{C}$) perekis ammiakli eritgichdan foydalaniladi. Bu eritgich perekis vodorod (H_2O_2) va ammoniy gidrooksidi (NH_4OH)ning suvdagi aralashmasidan iborat bo'ladi:



Eritgich qizdirilganda H_2O_2 dan ajralib chiqqan atomar kislorod organik va organik bo'lmagan kirlarni oksidlaydi. Ammoniy gidrooksidi (NH_4OH) perekis vodorod (H_2O_2) ning parchalanish reaksiyasini tezlashtiradi. moylarni sirtidan o'ziga tortib oladi. ayrim metall ionlari bilan yaxshi eruvchi komplekslar hosil qiladi. Kimyoviy yog'sizlantirish fizikaviy yog'sizlantirishga nisbatan kam zararli va kam mehnat talab qiladi.

Sirt metallarning atom va ionlaridan, oksid qatlamlari qoldiqlaridan, sulfidlardan, nitridlardan kislotalar yordamida tozalanadi. Metall ionlarini kislota tarkibidagi vodorod siqib chiqaradi. Kislotalar bilan tozalashda texnika xavfsizligi qoidalariga qattiq rioya qilish kerak. chunki kislota teriga va ko'zga tegsa kuydiradi

Kremniyni yemirish

Kremniy plastinkasini yemirish qattiq va suyuq muhit chegarasida amalga oshadi va beshta bosqichdan iborat bo'ladi:

- kimyoviy reagentning plastinka yuzasiga diffuziy asosida kelishi;
- reagentning adsorbsiyalanishi;
- kimyoviy reaksiyaga kirishish;
- reaksiya mahsulotlarining desorbsiyalanishi (tashqariga chiqarilishi);
- reaksiya mahsulotlarining plastinka yuzidan diffuziya asosida uzoqlashishi.

9.6. Yemirilish tezligi

Fik qonuniga asosan yemirilish tezligi kimyoviy reagentning plastinka sirtiga tomon diffuziyanish tezligiga bog'liq bo'lganda:

$$v_d = D \frac{(N_{hajm} - N_{sirt})}{\delta} \quad (9.2)$$

Bunda: δ – kimyoviy reagentning konsentratsiya gradiyenti mavjud bo'lgan eritgich qatlami qalinligi; N_{hajm} , N_{sirt} – yemirgich hajmidagi va plastinka sirtiga yaqin joydagi kimyoviy reagent konsentratsiyasi.

Yemirilish tezligi kimyoviy reaksiya tezligiga bog'liq bo'lganda:

$$v_p \propto (N_A)^a (N_B)^b \cdot \exp\left(-\frac{\Delta W}{RT}\right) \quad (9.3)$$

Bunda: N_A , N_B – o'zaro reaksiyaga kirishuvchi moddalar miqdori, ΔW – kimyoviy reaksiyaning amalga oshishi uchun zarur energiya, R – universal gaz doimiysi, a , b – kimyoviy reaksiya formulasida elementlar oldiga qo'yiladigan koeffitsiyentlar.

ΔW energiya – bu molekullarning o'rtacha energiyasiga nisbatan ortiqcha energiya bo'lib, molekullar to'qnashganda shu energiya hisobiga kimyoviy reaksiyaga kirishadi.

Suyuqliklarda kimyoviy reagentlarning diffuziya tezligini belgilovchi faollashuv energiyasi:

$$\Delta W_{dif} = (1 - 4) \text{ kkal/mol}$$

ga teng bo'ladi.

Har xil yemirgichlardagi kimyoviy reaksiyani belgilovchi faollashuv energiyasi esa

$$\Delta W = (10 - 100) \text{ kkal/mol}$$

bo'lishi mumkin.

Agar $\Delta W > \Delta W_{dif}$ bo'lsa, kimyoviy reaksiya ketadi. Yemirilish tezligi kimyoviy reaksiya tezligi bilan aniqlanadi.

Agar $\Delta W < \Delta W_{dif}$ bo'lsa, diffuziya jarayoni sodir bo'ladi. Yemirilish tezligi diffuziylanish tezligi bilan aniqlanadi.

Jilvirlangan (shlifovka qilingan) sirt sayqallangan (polirovka qilingan) sirtga nisbatan kichik faollashuv energiyasiga ega bo'ladi.

Faollashuv energiyasini sirt notekisliklari, nuqsonlari va atomlarning joylashish zichligiga bog'liq bo'lib, ularning oshishi bilan kamayib boradi.

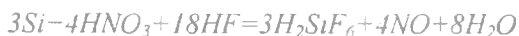
Har xil kristall yo'nalishlarida ΔW har xil bo'lgani uchun yemirilish tezligi kristall yo'nalishiga bog'liq bo'ladi.

Bunday yemirgichlar *selektiv yemirgichlar* deyiladi va kristall strukturasini o'rganishda, sirt va hajmidagi nuqsonlarni tekshirishda ishlatiladi ($\Delta W > \Delta W_{dif}$ - kimyoviy reaksiya tezligi bilan boshqariladi) va haroratga kuchli bog'liq bo'ladi.

$\Delta W < \Delta W_{dif}$ - sayqallovchi yemirish. sirt notekisliklariga va nuqsonlarga bog'liq emas, haroratga kuchsiz bog'liq bo'ladi. Asosan diffuziya tezligiga ta'sir qiluvchi faktorlarga, masalan, aralashtirib turishga, yemirgich yopishqoqligiga bog'liq bo'ladi (bunday yemirgichlar diffuziya tezligi bilan boshqarilib turiladi).

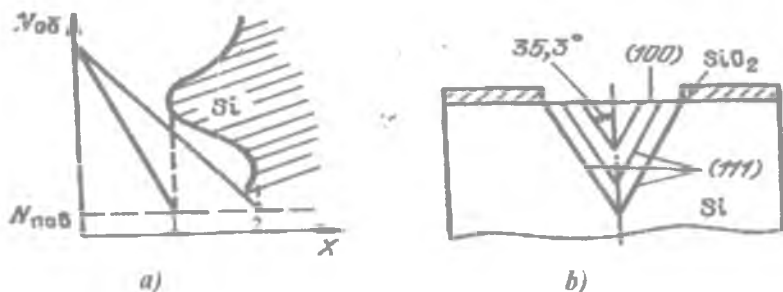
Kremniy uchun sayqallovchi yemirgich HF va HNO_3 aralashmasidir. Yemirilish kremniy erishining elektr kimyoviy nazariyasi asosida sodir bo'ladi.

Bu nazariyaga asosan yemirgich bilan qoplangan kremniy sirtida juda ko'p sondagi mikroelektrodlar: katod va anodlar hosil bo'ladi. Anod bor sohalarda kremniy oksidlanadi va so'ngra oksid erib, H_2SiF_6 hosil bo'ladi. Katodli sohalarda esa HNO_3 qayta hosil bo'ladi:



Kremniyning HF va HNO_3 aralashmasida yemirilish tezligi kimyoviy reagentlarning kremniy sirtiga diffuziyasi tezligi bilan aniqlanadi. Bunda sirt notekisliklari yemirilib, tekislanib boradi. 9.2-

rasmda yemirgich miqdori gradiyenti katta, shuning uchun yemirilish tezligi katta bo'ladi.



9.2-rasm. Kimyoviy reagentlar katta diffuziya tezligi bilan yetib keladi

Kremniy uchun yo'nalishga bog'liq bo'lgan yemirgichlar ishqorlarning suvdagi eritmalari va gidrazin gidrat $(NH_2)_2H_2O$ ni misol qilish mumkin. Bu yemirgichlar uchun faollashish energiyasi: $NaOH$ ni suvdagi 10% li eritmasi uchun 13 kkal/mol tashkil etadi. Gidrazin gidrat uchun esa faollashish energiyasi 6-10 kkal/mol ga teng.

Bu yemirgichlarda $[100]$ yo'nalish $[111]$ yo'nalishga nisbatan bir necha o'n marta tezroq yemiriladi. Masalan, $[100]$ yo'nalishli kremniy plastinkasini yemirish natijasida V - shakldagi chuqurlik yuzaga keladi. Bu chuqurlik integral sxemalarni tayyorlashda izolyatsiyalangan sohalar hosil qilishda ishlatiladi (9.2-rasm, b).

Kremniyga kirishma kiritish

Diffuziya usuli

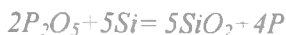
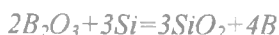
Diffuziya usulidan birinchi marta $p-n$ o'tish hosil qilishda foydalanilgan bo'lib, hozirgi davrga qadar bu usul nazariy va amaliy tomondan takomillashtirilib kelinmoqda. Bundan maqsad, diffuziya usuli bilan olingan qatlamlarning asosiy parametrlari – sirtqi qatlamdagi kirishma miqdori va hosil qilingan qatlamning qalinligini

– yuqori aniqlikda boshqarish imkoniyatlarini kengaytirish, texnologik jarayonlarning tannarxini pasaytirish.

Planar texnologiyasi ko'p qo'llaniladigan diffuziya usullaridan biri – tashuvchi gaz oqimida diffuziya qilish usulidir. Bu holda diffuzantlar manbai sifatida qattiq, suyuq, gaz holatidagi moddalar ishlatiladi.

Reaktorda diffuziya sohasi 30 sm bo'lib, harorat $(700-1300)^{\circ}\text{C}$ $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ va diffuzant joylashgan soha (6 sm) da harorat $(400-1100)^{\circ}\text{C}$ $\pm 2^{\circ}\text{C}$ oralig'ida boshqariladi.

Yuqori haroratda diffuzant bug'lanib, uning molekularini tashuvchi gaz (inert gazlar N_2 , Ar) oqimi diffuziya sohasiga olib keladi. Qattiq diffuzant sifatida akseptorli kirishma uchun B_2O_3 , donorli kirishma uchun P_2O_5 oksidlar ishlatiladi. Diffuziya sohasida quyidagi kimyoviy reaksiya sodir bo'ladi:



Natijada elementar B yoki P va SiO_2 hosil bo'ladi. Reaksiya mahsulotlari: SiO_2 bilan B_2O_3 yoki P_2O_5 Si sirtida shisha qatlam hosil qilib, kirishma manbai bo'lib qoladi. Bu qatlam Si ni eroziyadan va bug'lanishdan saqlaydi.

Diffuziya jarayonida plastinka sirtida hosil bo'lgan kirishma miqdori:

- diffuzant haroratiga;
- uning suv bug'i bilan to'yinaganligiga;
- tashuvchi-gaz tarkibiga;
- tashuvchi-gaz oqish tezligiga bog'liq bo'ladi.

Bor angidridi B_2O_3 – 700°C va fosfor angidridi P_2O_5 – 200°C da intensiv bug'lana boshlaydi.

Tashuvchi-gaz tezligi odatda va $\sim 1500 \text{ sm}^3/\text{min}$ bo'ladi.

Sirtqi qatlamdagi kirishma miqdoriga ta'sir qiluvchi faktorlarning hammasini nazorat qilib bo'lmaydi. Masalan, birinchi navbatda suv bug'larini kuchli yutuvchi P_2O_5 va B_2O_3 moddalardagi suv bug'lari miqdorini, ya'ni bu moddalarni diffuziya qurilmasiga joylashtirishdan

oldin suv bug'laridan butunlay tozalashning iloji yo'q. Diffuzantlarda avvaldan suv bug'i mavjudligi plastinka sirtida kirishma miqdori notekis taqsimlanishiga sabab bo'ladi va bu qattiq diffuzantlarning asosiy kamchiligi hisoblanadi.

Bu kamchilikni galogenlardan iborat bo'lgan *suyuq diffuzantlardan* foydalanish orqali bartaraf etish mumkin. Bu holda diffuziya qurilmasi yagona yuqori haroratli sohaga ega bo'ladi, suyuq diffuzantni bug'lantirish uchun $(20-40)^{\circ}\text{C}$ harorat yetarli. Eng ko'p ishlatiladigan galogen birikmalari:

- uchxlorli fosfor (PCl_3);
- xlorli fosforoksidi (POCl_3);
- uchbromli bor (BBr_3)

Kvars trubaga uch xil gaz oqimi yuboriladi:

- 1) N_2 yoki Ar dan iborat asosiy gaz oqimi (tezligi $1000 \text{ sm}^3/\text{min}$);
- 2) Shu gazning kuchsiz oqimi (tezligi $10 \text{ sm}^3/\text{min}$) suyuq diffuzant orqali;
- 3) Kuchsiz ($\sim 15 \text{ sm}^3/\text{min}$) kislorod oqimi.

Suyuq diffuzant ishlatilganda tashuvchi-gaz tarkibidagi kislorod kirishma oksidini hosil qilishi uchun kerak.

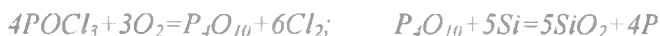
BBr_3 uchun reaksiya:



PCl_3 uchun:



POCl_3 diffuziya jarayonida parchalanadi va P_4O_{10} , PCl_3 , Cl_2 hosil bo'ladi. Bunda, $(\text{PCl}_3 + \text{O}_2)$ – yuqoridagi reaksiyadan tashqari quyidagicha reaksiya bo'lishi mumkin:



Bu reaksiyalarda Si sirtini yemirishi mumkin bo'lgan erkin xlor hosil bo'ladi. Agar O_2 ko'p bo'lsa, plastinka sirtida himoyalovchi SiO_2 qatlam hosil bo'ladi.

Suyuq diffuzantlardan foydalanishning kamchiligi: diffuzantlar ham, kimyoviy reaksiya mahsulotlari ham zaharli moddalar hisoblanadi.

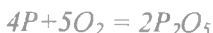
Gaz holatdagi diffuzantlar – kirishma gidridlari (H bilan birikmalari), masalan, PH_3 – fosfin, B_2H_6 – di boran, AsH_3 – arsin.

Fosfin diffuzantidan foydalanilganda tashuvchi-gaz sifatida PH_3 , Ar va O_2 aralashmasi ishlatiladi.

Diffuziya kamerasida $T \geq 440^\circ C$ haroratda fosfin (PH_3) parchalanadi:

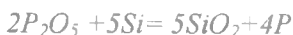


va kislorod bilan birikib:



fosfor angidridi hosil bo'ladi.

Kremniy sirtida:



reaksiyasi sodir bo'ladi.

Bu usulning afzalligi plastinka sirtida hosil bo'ladigan kirishma atomlarining miqdorini, inert gaz tarkibidagi gidrid miqdorini o'zgartirib, aniq boshqarish imkoni mavjudligidadir.

Kamchiligi: gaz holatdagi diffuzantlarning zaharlilikidir.

Ionlarni kiritish yo'li bilan legirlash

Ionli legirlash diffuziya usuliga nisbatan bir qator qulayliklarga ega bo'lgani uchun integral sxemalar tayyorlash texnologik jarayonida keng qo'llaniladi.

Masalan:

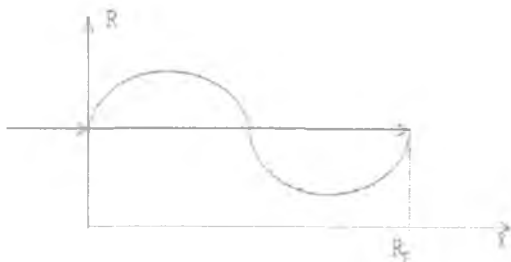
- kremniy plastinkalariga past haroratda kirishma kiritish;
- kirishma atomlari taqsimoti ionlar energiyasi bilan boshqariladi;

- kirishma atomlar miqdori birlik yuzaga tushayotgan ionlar soni bilan boshqariladi va cheklanmagan miqdorda kiritish mumkin.

Ionli legirlashda kirishma atomlarining kirish masofasi kichik bo'lgani uchun (B va P uchun $0,2 \pm 0,4$ mkm) diffuziya usuli bilan birgalikda olib boriladi.

Kremniy plastinkasi ionlar bilan bombardimon qilinganda ionlar Si atomining yadrosi va elektronlari bilan to'qnashishi natijasida o'z energiyasini yo'qotib, ma'lum masofada to'xtaydi.

Ionlarning plastinka sirtidan to' ichiga kirib to'xtaguncha bosib o'tgan masofasi R – yugurish yo'li deyiladi. Dastlabki yo'nalish bo'yicha bosib o'tgan masofasining proyeksiyasi R_p – yugurish yo'li proyeksiyasi deyiladi.



9.3-rasm. Ionli legirlashda kirishma atomlarining yugurish yo'li proyeksiyasi

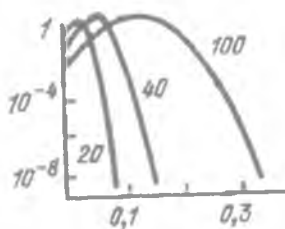
Ionli legirlashning nazariy modeliga asosan, plastinka sirtiga tushayotgan ionlar oqimi tushish burchagi va plastinka kristall yo'nalishiga qarab tartibsiz sochiluvchan va kam sochiluvchan ionlar oqimiga bo'linadi. Tartibsiz sochilish bo'lganda ionlarning kristalldagi taqsimoti Gauss funksiyasi bilan ifodalanadi:

$$N(x) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - R_p}{\Delta R_p} \right)^2 \right] \quad (9.4)$$

Bunda: Q – ionlarning plastinka sirtidagi nurlanish miqdorining zichligi (dozasi) bilan aniqlanadi: $D=elQ$; l – ion zaryadini ko'rsatuvchi butun son bo'lsa, e – elektron zaryadi hisoblanadi; R_p – o'rtacha yugurish masofasining dastlabki yo'nalish bo'yicha proyeksiyasi; ΔR_p – o'rtacha kvadratik chetlashish.

Plastinkaga kiritilgan kirishmaning eng katta miqdori N_{max} ga nisbatan kristall ichiga tomon kirishma taqsimoti $N(x)/N_{max}$

$$N_{max} = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} = \frac{D}{\sqrt{2\pi}el\Delta R_p} \quad (9.5)$$



9.4-rasm. Ionli legirlashda kristall ichida kirishma atomlari taqsimoti

N_{max} sirdagi kirishma atomlar miqdoriga to'g'ri kelmaydi (diffuzion usuldagidan farqli) va kristall ichida maksimumga erishadi. Ionlar energiyasi ortishi bilan N_{max} joylashgan nuqta yarimo'tkazgich ichiga siljib, mos ravishda sirdagi kirishma atomlar miqdori kamayib boradi. Energiya 1 dan 2,5MeV bo'lganda sirtki kirishma miqdori shunchalik kamayadiki, u N_0 dan kichik bo'ladi, natijada yashiringan, o'tkazuvchanligi o'zgargan qatlam hosil bo'ladi. Energiya $E > 400$ keV da n - p - n o'tish va $E < 400$ keV da p - n o'tish hosil bo'ladi.

Kristall ichiga kiritilgan ionlarning panjara tugunlarida joylashgan qismi elektr faol bo'ladi. Tugunlarda joylashmagan ionlar esa elektr passiv bo'lib, erkin tok tashuvchilarni hosil qilmaydi. Shuning uchun kiritilgan ionlarning foydali qismini aniqlovchi koeffitsiyent (akseptorli kirishma kiritilganda) quyidagiga teng bo'ladi:

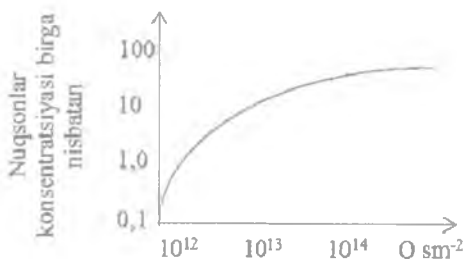
$$k_f = \frac{P_p + N_d}{N_a} \quad (9.6)$$

Bunda: P_p – ionlar kiritib elektr o'tkazuvchanligi o'zgargan sohadagi o'rtacha kovaklar miqdori; N_d – kristalldagi dastlabki donor kirishma atomlarining miqdori; N_a – kiritilgan akseptor ionlarining miqdori.

Kiritilgan ionlarning hammasi faol holatda bo'lsa, $k_f = 1$ bo'ladi, ya'ni $N_a^- = P_p + N_d^+$ elektr neytrallik tenglamasi bajariladi.

Ionlar kiritilgan qatlam elektr o'tkazuvchanligi faqatgina elektr faol ionlar soniga bog'liq bo'lmasdan, implantatsiya jarayonida hosil bo'ladigan nuqtaviy nuqsonlar (vakansiyalar, panjara tugunidan chiqarilgan atomlar) hisobiga tok tashuvchilarning harakatchanligi kamayadi. Bu nuqsonlar rekombinatsiyalovchi energetik sathlar hosil qilib, tok tashuvchilarning yashash vaqti kamayib ketishiga sabab bo'ladi.

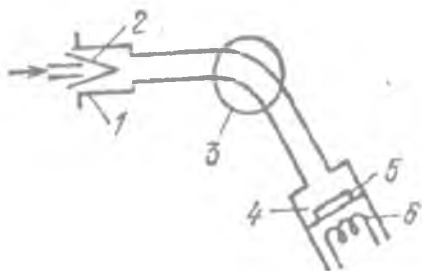
Ionlar oqimining miqdori (dozasi) atom/sm^2 ortishi bilan nuqsonlar chiziqli ortib boradi.



9.5-rasm. Nuqsonlar konsentratsiyasining birlik yuzaga tushayotgan ionlar miqdori (Q) ga bog'liqligi

Katta dozalarda to'yinish kuzatiladi, bunda ayrim nuqtaviy nuqsonlar qo'shilib, tartibsiz amorf qatlamlar hosil bo'ladi (kristall strukturaga ega bo'lmagan). Bu nuqsonlarning miqdorini kamaytirish maqsadida implantatsiyadan so'ng plastinkalar qizdirilib haroratli ishlov beriladi. Qizdirish $T=400 - 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ oralig'ida k_f ko'effitsiyent birga intiladi. Implantatsiya miqdori qancha katta bo'lsa, $k_f=1$ bo'lishi uchun yuqori haroratda qizdirish kerak.

9.7. Implantatsiyaning amaliy uslublari



9.6-rasm. Ionli legirlash qurilmasining tuzilishi: 1 – kirishma (ionlar) manbai kamerasi, 2 – termokatod, 3 – magnitli mass-analizator, 4 – nishonga olish kamerasi, 5 – plastinka, 6 – plastinkani qizdirgich

Ionlar manbai kamerasi (1) da vakuum $\sim 10^{-3}$ Pa bo‘lib, qoldiq gaz kamerada kirishma moddasining gazi ionlashtiriladi. Bu modda qattiq yoki gaz holatda bo‘lishi mumkin. Masalan, fosfor ioni hosil qilish uchun P_2O_5 – fosfor ангидриди (qattiq) yoki PF_5 gazi ishlatiladi. Bor ionini hosil qilish uchun BF_3 (gaz) ishlatiladi. Bug‘ni ionlatish qizdirilgan termokatoddan (2) uchib chiqayotgan elektronlar yordamida amalga oshiriladi. Ionlar zaryadlangan zondlar yordamida ajratiladi, elektrostatik linzalar yordamida fokuslanadi va 20-300 kV kuchlanish bilan tezlashtiriladi. Tezlashtirilgan ionlar oqimi mass-analizatorning magnit maydonida massasiga qarab turli kattalikka og‘adi. Aylana radiusi r bo‘lgan yoy bo‘yicha harakatlanadi:

$$r = \frac{1}{H} \cdot \left(\frac{2MU}{e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9.7)$$

Bunda: H – magnit maydon kuchlanganligi, U – tezlatuvchi kuchlanishi, M – ion massasi, $H = 4 \cdot 10^5 - 4.8 \cdot 10^5$ A/m.

Bu separator ionlar tarkibini tozalash imkonini beradi. ya‘ni implantatsiya usuli juda katta aniqlik va tozalik bilan legirlash imkonini beradi. Integral sxemalarni tayyorlashda legirlash nuqtaviy

bo'lishi kerak, buning uchun plastinka yuziga maska sifatida ionlar kam yutiladigan materiallar SiO_2 , Si_3N_4 , Al_2O_3 (dielektriklar) va Al , Ni , Au metall qatlamlari ishlatiladi. Ionlar oqimining yuzasi $4\text{--}5\text{ sm}^2$, ionlar energiyasi 200 keV bo'lganda SiO_2 maska qalinligi bor ionlari uchun $\sim 1\text{ mkm}$ bo'lishi kerak. Energiyani 100 keV gacha kamaytirganda maska qalinligi $0,65\text{ mkm}$ bo'lsa, yetarli. Xuddi shu energiyalar uchun mishyak ionlarida maska qalinligi $0,2$ va $0,12\text{ mkm}$ ni tashkil etadi. Maska Al bo'lsa 100 keV energiyali bor ionlari uchun $0,4\text{ mkm}$ qalinlik yetarli. Maska sifatida Al ishlatilganda radiatsion nuqsonlarni yo'qotish uchun qizdirish past haroratlarda ($T=550^\circ\text{C}$ gacha) bo'lishi kerak, chunki $T=575^\circ\text{C}$ evtektika haroratidir. Maska sifatida SiO_2 ishlatilsa, $800\text{--}900^\circ\text{C}$ gacha qizdirish mumkin, kirishma taqsimotini deyarli o'zgartirmaslik mumkin bo'ladi. Ionli legirlashda yon tomonlarga kirishma tarqalishi bo'lmagani uchun bipolyar integral sxema tayyorlashda kichik yuza o'lchamli emitter sohasini hosil qilish mumkin. Ionli legirlashda qizdirish haroratlari kichik bo'lgani uchun $n\text{--}p\text{--}n$ va $p\text{--}n\text{--}p$ tranzistorlar asosida integral sxemalarni tayyorlash texnologiyasi ancha soddalashadi. Chunki p va n sohalarning o'zaro ta'siri kamayadi. Bipolyar tranzistorlarning baza sohasini tayyorlashda diffuziyaning birinchi bosqichini implantatsiya bilan almashtirish, kirishma tozaligi va miqdorining katta aniqlikda boshqarilishi bipolyar integral sxemalarning strukturasi va elektrofizik parametrlari bir xilligini ta'minlaydi.

Implantatsiya qilingan qatlamlarning elektrofizik xossalarini o'rganish usullari

Implantatsiya qilingan qatlamning asosiy parametrlari:

- qatlam qarshiligi;
- $p\text{--}n$ o'tish chuqurligi;
- qatlam sirtidagi kirishma miqdori.

Qatlam solishtirma qarshiligi to'rt zondli usul bilan tekshiriladi. Plastinka sirtida zondlar bitta to'g'ri chiziqli yotib, ular orasidagi masofa bir xil bo'lishi kerak. Chetki zondlardan tok o'tkaziladi,

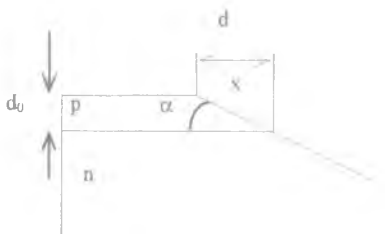
o'rtadagilarida kuchlanish tushishi o'lchanadi. Agar qatlam juda yupqa va yuzasi katta bo'lsa, kuchlanish quyidagicha aniqlanadi:

$$U = \frac{IR_S}{2\pi} \ln\left(\frac{2s}{s} - \ln \frac{s}{2s}\right) = IR_S \frac{\ln 2 - \ln 0.5}{2\pi} = IR_S \frac{1}{4,5324} \quad (9.8)$$

$$R_S = 4,5324 \cdot \frac{U}{I}$$

Bunda: R_S – qatlam qarshiligi, $[Om/sm^2]$ – birlik yuzadagi qatlam qarshiligi o'lchov birligi.

p – n o'tish chuqurligini aniqlash usullaridan biri plastinkani ma'lum bir burchak ostida ($\alpha=1-5^\circ$) jilvirlab va yuzaga kimyoviy moddalar ta'sir ettirilsa, n va p sohalarga har xil moddalar qoplanadi (har xil rangda bo'lib qoladi). Sabab n va p sohada kimyoviy reaksiya tezligi turlicha bo'lishi yoki metallar bitta sohaga qoplanadi, chunki n va p sohalarning elektr kimyoviy potentsiali har xil bo'ladi. Kimyoviy rang berish usuli yordamida $n^+ - n$, $p^+ - p$ o'tish chuqurligini ham aniqlash mumkin (9.7-rasm).



9.7-rasm. Kirishma miqdorining qatlam bo'yicha taqsimoti

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \frac{d_0}{x} \cdot \frac{x}{d} = \frac{d_0}{d} \quad (9.9)$$

bunda

$$d_0 = d \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

Ko'pincha kimyoviy rang berish uchun HF ga 0,1% HNO_3 qo'shib tayyorlangan yemirgichdan foydalaniladi. Bu yemirgich surilganda p – soha qorayadi, n – soha o'zgarmaydi. Agar yemirgich sifatida HF ning o'zi ishlatilsa jilvirlangan yuza kuchli yoritiladi. Legirlangan qatlam sirt yuzidagi kirishma miqdorini aniqlash uchun to'rt zondli usul bilan sirtining solishtirma qarshiligi (R_S) va $p - n$ o'tish chuqurligi (d_0) o'lchanadi. Bulardan o'rtacha solishtirma elektr o'tkazuvchanlik topiladi:

$$\sigma = \frac{1}{R_S} \cdot d_0 \quad (9.10)$$

Buni bilgan holda sirt yuzidagi kirishma miqdori quyidagicha hisoblanadi:

$$\sigma = \frac{1}{R_S d_0} = \frac{1}{d_0} \int_0^{d_0} e \cdot \mu \cdot (N) \cdot [N(x) - N_0] \cdot dx \quad (9.11)$$

Bunda, $N(x)$ – legirlangan qatlamda kirishmalar taqsimoti.

Ionlarni implantatsiya qilish orqali legirlangan qatlamlarda kirishma atomlarning taqsimoti turli fizik usullar bilan aniqlanadi. Keng qo'llaniladigan usullardan biri ikkilamchi ionlarning mass-spektroskopiyasidir. Bunda legirlangan qatlam vakuumda argon ionlari bilan bombardimon qilinib, qatlamdan atomlar changlatiladi. Hosil bo'lgan ikkilamchi ionlar oqimidan mass-analizator yordamida kirishma ionlar ajratib olinadi. Bu ionlarning hosil qilgan toki ularning sirt yuzidagi miqdoriga, proporsional, ionlarning tugagunicha ketgan vaqt kattaligi qatlam qalinligiga proporsional bo'ladi. Shuning uchun ion tokining vaqtga bog'liqligi kirishma miqdorining qatlam bo'yicha taqsimotiga mos keladi.

9.8. Fotolitografiya

Fotolitografiya (FL.) ning asosi yarimo'tkazgich plastinka sirtiga yupqa qatlam yorug'lik sezgir lak – fotorezist (FR) suriladi. Fotorezist

qatlam qurilgandan so'ng plastinka ustiga fotoshablon (FSh) (plastinkaga ko'chirish kerak bo'lgan rasm hosil qilingan shisha fotoplastinka) qo'yiladi. Fotorezist surilgan yarimo'tkazgich plastinkaning ustiga fotoshablon qo'yib yoritilsa, (binafsha, ultrabinafsha nur bilan). fotorezistning yorug'lik tushgan sohalari:

- negativ fotorezistlarda ochiltiruvchi (proyavitel)da crimaydigan bo'lib qoladi, yoritilmagan sohalari erib ketadi;

- pozitiv fotorezistlarda esa yoritilgan sohalari eruvchan tuzga aylanadi va ochiltiruvchida erib ketadi, yoritilmagan sohalari erimaydi.

Fotorezist qatlamida hosil bo'lgan darchalar orqali yarimo'tkazgich plastinka yoki qatlam kimyoviy yemiriladi.

Fotorezistlar

Fotorezistlar (FR) kislota va ishqorlarga chidamli, ma'lum to'lqin uzunligidagi yorug'likka sezgir moddalardir.

Yorug'lik ta'sirida eruvchanligi ortuvchi fotorezistlar pozitiv fotorezistlar deyiladi, aksincha yorug'lik ta'sirida erimaydigan holatga o'tuvchi fotorezistlar negativ fotorezistlar deyiladi.
--

Pozitiv fotorezistdan foydalanilganda fotoshablondagi rasm yarimo'tkazgich plastinkada xuddi shunday hosil bo'ladi. Negativ fotorezistdan foydalanilganda plastinkada rasmning aksi hosil bo'ladi.

Yarimo'tkazgich integral sxemalar texnologiyasida negativ fotorezist sifatida polivinil sinnamat (PVS) – polivinil spirti murakkab efiri va korichna kislota ishlatiladi. Bu fotorezist yorug'likka sezgirlik sohasi ultrabinafsha nurga to'g'ri keladi. U kukunsimon bo'lib, oq yoki sariq rangda bo'ladi. Organik eritgichlar toluol, xlorbenzol, atsetat metilinglikol+metoksilol aralashmalarida eriydi.

Fotorezist qatlamning kislotaga chidamliligi HF va HNO_3 kislotalarida katta emas. Himoyalovchi fotorezist qatlamining qalinligi 0.5 mkm bo'lganda kremniyda yemirish mumkin bo'lgan chuqurlik 10 mkm dan, germaniyda 40 mkm dan oshmaydi.

Planar texnologiyada PVS (polivinilsinnamat) markali fotorezisti SiO_2 qatlamni yemirgichdan himoya qilish uchun ishlatiladi. Pozitiv fotorezist sifatida 1,2 – naftoxinandiazit (2)-5 – novolak sulfo efirining turli polimerlaridan iborat aralashmasi ishlatiladi. Eritgich sifatida spirtlar, ketonlar, aromat uglevodorodlar, dioksan ksilol ishlatiladi. NXDA – naftoxinandiazit fotorezistining yorug'likka sezgirliги ultrabinafsha yorug'likda PVS fotorezistiga nisbatan katta to'liq uzunligi tomonga siljiydi.

Fotorezistning asosiy parametrlari:

- yorug'likka sezgirliги: hosil qilingan shaklning aniqligi;
- ajratish qobiliyati: fotorezist yordamida 1mm da hosil qilish mumkin bo'lgan chiziqlar soni;
- kislotaga chidamliligi: ayrim nuqtalar va qirralarning kislotada yemirilish darajasi bilan baholanadi.

9.2-jadval

Fotorezislarning asosiy turlari va parametrlari

Fotorezist markasi	Fotorezist turi	Fotorezist rangi	Ajratish qobiliyati, chiziq/mm	Ochiltiruvchiga chidamliligi, sek
FP-307	pozitiv	qizg'ish	500	90
FP-330	pozitiv	qizg'ish	400	60
FP-333	pozitiv	qizg'ish	500	180
FP-334	pozitiv	jigarrang	400	600
FP-383	pozitiv	qizg'ish	400	60
FP-RN-7-2	pozitiv	jigarrang	400	2400
FN-11	negativ	jigarrang	100	chidamli
FN-103	negativ	to'qqizil	50	chidamli
FN-106	negativ	sariq	200	chidamli
FN-108	negativ	qizg'ish	400	chidamli

Fotoshablonlar va ularni tayyorlash

Fotoshablon (FSh) fotolitografiya jarayonining asosini tashkil qilib, uning yordamida fotorezist qatlami mikrosxema topologiyasiga mos holda lokal yoritiladi.

Fotoshablon – ultrabinafsha nurni yaxshi o'tkazuvchi ishchi yuzasiga mikrosxemaning ma'lum bir qatlami topologiyasiga mos keluvchi (yorug'likni o'tkazmaydigan) rasmi qatlamda hosil qilingan tekis shisha plastinka yoki egiluvchan polimer qatlamdir.

Fotoshablonni tayyorlash uchun optik borosilikat shishasi yoki polimer qatlami ishlatiladi.

Qatlamli rasm hosil qilish uchun kumush – galoidli fotoemulsiyadan foydalanilsa, **emulsiyali fotoshablon** deyiladi. metall qatlamidan foydalanilsa, **metall fotoshablon** deyiladi, ko'rinuvchi yorug'likni qisman o'tkazuvchi oksidlar yoki boshqa materiallarning qatlamidan foydalanilsa, **rangli fotoshablonlar** deyiladi.

Fotoshablonlarni yarimo'tkazgich plastinkasiga tez-tez jipslash-tirish natijasida u yediriladi. Emulsion fotoshablonlar 20 ta operatsiyaga, metall fotoshablonlar esa 500 ta operatsiyaga yaraydi.

Fotoshablon tayyorlashning bir qancha usullari mavjud. *Optik mexanik usul* bilan fotoshablon tayyorlash uchun original rasm 100-1000 marta kattalashtirilib, yorug'lik o'tkazmaydigan lak surilgan oynaga chiziladi. Lakni kesish uchun olmosli yoki karbit volframli keskichdan foydalaniladi. Original rasm o'tuvchi yorug'likda (tiniqlikni oshirish uchun) 50-100 marta kichraytirib fotoplastinkada rasmga olinadi. Hosil qilingan foto original avtomat proyeksiyali fotoshtampga joylashtiriladi va foto originaldagi rasm kerakli o'lchamgacha kichraytirilgan holda fotoshablona tushiriladi va ko'paytiriladi (multurlikatsiyalanadi). Hosil qilingan etalon fotoshablonning ishchi nusxasini kontaktli qayta chiqarish orqali tayyorlanadi. Etalon fotoshablondan 20-30 ta nusxada ishchi fotoshablonlar tayyorlash mumkin.

Emulsiyali etalon fotoshablondan nusxa tayyorlash uchun optik shishaga xrom qatlami vakuumda uchirib hosil qilinadi (qalinligi ~1mm), fotorezist suriladi va kontaktli pechat qilinadi (jipslashtirib yoritiladi). Ekspozitsiya va o'chirilgandan so'ng kislotada xrom yemiriladi. Tayyor bo'lgan fotoshablon mustahkamligini oshirish uchun 100-150°C da bir necha soat qizdiriladi, bunda xrom qatlaminin shishaga adgeziyasi (yopishqoqligi) ortadi.

9.9. Fotolitografiya jarayoni

Fotolitografiya jarayoni bir qancha operatsiyalardan iborat:

- **Plastinka sirtini tozalash.** Buning uchun suyuq uch xlor etilenda (C_2Cl_3H) yoki uning bug'ida yuviladi, azot kislotasida (HNO_3) qaynatiladi. Yuvish uchun toluol (C_7H_8), amilatssetat, atseton (S_3N_6O) va etil spirti ishlatiladi.

- **Fotorezistni surish.** Sentrifuga yordamida purkash orqali fotorezistga botirib va boshqa usullar bilan amalga oshiriladi.

- **Fotorezist qatlamini quritish.** $T=300\text{ K}$ da 15–30 minut, so'ngra $T=100\div120\text{ }^{\circ}\text{C}$ da 30÷60 minut oralig'ida quritiladi. IQ nurda yoki vakuumda ham quritish mumkin.

- **Ekspozitsiya.** Kontaktli usul bilan amalga oshiriladi. Yoritilganda fotorezist qatlaminin xossasi o'zgaradi.

- **Ochiltirish.** Negativ fotorezist ishlatilsa, yoritilmagan sohalar organik eritgichlar: toluol (C_7H_8), uchxlor etilen (C_2Cl_3H), xlorbenzol (C_6H_5Cl) da eritib yuboriladi. Pozitiv fotorezistlarda yoritilgan sohalar indenkarbon kislotaga eruvchan tuzlarga aylanadi va kuchsiz (0,3 – 0,4)% li ishqorli $NaOH$ yoki uch natriy fosfat eritmasida eritiladi.

- **Mustahkamlash.** Rasm hosil qilingan fotorezist qatlami mustahkamlash uchun ishlatilayotgan fotorezist turiga qarab 130°C dan 260°C gacha oraliqdagi haroratda bir soat davomida qizdiriladi.

- **Hosil qilingan rasmning geometrik o'lchamlarini mikroskopda tekshirish.** Fotolitografiya jarayonida eng ko'p hosil bo'ladigan nuqsonlari rasm chetlarining notekisligi, fotorezist qatlamlarida teshiklar hosil bo'lishi.

– *SiO₂ qatlamini yemirish.* SiO₂ qatlamining fotorezist bilan himoyalanmagan sohalari 30gr NH₄F + 60ml H₂O + 9ml HF (48%) yemirgich yordamida yemiriladi. Tarkibida fosfor atomlari ko'p bo'lgan SiO₂ qatlamining HF da yemirilish tezligi toza SiO₂ yoki borli SiO₂ qatlamidan katta bo'lgani uchun SiO₂ qatlamini HF da yemirish maqsadga muvofiq emas.

– *Mustahkamlangan fotorezist qatlamini ketkazish uchun* sulfat kislotasi (H₂SO₄) da qaynatiladi yoki 10% li ishqor eritmasiga solinadi. Alyuminiy qatlami yemirish uchun negativ fotorezist bo'lganda 5-20 % li NaOH yoki KON ishlatiladi. Yemirish uchun T=50-80 °C gacha qizdirish kerak bo'ladi va yemirish tezligi 200 - 500 Å/min ni tashkil etadi. Pozitiv fotorezist bo'lganda alyuminiy yemirish uchun ortofosfor kislotasining 50 % li eritmasiga solinib. T=60-70 °C gacha qizdiriladi. Quyidagi yemirgichdan ham foydalanish mumkin:

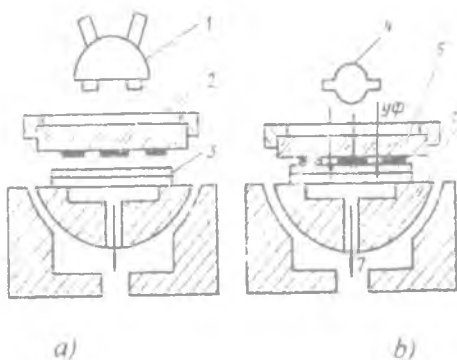


Xrom qatlamini yemirish uchun pozitiv fotorezist bo'lganda kuchsiz HCl dan foydalanish mumkin. Yemirish tezligi katta bo'ladi. Oltin qatlami yemirish uchun pozitiv fotorezist bo'lganda HNO₃–3HCl yemirgichdan foydalaniladi.

Tantal qatlamini yemirish uchun negativ fotorezist qo'llanilganda avval ishqorli eritmada tantal qatlamining oksid qatlami yemiriladi, so'ngra HF li yemirgichda tantal qatlami yemiriladi.

Kontaktli eksponerlash (yoritish)

Integral sxema (IS) larni yaratish jarayonida fotolitografiya jarayoni bir necha marta takrorlanadi. Ikkinchi fotolitografiyadan boshlab fotoshablondagi rasm bilan I – fotolitografiyada yarimo'tkazgich plastinka-taglikda hosil qilingan rasmni moslashtirish zarur bo'ladi. Moslashtirishni eksponerlashni amalga oshiruvchi qurilmada mikroskopda kuzatib turib oldingi fotolitografiyada yarimo'tkazgich plastinkasida hosil qilingan rasm bilan fotoshablondagi rasm fotoshablonni X va Y o'qlari bo'yicha siljitish orqali moslashtiriladi.



9.8-rasm. Kontakli ekspornerlash qurilmasi: a) moslashtirish, b) yoritish. Qurilmaning asosiy qismlari: 1 – ikki sohani ko'ruvchi mikroskop, 2 – fotoshablon o'rnatiladigan ramka, 3 – fotorezist surilgan yarimo'tkazgich plastinka, 4 – ultrabinafsha nurli lampa, 5 – fotoshablon, 6 – sferik asosga ega bo'lgan stol, 7 – havoni surib oluvchi tizim

Fotoshablon bilan fotorezist qatlami yedirilmasligi, chizilib ketmasligi va sinmasligi uchun moslashtirish jarayonida fotoshablon bilan fotorezist oralig'ida 10-30 mkm bo'lgan mikrotirqish qoldiriladi. Moslashtirish aniqligiga bo'lgan talab ortishi bilan kattalashtirish qobiliyati yuqori bo'lgan ($100 - 200\times$) mikroskoplar ishlatiladi, bunda mos ravishda mikrotirqish kichrayadi. Ikki sohani ko'rsatuvchi mikroskop yordamida bir vaqtning o'zida yarimo'tkazgich plastinka yuzasida bir-biridan uzoq ikki sohani ko'rish imkoni tug'iladi.

Mikrotirqish o'rnatilgandan so'ng operator mikroskopda kuzatgan holda nisbatan katta siljishlar bilan qator va ustun chiziqlarini moslashtiradi. So'ngra juda kichik siljishlar bilan moslashtirish uchun ishlatiladigan shakllar moslashtiradi.

Moslashtirish bajarilgandan so'ng fotoshablon bilan yarimo'tkazgichli plastinka vakuum yoki bosim yordamida jipslashtiriladi, ya'ni mikrotirqish yo'qotiladi.

Yorug'lik manbai – lampadan chiqayotgan nur spektridan fotorezistning yorug'likka sezgirlik spektrini ajratib olish uchun yorug'lik filtrlaridan foydalaniladi.

Eksponerlashni bajarish jarayonida yarimo'tkazgich plastinka yuzasidagi fotorezist qatlamining butun yuzasi bir tekis yoritilish uchun yorug'lik nurlarining parallel oqimi 1-5 gacha kvars linzalaridan tashkil topgan kondensor yordamida hosil qilinadi.

Eksponerlash vaqti elektromagnit bilan boshqariladigan yorug'likni to'sgich yordamida $0,05 \div 0,1$ sek tezlik bilan amalga oshiriladi. Eksponerlash vaqti 1 soniyadan 2 minutgacha bo'lgani uchun bu tezlik yoritish vaqtining aniqligi yuqori bo'lishini ta'minlaydi.

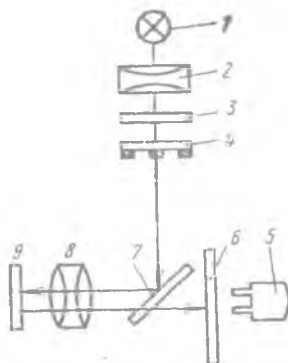
Kontaktli eksponerlashning kamchiliklari: emulsiyali fotoshablonning juda tez yedirilishi tufayli konveyerni tez-tez to'xtatib, fotoshablonni almashtirib turish kerak bo'ladi. Bu kontaktli eksponerlash jarayonini avtomatlashtirish imkonini cheklaydi. Fotoshablon bilan yarimo'tkazgich plastinka jipslashtirilganda fotoshablondagi chang zarralari, shishaning mikrozarralari fotorezist qatlamiga botadi. Fotoshablonga fotorezist zarralari yopishib qoladi. Fotoshablon bilan fotorezist o'rtasiga tushib qolgan ultrabinafsha nurni o'tkazmaydigan har qanday zarra hosil qilinayotgan fotorezistli maskada nuqsonlarning hosil bo'lishiga olib keladi.

Amalda fotoshablon bilan fotorezistni to'liq jipslashtirib bo'lmaydi, chunki yarimo'tkazgich plastinka, ayniqsa, epitaksial qatlamlı egrilangan bo'ladi, ya'ni jipslashtiruvchi sirtlar ideal tekis bo'lmaydi. Jipslashtiruvchi sirtlar orasida begona zarralar mavjud bo'ladi. Yarimo'tkazgich plastinka sirtidagi qatlamlar va fotorezist qatlamlarining qalinligi bir tekis emasli ham nuqsonlar hosil bo'lishiga olib keladi.

Fotoshablon va yarimo'tkazgich plastinka jipslashtirilganda ular orasida qisman havo bo'shliqlari qoladi. Bu yorug'likning difraksiyalanishiga va fotoshablondan fotorezistga ko'chirilayotgan rasm o'lchamlarining kattalashishiga sabab bo'ladi. Shuncha kamchiliklarga qaramay kontaktli eksponerlash usuli texnologiyada keng qo'llaniladi. Chunki yetarli darajada o'rganilgan, narxi arzon va unumdorligi yuqori usul hisoblanadi. Fotoshablon bilan fotorezist jipslashgani tufayli ko'chirilayotgan rasm aniqligi katta bo'ladi.

9.10. Proyeksiyali eksponerlash

Fotoshablondagi rasmning proyeksiyasi maxsus obyektivli optik tizim yordamida fotorezist qatlamiga tushiriladi (yarimo'tkazgich plastinka yuziga surtilgan). Fotoshablon bilan fotorezist surilgan yarimo'tkazgich plastinka bir-biridan uzoq joylashgani uchun fotoshablon yedirilmaydi. Proyeksiyali eksponerlash qurilmasi quyidagilardan iborat:



9.9-rasm. Proyeksiyali eksponerlash qurilmasining tuzilishi:

1 – yorug'lik manbai, 2 – optik tizim (kondensor), 3 – yorug'lik filtrlari, 4 – fotoshablon, 5 – mikroskop, 6 – ekran, 7 – yarim shaffof shisha ko'zgu, 8 – proyeksiyalovchi obyektiv, 9 – fotorezist surilgan yarimo'tkazgich plastinka

Yorug'lik nuri kondensorda yig'ilib, fotoshablonga tushiriladi. Fotoshablondagi rasm yarim shaffof ko'zgu yordamida proyeksion obyektivga va undan yarimo'tkazgich plastinka yuzasidagi fotorezist qatlamiga tushiriladi. Yarimo'tkazgich yuzasidan qaytgan nur obyektiv va shaffof ko'zgu orqali o'tib, ekranga tushadi va mikroskop orqali kuzatiladi. Mikroskopda kuzatib turib, yarimo'tkazgichda oldingi fotolitografiyada hosil qilingan rasm bilan fotoshablondagi rasm moslashtiriladi. Bunda yorug'lik filtrlari yordamida fotorezistga

ta'sir qilmaydigan nur bilan yoritiladi. So'ngra yorug'lik filtrlarini o'zgartirib, fotorezist qatlami eksponerlanadi.

Proyeksion eksponerlashning cheklangan holda qo'llanilishiga sabab:

- katta yuzaga proyeksiyalashda ishlatiladigan yuqori ajratish qobiliyatiga ega bo'lgan obyektivlarni yaratishning murakkabligi;
- barcha texnologik jarayonlarda yarimo'tkazgich plastinka sirtida tekislikni birday ta'minlab bo'lmaydi;
- fotorezist qatlamining qalinligi bir tekislikda va qaytadan shunday qiymatga ko'p marotaba erishishda yuqori talab qo'yiladi

Planar texnologiyada himoyalovchi dielektrik qatlamlar

Himoyalovchi dielektrik qatlamlar yordamida:

- kirishma atomlar lokal sohalarga diffuziya qilinadi;
- integral sxemalarning elementlari bir-biridan izolyatsiyalanadi;
- p - n o'tishlarni tashqi ta'sirlardan himoyalangani.

Himoyalovchi dielektrik qatlamlarga quyidagi talablar qo'yiladi:

– yarimo'tkazgich plastinka-taglikka diffuziya qilinayotgan kirishma atomlari himoyalovchi qatlamdan o'ta olmasligi zarur:

– bu qatlam kimyoviy ta'sirlarga mustahkam bo'lishi va vaqt o'tishi bilan mustahkamligi saqlanishi kerak;

– bir jinsli va nuqsonsiz bo'lishi kerak;

– solishtirma qarshiligi yuqori va elektr maydoniga mustahkam bo'lishi kerak;

– mexanik ta'sirga mustahkam joylashgan bo'lishi kerak.

SiO_2 va Si_3N_4 dielektrik qatlamlarigina bu talablarga to'liq javob berib, sanoatda keng qo'llaniladi.

Yuqori haroratda suv bug'i muhitida kremniy oksidlash

Oksid qatlamning hosil bo'lishi suv molekulasi SiO_2 qatlamdan diffuziyalanib o'tib, kremniy sirtiga yetib kelishi va

kremniy bilan kimyoviy reaksiyaga kirishishi natijasida amalga oshadi:



(SiO_2 : $\epsilon=4$ dielektrik singdiruvchanlik, $\rho=10^{14}$ Om m).

SiO_2 qatlamning strukturasi shakllanishiga reaksiya natijasida hosil bo'lgan vodorod ta'sir qiladi. Vodorod molekulasining diffuziya koeffitsiyenti ($2 \cdot 10^{-6}$ sm²/sek, $T=1050$ °C) suv molekulasining diffuziya koeffitsiyenti ($9 \cdot 10^{-10}$ sm²/sek, $T=1050$ °C) dan sezilarli katta bo'lgani uchun SiO_2 – Si chegarada gidrooksid guruhining ($(\text{OH})^-$ yoki N_2O) hosil bo'lishi nafaqat suv molekulalarining mavjudligi bilan balki, vodorod atomining mavjudligi bilan ham bog'liq.

$T=1100$ °C dan yuqori haroratlarda oksidlanish jarayoni parabola qonuniyati bo'yicha bo'ladi:

$$X^2 = Bt \quad (9.12)$$

Bunda: X – oksid qatlam qalinligi, t – oksidlanish vaqti.

$$B = 2 \cdot \left(\frac{1}{a}\right) \cdot C_1 \cdot V \cdot D, \quad \left[\frac{\text{mkm}^2}{\text{soat}}\right] \quad (9.13)$$

Bunda: a –natural son ($0 < a < 1$); C_1 – oksidlovchi atomlar miqdori, [sm³]; V – oksid qatlam hajmi, [sm³]; D – oksidlovchi atomlarning oksid qatlamidagi diffuziya koeffitsiyenti, [sm²/sek].

$T_{\text{oksid}} < 1100$ °C da oksid qatlam hosil bo'lish qonuniyati paraboladan farq qiladi:

$$X^2 + AX = Bt \quad (9.14)$$

$$A = 2D \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{\delta} \right), \quad [\text{mkm}]$$

Bunda: k – oksidlanish reaksiya tezligining doimiysi [sm/sek]; δ – oksidlovchining oksid qatlamida erish tezligining doimiysi, [sm/sek].

Oksidlanish jarayoni past haroratlarda chiziqli qonuniyatga yaqin o'zgaradi.

$$X_0 = \frac{Bt}{A} \quad (9.15)$$

Oksidlanish tezligining chiziqli o'zgarishi uchun oksidlanish tezligi oksidlanish kimyoviy reaksiyasi tezligiga bog'liq bo'ladi (oksidlovchining diffuziyalanish tezligiga bog'liq bo'lmasdan). Bu qonuniyat past haroratlarda to'laroq bajariladi.

Kimyoviy reaksiya tezligi yarimo'tkazgichdagi bo'sh bog'lar soniga bog'liq bo'ladi. Chunki bo'sh bog'lar suv molekulasini bilan ta'sirlashib, SiO_2-Si chegarada SiO_2 hosil qiladi.

Taglikda (plastinkada) kirishma atomlarining ko'p bo'lishi kimyoviy reaksiya tezligiga yoki oksidlovchi diffuziya koeffitsiyentiga ta'sir qiladi.

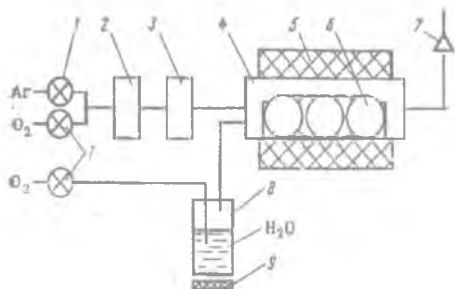
$T = 600 \div 1100$ °C harorat oralig'ida fosfor konsentratsiyasi ko'p bo'lgan plastinka sirtining oksidlanish tezligi sezilarli katta bo'ladi.

Oksidlanish jarayonida o'sayotgan oksid qatlamdan fosfor kremniyni ichkari tomonga siqib chiqaradi. Bor kirishmasi uchun aksincha, o'sayotgan oksid qatlam bor atomlarini tortib oladi. Bu kremniyda oksidlovchi atomlari diffuziyasini tezlashtirishga olib keladi (chunki kremniy qatlamida bor atomi o'rni bo'shab vakansiya hosil bo'ladi). Shuning uchun kremniyda bor miqdori ko'p bo'lsa, past va yuqori haroratlarda oksidlanish tez bo'ladi. Suv bug'ida oksidlash tezligi kristall yo'nalishiga faqat past haroratlarda (parabolik qonuniyatga bo'ysunmaydigan holda) bog'liq bo'ladi.

Kremniyni kislorod muhitida qizdirib oksidlash

Quruq kislorod muhitida oksidlash jarayonida o'sayotgan oksid qatlamdan diffuziyalanib o'tuvchi modda kislorod ionlaridir. Kislorodning SiO_2 qatlamdagi diffuziya koeffitsiyenti ($2,8 \cdot 10^{-14}$ sm²/sek, $T=1050$ °C) vodorod va suvnikiga nisbatan ancha kichik. Shuning uchun bir xil sharoitda suv bug'idagiga nisbatan quruq kislorodda oksid qatlam o'sish tezligi sekin bo'ladi. Oksidlanish

jarayoni faollashish energiyasining kattaligi hamda gidrooksid guruhi (OH)⁻ ning yo'qligi kislorodning kremniy atomi bilan mustahkam bog' hosil qilishiga va o'stirilgan oksid qatlamning strukturasi mukammal bo'lishiga olib keladi.



9.10-rasm. Kremniyni qizdirib oksidlash qurilmasi:

1 – kran; 2 – gaz quritgich: muzlatilgan ushlagichlardan foydalaniladi, kimyoviy yutgichlar; 3 – chang zarralari va mexanik iflosliklarni ushlab qolgich; 4 – ishchi kamera; 5 – qizdirgich; 6 – kremniy plastinkalari; 7 – havoni so'ruvchi (ventilyatsiya); 8 – namlatgich; 9 – qizdirgich

Past haroratlarda oksidlanish kinetikasi ko'proq $\text{Si} - \text{SiO}_2$ chegarasida sodir bo'ladigan oksidlanish reaksiyasining tezligiga bog'liq bo'ladi.

$T < 1000^\circ\text{C}$ lardan boshlab, SiO_2 o'sish qonuniyati chiziqli bo'lib boradi.

9.11. Nam kislorodli muhitda kremniyni qizdirib oksidlash

Bu usul quruq kislorod va suv bug'i muhitida qizdirib oksidlashning oraliq holatidir.

Quritilgan va kirishmalardan tozalangan O_2 suv orqali o'tkazilganda issiq suv bug'lari bilan to'yinadi va uni ishchi kameraga yuboradi. Kislorod gazi tarkibidagi namlik miqdori suvning harorati

va gaz oqimining tezligiga, kremniy plastinkasining sirtini oksidlanish tezligi esa gaz tarkibidagi namlik miqdoriga bog'liq bo'ladi.

Oksidlanish jarayonini sekinlatish uchun kislorod o'rniga argon yoki azot gaz oqimidan foydalanish mumkin (suvning harorati xona haroratida bo'lishi kerak) (9.10-rasm).

Oksidlanishni faollashish energiyasi quruq kislorodda 1,3 eV bo'lib, suv bug'ida 0,8 eV ga teng. Nam kislorodda namlik miqdori ortishi bilan bu energiya 1,3 eV dan to 0.8 eV gacha kamayib boradi.

Sanoatda oksidlashning uch bosqichli usuli qo'llaniladi:

- birinchi bosqichda quruq kislorodda;
- ikkinchi bosqichda nam kislorod yoki suv bug'ida;
- uchunchi bosqich quruq kislorodda.

Bu usulning afzalligi 1 – bosqichda mufassal strukturali yupqa oksid qatlam o'stiriladi, 2 – bosqichda oksid qatlamning o'sish tezligi oshiriladi, 3 – bosqichda yana oksid qatlam yuzasi mufassal strukturali bo'lishiga erishiladi.

Termik qizdirish usuli bilan 1-1,5 mkm qalinlikgacha oksid qatlam o'stirish imkoni mavjud.

Planar texnologiyada himoyalovchi maska sifatida qo'llaniladigan oksid qatlam qalinligi 0.2-0,8 mkm bo'ladi. Oksid qatlamni 0,8 mkm dan qalin olish. uni lokal yemirganda hosil bo'ladigan yon tomonlarining yemirilishi (klin) kattalashib fotolitografiyada kerakli o'lchamdagi shaklni hosil qilishdagi aniqlik kamayadi. Oksid qatlam qalinligi 0.2 mkm dan kam bo'lsa. undagi kovakliklardan kirishma atomlarining o'tib ketish ehtimolligi ortadi.

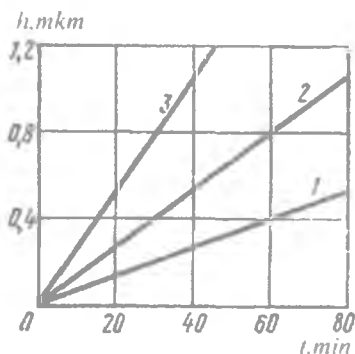
Piroliz yo'li bilan kremniy oksid qatlamini o'stirish

Nisbatan sodda va texnologik jihatdan qulay oksid o'stirish usuli turli xil kremniy organik birikmalarini parchalab, SiO_2 qatlamni kremniy plastinkasi ustida uning ishtirokisiz o'stirishdir. Bu usul afzalligi taglikdagi kirishma atomlarni oksid qatlamga o'tmasligi, ya'ni taglik faol va passiv sohalarni geometrik o'lchamlari va elektr parametrlarini saqlashidir. Oksid qatlam o'stirish nisbatan past haroratda amalga oshiriladi

9.12. Tetraetaksisilan $Si(OC_2H_5)_4$ ning termik parchalanishidan oksid qatlam o'stirish

Tetraetaksisilan $T=700-750^{\circ}C$ da parchalanib, SiO_2 , SiO , CO_2 va organik radikallarga gaz holatida ajraladi. Parchalanish reaksiyasida kislorod manbai bo'lib, tashqi manba emas, tetraetaksisilanning o'zi ishtirok etadi.

Agar parchalanish reaksiyasi taglik joylashgan kamerada amalga oshsa, u holda taglik harorati T_{tag} parchalanish harorati T_{parch} bilan bir xil bo'ladi. Agar taglik boshqa kameraga o'rnatilsa, uning haroratini sezilarli darajada past olish mumkin.



9.11-rasm. Oksid qatlam qalinligi (h) ning oksidlanish vaqtiga bog'liqligi:

1 – parchalanish harorati $T_{parch} = 700^{\circ}C$; 2 – parchalanish harorati $T_{parch} = 725^{\circ}C$; 3 – parchalanish harorati $T_{parch} = 750^{\circ}C$

Kremniy nitrat qatlamini kimyoviy o'stirish texnologiyasi

Kremniy nitrat (Si_3N_4) qatlami kremniy ikki oksidi qatlami (SiO_2) ga nisbatan kirishma atomlarining diffuziyalanishiga kuchliroq qarshilik ko'rsatadi. Shuning uchun to'siq sifatida foydalanishda Si_3N_4 qatlamini SiO_2 ga nisbatan yupqaroq olish mumkin. Bu esa

fotolitografiya jarayonining ajratish qobiliyatini oshirish imkoniyatini beradi.

Si_3N_4 qatlamini kimyoviy o'stirishning bir qancha usullari mavjud:

Kremniyning azot bilan ta'sirlanish reaksiyasi. Kremniy bilan azotni ta'sirlanish reaksiyasi $1100-1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ da amalga oshadi: bunda



reaksiyasi sodir bo'ladi. Si_3N_4 qatlami ochiq usuli bilan olinishi mumkin. Ishchi kameraga Si plastinkasi o'rnatiladi va reaktordan azot gaz oqimi o'tkaziladi. $T=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ va azot gaz oqimi $300\text{ sm}^3/\text{min}$ bo'lganda kremniy plastinkasi yuzasida Si_3N_4 qatlam hosil bo'ladi.

9.13. Bipolyar integral sxemalarni tayyorlash texnologiyasi

Bipolyar integral sxema elementlari bir-biridan va taglikdan izolatsiyalangan sohalarda hosil qilinadi. Ko'pgina integral sxemalar uchun dastlabki material sifatida yashiringan n – sohalarga ega bo'lgan epitaksial qatlamli yarimo'tkazgich plastinkalari ishlatiladi. Yashiringan n – soha kollektor qarshiligini kamaytirish uchun xizmat qiladi. Bitta texnologik jarayonda tranzistorlar, diodlar, rezistor va kondensatorlar hosil qilinadi. Texnologik jarayon so'ngida metallash jarayoni bajariladi: bunda faol sohalarga kontaktlar (tutashuvlar), tok o'tkazuvchi yo'llar, tashqi oyoqchalarga ulanadigan kontakt maydonchalari hosil qilinadi.

Himoyalovchi maska sifatida SiO_2 qatlam hosil qilinadi. SiO_2 qatlam akseptorli kirishmalardan faqat bor (B) atomlari uchun to'siq bo'lishi mumkin. Al , In va Ga SiO_2 qatlamda tez diffuziyalanadi. Bu atomlar uchun to'siq vazifasini kremniy nitrat (Si_3N_4) qatlami bajaradi.

Donorli aralashmalardan ko'pincha fosfor ishlatiladi. U surma va mishyakka nisbatan katta diffuziya koeffitsiyentiga ega va surmaga nisbatan kremniydagi eruvchanligi katta.

Akseptorli aralashmalarga nisbatan donorli aralashmalar kremniyda sekinroq diffuziyalanadi va bir tekis taqsimlanadi. Shuning uchun kremniyli $n-p-n$ tranzistorlar $p-n-p$ ga nisbatan ko'proq tarqalgan. Emitter sohaslarini hosil qilish uchun fosfordan

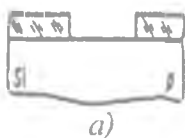
foydalaniladi, chunki fosforning eruvchanligi katta bo'lganligi uchun (10^{21}sm^{-3}) injeksiya koeffitsiyenti yuqori bo'ladi. n^+ – emitter sohalarini hosil qilish bilan bir vaqtda kollektor sohasining kontakt hosil qilinadigan qismida ham n^+ – soha hosil qilinadi, bu soha kontakt qarshiligini kamaytirishga xizmat qiladi.

Elementlari $p-n$ o'tish sohalari bilan izolyatsiyalangan bipolyar integral sxema texnologiyasi

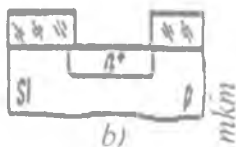
Epitaksial qatlamning butun qalinligiga diffuzion usul orqali izolyatsiya hosil qilinadi. Diffuziya natijasida tagidan va yon tomonlaridan $p-n$ o'tish sohasi bilan chegaralangan cho'ntaklar hosil bo'ladi. Mikroshema ishlayotganda taglikka eng katta manfiy potensial beriladi. Shuning uchun $p-n$ o'tish sohasi qarshiligi keskin ortib ketadi va cho'ntaklarda hosil qilingan elementlar (tranzistor, diod, va h.k.) o'zaro va taglikdan izolyatsiyalangan bo'ladi.

Texnologik jarayon 2 bosqichdan iborat:

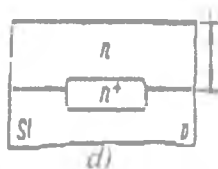
- n^+ – sohali epitaksial strukturani tayyorlash;
- hosil qilingan strukturada bipolyar IS tayyorlash.



$p-Si$ taglikda termik oksidlash usuli bilan SiO_2 qatlam hosil qilish va fotolitografiya yordamida SiO_2 qatlamda darcha ochish

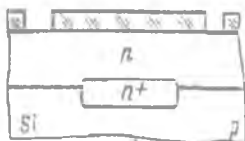


Diffuziya yordamida darcha bor joylarda n^+ – sohani hosil qilish

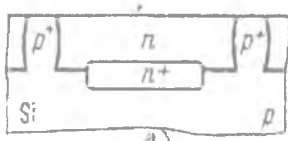


SiO_2 qatlamni yemirib tashlab, epitaksial Si qatlami (n_0) ni o'stirish

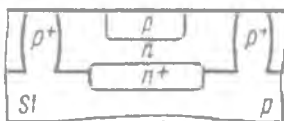
9.12-rasm. n^+ – sohali epitaksial strukturani tayyorlash



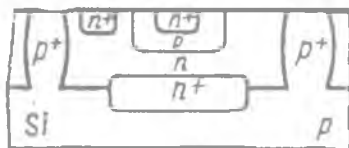
Strukturada termik oksidlash usuli bilan SiO_2 qatlam hosil qilish. Fotolitografiya yordamida SiO_2 qatlamda darcha ochish



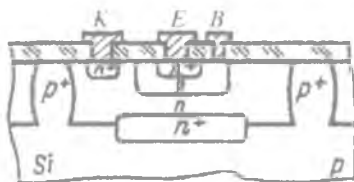
Epitaksial qatlam (n)ning darcha ochilgan joylarida diffuziya bo'lib, p^+ -sohalar hosil qilish. Natijada $p-n$ o'tish bilan o'ralgan cho'ntak hosil bo'ladi



Hamma cho'ntaklarda bir vaqtda tranzistor hosil qilish. Buning uchun termik oksidlab, SiO_2 qatlam hosil qilinadi va fotolitografiya yordamida darcha ochiladi hamda akseptorli kirishma atomlari diffuziya qilinib, bipolyar tranzistorning bazasi (p – soha) hosil qilinadi



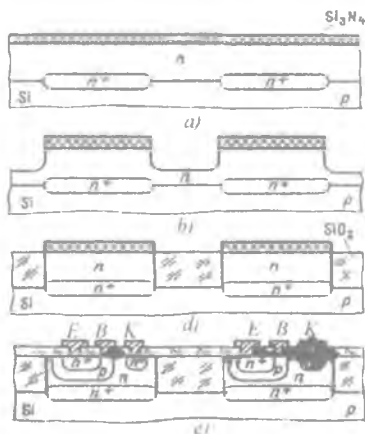
Termik oksidlab SiO_2 qatlam hosil qilib, fotolitografiya yordamida emitter va kollektor kontakt sohalari uchun donorlar alashmasini diffuziya qilish uchun darcha ochiladi. Diffuziya jarayonida n^+ – emitter va n^+ – kontakt sohasi hosil bo'ladi.



Termik oksidlab SiO_2 qatlam hosil qilinadi. Vakuumdagi qizdirib uchirish usuli bilan Al qatlami hosil qilinadi. Fotolitografiya yordamida Al qatlami faqat "E", "B", "K" sohalarida, tok oquvchi yo'للchalarda va kontakt maydonchalarida qoldirib, qolgan joylardagi Al qatlami yemirib olib tashlanadi

Kombinatsiyali izolyatsiyalangan bipolyar integral sxema

Kombinatsiyalangan izolyatsiyada cho'ntakning tagini p - n o'tish bilan va yon tomonlarini dielektrik qatlam bilan izolyatsiyalash tushuniladi.

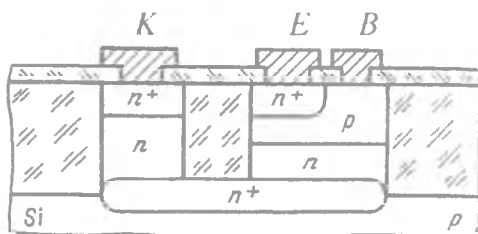


9.13-rasm. "Izoplanar I" texnologik jarayon asosida integral sxema tayyorlash: a) Si_3N_4 qatlamni termik o'stirish, b) fotolitografiya va lokal yemirish, d) lokal termik oksidlash, e) Si_3N_4 maskani olib tashlash, cho'ntaklarda, bipolyar tranzistor hosil qilish va metallash.

“Izoplanar-I” jarayoni kremniy epitaksial qatlami butun qalinligi bo‘yicha lokal oksidlash texnologiyasidir. Bunda epitaksial qatlam qalinligi 1 mkm dan oshmasligi kerak, chunki 1 mkm dan qalin oksid (SiO_2) o‘stirish jarayoni juda sekin bo‘ladi. 1mkm qalinlikgacha oksid qatlam tez o‘radi(chiziqli), so‘ngra sekin o‘radi(parabola qonuniyati bo‘yicha).

Kontaktning pastki qismida izolyatsiya qilib yashirilgan n – soha bilan p – Si taglik o‘rtasidagi n - p o‘tish sohasi hosil bo‘ladi. Kremniyni lokal yemirish va oksidlashda bir marta o‘stirilgan himoyalovchi Si_3N_4 qatlamdan foydalaniladi. Bu texnologik operatsiyalar sonini kamaytirishga yordam beradi.

“Izoplanar-II” jarayonida bipolyar tranzistorning emitter sohasi yon tomondagi izolyatsiyalovchi SiO_2 qatlamga chiqadi.



9.14-rasm. “Izoplanar II” texnologik jarayoni asosida tayyorlangan integral sxema

Kollektor sohasining kontakt osti n – sohasi alohida cho‘ntakda joylashgan bo‘lib, emitter-baza joylashgan cho‘ntak bilan n – yashiringan soha orqali tutashadi.

Bu texnologik jarayonda moslashtirishga bo‘lgan talab ancha susayadi. Chunki emitter sohasini hosil qilish uchun ochilgan darchani yon tomondagi izolyatsiyalovchi SiO_2 qatlamga surish mumkin, aralashma SiO_2 qatlamga diffuziyalanmaydi. Baza sohasini hosil qilish uchun cho‘ntakning hamma yuzasiga diffuziya qilinadi.

Izoplanar texnologiya planar va meza texnologiyaning afzalliklarini o‘zida jamlagan, ya‘ni planar texnologiyada hosil qilingan p - n o‘tish chekkalarida mavjud bo‘ladigan elektr

maydonining notekis taqsimotidan qutilish mumkin, strukturalar faol sohalar o'rtasidagi parazit sig'imlarni kamaytirishi mumkin bo'ladi. Bunda izolyatsiya sifati va integral sxema integratsiya darajasi ortadi.

9.14. Metall – Oksid –Yarimo'tkazgich (MOYa) - struktura asosidagi integral sxemalarning texnologiyasi

MOYa – strukturalari integral sxema planar va epitaksial - planar texnologiya yordamida tayyorlanadi. MOYa tranzistorlar konstruksiyasi sodda va elementlari o'z-o'zidan izolyatsiyalangan bo'lgani uchun umumiy texnologik jarayonlar soni bipolyar integral sxemalar texnologiyasidagiga nisbatan kam bo'ladi. Bu ishlab chiqarish unumdorligining oshishiga (yaroqsiz integral sxemalar soni kamayishiga) va integral sxemalar narxining arzonlashuviga olib keladi.

MOYa integral sxemalarining texnologiyasidagi eng murakkab va muhim jarayonlar:

- zatvor osti oksidini hosil qilish;
- zatvor bilan kanalni aniq moslashtirish;
- kanali juda qisqa bo'lgan MOYa integral sxemalarni tayyorlash.

Zatvor osti oksidi – MOYa integral sxemalarning faol elementining asosiy qismi bo'lib, unga qo'yiladigan talab to'siq sifatida ishlatiladigan oksid qatlam SiO_2 ga quyiladigan talabdan ancha yuqori bo'ladi, masalan:

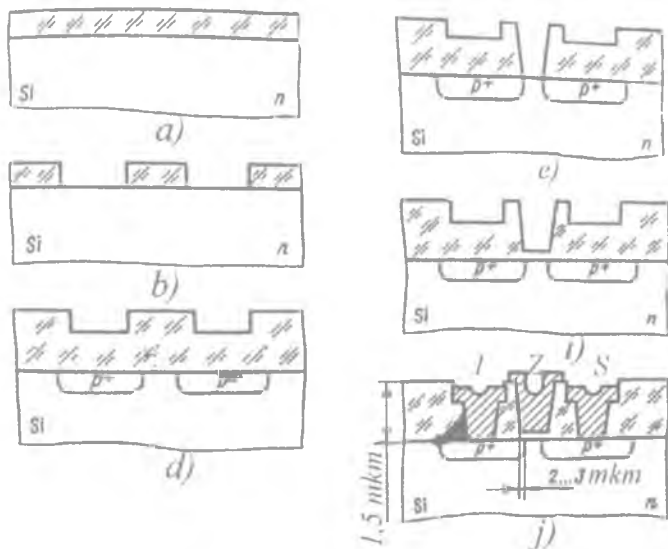
- elektr maydonga chidamliligi katta bo'lishi kerak;
- SiO_2 hajmida va $Si-SiO_2$ tizim chegarasida zaryadlar miqdori kam bo'lishi kerak;
- xossalari o'ta turg'un bo'lishi kerak.

Kremniyga odatda [100] kristall tekisligida sirt zaryarlar zichligi: $1.4 \cdot 10^{-8}$ kl/sm², ga [111] da $8 \cdot 10^{-8}$ kl/sm² ga teng bo'ladi. Shuning uchun Si li MOYa – integral sxemani [100] tekislikda hosil qilish maqsadga muvofiqdir. Zatvor istok va stok sohalarini qoplamasligi kerak, aks holda parazit sig'imlar hosil bo'lib, integral sxemaning tezkorligini pasaytiradi. Agar zatvor uzunligi kanal uzunligidan kalta bo'lsa, istok - stok zanjiri uzilib qoladi. Kanal uzunligiga tok tashuvchilarning istokdan stokga borish vaqti, ya'ni MOYa – integral

sxemaning tezkorligiga bog'liq bo'ladi. MOYa – integral sxemalar tezkorligi oshsa, ularning qo'llanish sohasi kengayadi va bitta element egallagan joyning kamayishi hamda texnologiyaning soddaligi integral sxema integratsiya darajasi keskin o'ttirish imkonini beradi. MOYa – strukturalar katta va o'ta katta integral sxemalarning asosini tashkil qiladi.

Qalin oksidli p– MOYa– integral sxema va n– MOYa– integral sxemalarni tayyorlash texnologiyasi

p – kanalli MOYa – integral sxemalar planar texnologiya asosida tayyorlanadi. Lokal diffuziya va qalin oksid qatlam o'tirishni bir vaqtda yoki alohida-alohida bajarish mumkin. Ikkinchi holda oksid qatlam bug'-gaz muhitida o'tiriladi.



9.15-rasm. p – kanalli MOYa – integral sxema texnologiyasi:
a) oksidli maska o'tirish, b) birinchi fotolitografiya, d) nuqtaviy diffuziya va qalin oksid qatlam o'tirish, e) kkinchi fotolitografiya, i) yupqa zatvor osti oksidini o'tirish, j) uchinchi fotolitografiya, zatvor va metallash

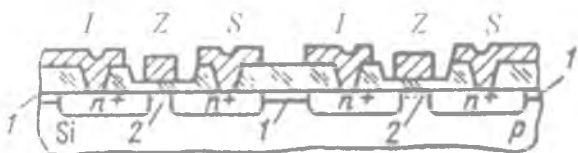
Istok va stok sohalari ustidagi oksid qalinligi 1mkm, boshqa sohalarida 1,5 mkmga teng.

Texnologiya jarayonining murakkab qismi yupqa oksid qatlam o‘stirish uchun darcha ochish (2 – fotolitografiya) va qalin oksid qatlamni yemirish (3 – fotolitografiya) hisoblanadi. Metall qatlamning tagida qalin oksid hosil bo‘lgani uchun integral sxema parametrlari sezilarli yaxshilanadi. Lekin qalin oksid qatlam bo‘lganda istok va stok sohalarining zatvor bilan qoplanishini juda kichik qilib olish qiyin, chunki zatvor bilan kanalni moslashtirish fotolitografiya bilan bajariladi va:

1) istok va stok yon tomonlaridagi p - n o‘tish sohalari o‘rni noaniq;

2) qalin oksid qatlami yemirishda aniqlik yo‘qoladi (2 – fotolitografiya).

Zatvor osti oksidining qalinligi 0,1 mkm bo‘lganda kanal bilan zatvorning qoplanishi 2-3 mkm bo‘ladi. Bu murakkabliklarga qaramay p – MOYa – integral sxemalar tayyorlash texnologiyasi nisbatan oddiy, yaroqsiz integral sxemalar chiqishi kam, tannarxi arzon hisoblanadi. p – MOYa – integral sxemalar kalkulyatorlarda ko‘p ishlatiladi.



9.16-rasm. n – kanalli qalin qatlamli MOYa integral sxema: 1 – p^+ soha, elementlarni bir-biri bilan izolyatsiyalash imkoniyatini cheklamaslik uchun hosil qilingan soha; 2 – p^- soha, tranzistorning ochilishi uchun kerak bo‘ladigan kuchlanishga ta‘sirini cheklaydigan soha

Unga nisbatan n – MOYa – integral sxemalarni tayyorlash texnologiyasi murakkabroq. Chunki hosil bo‘ladigan n – inversiya sohalar elementlarning o‘zaro izolyatsiyasiga va tranzistorlarning ostona kuchlanishi (porogovoe napr.)ga ta‘sir qilmasligi uchun maxsus choralar ko‘riladi.

n – MOYa – integral sxema texnologiyasining p – MOYa – integral sxemalikidan farqi istok va stok sohalar hosil qilingandan so‘ng ularning sirt tomonidan bor ionlari implantatsiya qilinadi. Qalin oksid qatlam o‘stirish jarayonida bor ionlari faollashib, n^- – soha hosil qiladi. Bu soha oksid qatlam ostida p – inversiya sohani hosil bo‘lishiga yo‘l qo‘ymaydi va elementlar bir-biridan izolyatsiyalanib turadi.

9.15. Komplementar MOYa–KNS– integral sxema

Bunday strukturali integral sxemalarda parazit sig‘imlar va sizib o‘tuvchi toklar kichik bo‘ladi.

Elementlar o‘lchamining va ichki sig‘imining kamayishi integral sxemalarning tezkorligini, radiatsiyaga chidamliligini, integratsiya darajasini keskin oshiradi, quvvat sochilishining kamayishiga olib keladi.

Taglik sifatida ishlatiluvchi sapfir bilan epitaksial qatlamdagi kremniy strukturalari bir-biriga mos kelmaganligi tufayli, sapfir yuzasida epitaksial qatlam o‘stirishdan oldin yaxshilab ishlov beriladi. Kremniyli tagliklardan farqli ravishda sapfirli tagliklar yuqori haroratlarda ishlov berilganda deformatsiyalanmaydi. Hamda ularning yaroqsiz bo‘lganlarini qayta ishlash mumkin.

Sapfirli taglikda kremniy epitaksial qatlamining o‘stirilishi (kremniy sapfir ustida geteroepitaksial struktura KNS)

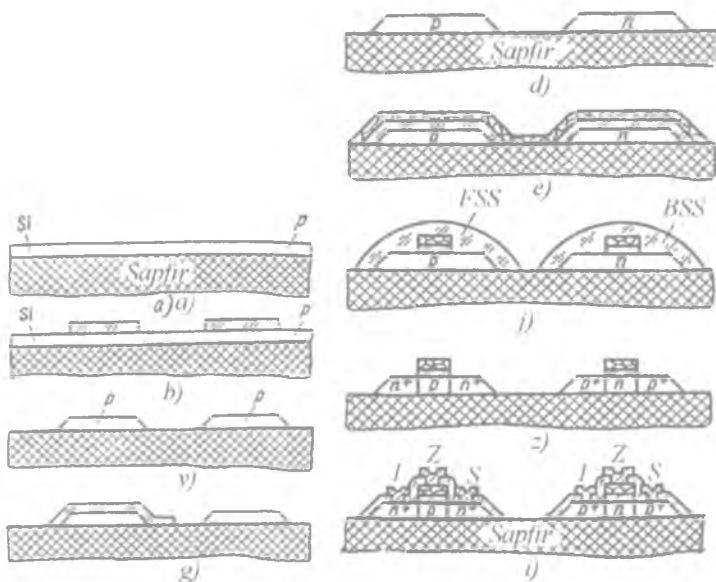
Kremniy sapfir ustida struktura yuzasida p – va n – Si li orolchalar hosil qilinib, bu orolchalarda n – va p – kanalli MOYa tranzistorlari yaratiladi.

KMOP – KNS – integral sxema (komplementarmetal – oksid – yarimo‘tkazgich tranzistori sapfir tagli ustida hosil qilingan integral sxema) larning keng qo‘llanilishiga to‘sqinlik qiluvchi asosiy faktorlar:

- sapfir narxining qimmatligi;
- taglik qattiq bo‘lgani uchun mexanik ishlov berishning murakkabligi;

– sapfir kristall strukturasi Si nikidan farq qilgani uchun epitaksial qatlam o‘stiradigan yuzasini tayyorlashga qo‘yiladigan talablarning juda yuqoriligi.

Shuning uchun amorf tagliklarda kremniy epitaksial qatlami strukturalari yaratiladi.



9.17-rasm. KNS – MOYA – integral sxematexnologiyasi: a) KNS struktura yuzasini tozalash; b) SiO_2 maskasini hosil qilish; v) maskani lokal yemirish; g) bittasiga maska hosil qilish va ikkinchisiga P ni diffuziya qilish; d) maskani olib tashlash; e) yupqa zatvor osti dielektrik qatlamini va polikristall kremniy qatlamini hosil qilish; j) fotolitografiya PCC va BCC shishalarini surish; z) diffuziya qilish va shishani olib tashlash; i) metallash

Integral sxemalarni metallash

Yarimo‘tkazgich strukturalarni yaratishning oxirgi jarayoni metallash bo‘lib, hozirgi davrda ishlab chiqarishda qo‘llaniladigan metallash jarayonini quyidagi turlarga bo‘lish mumkin:

- bir qatlamli;
- ko'p qatlamli;
- ko'p qavatli.

Bir qatlamli Al li metallash kichik va o'rta integratsiya darajasiga ega bo'lgan, kam quvvatli, 1 GGt chastotagacha ishlovchi, chidamliligi katta bo'lmagan integral sxemalarda qo'llaniladi. Boshqa metallarga nisbatan Al metallashga qo'yiladigan talablarga ko'proq javob beradi. Al yuqori elektr o'tkazuvchanlikka ega, p - va n - Si ga qarshiligi kichik bo'lgan kontakt hosil qiladi, Si ga adgeziyasi yaxshi (SiO_2 ga ham). Ishlatish qulay, arzon, egiluvchan bo'lib, harorat o'zgarishiga chidamli. Al metalli integral sxemalar radiatsiyaga chidamli hisoblanadi.

Al li metallash texnologiyasi jarayoniga quyidagilar kiradi:

Avval hosil qilingan struktura ustiga SiO_2 to'siq o'stiriladi, bu to'siqda fotolitografiya yordamida darchalar ochiladi (kontakt qilinadigan sohalarda). Darchalarda Al qatlamini olish uchun vakuumda Al qizdirib-uchiriladi (magnetron changlatish yoki bug'-gaz muhitidan o'stirish usullaridan foydalanish mumkin).

Vakuumda qizdirib-uchirish usuli bilan sifatli va toza Al qatlamini hosil qilish qiyin. Al metallining sirtida alyuminiy oksid qatlami bo'lib, Al ning bug'lanishiga to'sqinlik qiladi. Shuning uchun Al ni yuqori haroratda qizdirib eritish kerak. Erigan Al eritgichning materiali bilan uchuvchi birikmalar hosil qiladi.

Elektron – nur bilan bug'latib hosil qilingan Al qatlami nisbatan toza bo'lib, mehnat unumdorligi oshadi, lekin qurilmaning konsruksiyasi murakkablashadi. Tigel sifatida ishlatiluvchi materiallardan bor nitrati (BN), alyuminiy nitrati va bor titan asosidagi tigillar (TiB) alyuminiy eritmasi bilan kam ta'sirlashadi. Bu tigellar induksion toklar (yuqori chastotali) bilan qizdirilsa, ko'pga chidaydi.

Magnetron changlatish usuli Al qatlami hosil qilish tezligi katta (1 mkm/soat) va sifatli bo'lgani uchun hozirgi davrda bu usul keng qo'llanilmoqda.

Al qatlami bug'-gaz muhitida o'stirishni hozirgi davrda laboratoriya sharoitida qo'llanilmoqda.

Al qatlami hosil qilish sharoitlari (holatlari) shunday tanlab olinadiki, metallanish qatlam adgeziyasi yaxshi va qatlami tartibli

strukturaga ega bo'lishi kerak, Al qatlami tagidagi SiO_2 – qatlamda elektr zaryadi eng kam bo'lishi talab etiladi. $Si - SiO_2 - Al$ tizimda mexanik kuchlanishlar eng kam bo'lishiga erishish kerak.

Al qatlamidan fotolitografiya yordamida faol sohalarga kontakt maydonchalarini va tok oquvchi yo'lchalarning topologiyasini hosil qilishda keng foydalaniladi.

Fotorezistli to'siqni olib tashlash uchun kislotalardan foydalanish mumkin emas. Fotorezist qaynoq dimetil formamidda yoki kislorod plazmasida olib tashlanadi. Al li metallashning kamchiliklari:

- qattiq fazada kremniy Al da ko'p eriydi ($T=500\text{ }^{\circ}C$ da 1% gacha), sovitilganda erigan kremniy atomlari kontakt chegaralaridagi sohalarga o'tirib, kontaktning mexanik mustahkamligini kamaytiradi;

- past evtektika haroratiga ega $Al - Si$, $577\text{ }^{\circ}C$;

- yumshoqligi tufayli mexanik mustahkamligi past;

- Al ning chiziqli kengayish harorat koeffitsiyenti Si da SiO_2 nikidan katta:

- $45^{\circ}C$ dan boshlab SiO_2 bilan kimyoviy ta'sirlasha boshlaydi va $500^{\circ}C$ da ta'sirlashish juda tezlashadi:



- kislota va ishqorlarga chidamliligi past, korroziyalanadi;

- yuqori haroratlarda Au bilan mo'rt intermetall birikmalar Au_2Al , $AuAl_2$ hosil qiladi. Bu birikmalarning hosil bo'lish jarayonida Al oltin ichiga, Au alyuminiy ichiga diffuziyalangandan ko'ra tezroq diffuziyalanishi natijasida bo'shliqlar va yoriqlar hosil bo'ladi. Bu Al kontakt maydonchasiga oltin simini kovsharlangan joylar mustahkamligini yanada susaytiradi. Au ning Al bilan hosil qilgan intermetall birikmalari Si ni eritadi;

- Al qatlamiga metall simlarni payka qilib bo'lmaydi;

- Al qatlami elektroliz usuli bilan olib bo'lmaydi.

Ko'p qatlamli metallash

Kontakt qatlam – kremniyda hosil qilinadigan birinchi qatlam bo'lib, bu qatlam kremniyga kam kiradigan, kremniy bilan maqsadga

muvofig bo'lmagan ta'sirlashuvda bo'lmaydigan, kremniyda kam eriydigan va diffuziya koeffitsiyenti kichik, shu bilan birga kremniyga va SiO_2 ga yaxshi adgeziyalanuvchi, kontaktdan tok o'tish qarshiligi kichik bo'lgan metall bo'lishi kerak. Bu qatlamni olishda *W, Mo, Cr, Ni, Al, Ti, Pd* kabi qiyin eruvchi metallarning kremniy bilan birikmasi, polikremniy, *Pt* va *Pd* ning kremniy bilan birikmasi ishlatilishi mumkin. Qiyin eruvchi metallarning kremniy bilan birikmasi polikremniyga nisbatan 10 marta katta elektr o'tkazuvchanlikka ega. Termik ishlovlarga chidamli, xossalari o'zgarmas bo'lib, bunday birikmalarni hosil qilish integral sxemalarni tayyorlash texnologiyasi bilan mos tushadi.

Silitsid birikmalar qatlami quyidagi usullar bilan olinadi:

- silitsid nishonli katodli changlatish bilan;
- vakuumda bir vaqtda metall va *Si* ni qizdirib, uchirish bilan;
- bug'-gaz muhitdan o'tkazish bilan;
- qiyin erituvchi metall qatlami *Si* da hosil qilinib, so'ngra qizdirish yo'li bilan, masalan, lazer nurlari bilan.

Tok oquvchi qatlam – eng oxirida hosil qilinadigan qatlam bo'lib, yaxshi elektr o'tkazuvchanlikka ega bo'lishi kerak. Kontakt maydonchalarini integral sxema oyoqchalariga sifatli va mustahkam ulanishini ta'minlash kerak. Bu qatlam uchun mis, alyuminiy, oltin ishlatiladi.

Ikki qatlamli tizimlarda *Al* li metall qatlami eng katta tok zichligi va ishlash vaqtining ko'pligi bilan bir xil sharoitda ishlatilgan boshqa xil qatlamlardan farq qiladi.

Ajraturvchi (himoyalovchi) qatlam – kontakt qatlam bilan tok oquvchi qatlam metallari o'zaro kimyoviy ta'sirlashadigan hollarda ular o'rtasida himoyalovchi qatlam sifatida hosil qilinadi. Bu qatlam *Cr* bilan *Au*, *Ti* bilan *Au*, *Cr* bilan *Cu* o'rtasida hosil qilinadi. Himoyalovchi qatlam bir qatlamdagi metallning ikkinchi qatlamga diffuziyasiga to'siq vazifasini ham bajaradi. Chunki bunday diffuziya kontaktning qarshiligi o'zgarishiga va mexanik mustahkamligining kamayishiga sabab bo'ladi. Ajratuvchi qatlam sifatida kumush, oltin, molibden, volfram, nikel, palladiy ishlatiladi.

Ko'p qavatli metallash

Bu usul katta va o'ta katta integral sxemalarni olish texnologiyasida qo'llaniladi. Integral sxemalarda elementlar sonining ortishi elementlar ulanadigan maydonlarning ortishiga olib keladi. Shuning uchun elementlarni ulovchi yo'lchalarni bir necha o'zaro izolyatsiyalangan qavatlarda hosil qilinadi va kerakli joylar o'zaro ulangan bo'ladi. Ko'p qavatli tizimlarning metall qoplamalari bir qatlamli va ko'p qatlamli bo'lishi mumkin va bir qavatli tizimlarning talablariga javob berishi kerak.

Izolyatsiyalovchi dielektrik qatlamlar katta teshilish kuchlanishiga ega bo'lishi kerak. Dielektrik doimiysi kichik, tagidagi va ustidagi qatlamlar bilan kimyoviy ta'sirlashuvi kuchsiz, mexanik kuchlanishlar darajasi past hamda elektr zaryadlar zichligi kam bo'lishi kerak.

Metallash texnologiyasi quyidagilardan iborat:

- qavat metallash hosil qilingandan so'ng izolyatsiyalovchi qatlam hosil qilinadi, bu qatlamda pastki qavat bilan ustki qavatni tutashtiruvchi darchalarni ochish;

- ikkinchi qavat metallashni hosil qilish. Ko'pgina katta integral sxemalarda *Al* li metallash ishlatiladi, izolyatsiyalovchi qatlam sifatida *SiO₂*, *Al₂O₃*, *Si₃N₄* va boshqalar ishlatiladi.

Al – SiO₂ – Al metallash integral sxemalarni tayyorlash texnologiyasiga yaxshi moslashadi.

Al– Al₂O₃– Al metall qatlam mustahkam bo'ladi. *Al₂O₃* qatlam izolyatsiyalovchi xususiyatlari yaxshiroq bo'lib, natriy ionlarini o'tkazmaydi, atmosfera ta'siriga, ya'ni suv bug'lari va radiatsiyaga chidamli hisoblanadi.

Al₂O₃ qatlami $T=300\text{ K}$ da *Al* qatlamini anodli oksidlash asosida hosil qilinadi.

Hajmiy kontakt oyoqchalar. Bir vaqtning o'zida elementlarning faol sohalariga kontaktlar va kontakt oyoqchalar vazifasini bajaradi, ya'ni kontakt maydoncha va kontakt oyoqcha yaxlit bitta bo'ladi. Hajmiy kontakt oyoqchalar gibrid integral sxemalarda hosil qilinadi.

9.16. Gibril integral sxemalar tayyorlashning texnologik jarayonlari

Qatlamli integral sxemalardagi elementlar dielektrik taglikda yupqa qatlamlar hosil qilib tayyorlanadi. Taglik integral sxemaning mexanik asosi bo'lib xizmat qiladi.

Hozirgi davrda yupqa qatlamli texnologiya asosida faqat passiv elementlar, ya'ni integral sxemaning rezistorlari va kondensatorlari tayyorlanadi.

Qatlamli integral sxemalarni tagligiga diskret faol elementlar diod, tranzistor, yarimo'tkazgich integral sxemalar o'rnatilsa, bunday qatlamli integral sxemalar **gibril integral sxema (GIS)** lar deyiladi.

Gibril integral sxemalarning passiv (rezistor, kondensator) va faol (diod, tranzistor, yarimo'tkazgich integral sxema)elementlari bir-biriga bog'liq bo'lmagan alohida texnologik jarayonlarda tayyorlanadi. Bu gibril integral sxemalarning quyidagi ustunligini ta'minlaydi:

- tayyorlash texnologiyasi soddalashadi;
- kam mehnat sarf qilinadi;
- ishlab chiqarish jarayoni qisqaradi;
- tannarxi arzon bo'ladi.

Katta GIS larda faol elementlar sifatida yarimo'tkazgichli integral sxemalardan foydalanish, passiv elementlarni ko'p qavatli joylashtirish tizimidan foydalanish va ularni yaratish imkoniyatlarini kengaytiradi.

Taglik sifatida ishlatiluvchi materiallar

Taglik materialining xossalari qatlamli elementlarning parametrlari va tavsiflariga ta'sir qilmasligi kerak. Taglik sifatida ishlatiladigan materiallar:

- Borsilikatli shisha – SiO_2 (80%). B_2O_3 (12%) va boshqalar (Na_2O , K_2O , Al_2O_3);

- Alyumosilikatli shisha – SiO_2 (60%), Al_2O_3 (20%) va boshqa oksidlar (Na_2O , CaO , MgO , B_2O_3);

- “Polikor” turdagi alyumooksid keramika – Al_2O_3 (99,8%), B_2O_3 (0,1%), MgO (0,1%);

- Berilliy keramikasi – BeO (98% – 99,5%).

- *Sitallar*– shisha keramik materiallar bo‘lib, shishaga haroratli ishlov berish (kristallash) orqali olinadi. Sitallarning tarkibi quyidagi oksidlardan iborat bo‘ladi:

- 1) $\text{Li}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{TiO}_2$

- 2) $\text{RO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{TiO}_2$ ($\text{RO} - \text{CaO}$, MgO yoki BaO lardan biri).

- *Sapfir*– Al_2O_3 ning α - modifikatsiyasi bo‘lib, toza monokristall materialdir.

Bu materiallarni o‘zaro solishtirib, quyidagi xulosani qilish mumkin:

Shishalar – mexanik mustahkamligi kam va kimyoviy ta’sirga chidamsiz, qizdirilganda kuchli gaz ajralib chiqadi. Ishqoriy metallarning oksidlari bo‘lgani uchun tashqi elektr maydon qo‘yilganda ko‘chib yuradigan ishqoriy metall ionlari hosil bo‘lishi mumkin. Bu ko‘chib yuruvchi ionlar taglikning hamda integral sxema elementlarining (rezistor va kondensator) xossalari turg‘un bo‘lmasligiga sabab bo‘ladi. Shishaning issiqlik o‘tkazuvchanligi kichik.

Keramika – ayniqsa berilliy keramikasi shishaga nisbatan yuqori issiqlik o‘tkazuvchanlik va mexanik mustahkamlikka ega. Keramik materiallarning zarralari o‘lchami katta bo‘lgani sababli yupqa qatlamli integral sxemalar uchun zarur bo‘lgan sillik sirtini olishda (mikrorelf) qiyinchiliklar mavjud. Shuning uchun ko‘proq qalin qatlamli integral sxemalarga taglik sifatida ishlatiladi.

Sitallar – mexanik mustahkamligi shishadan 2÷3 marta yuqori. Yaxshi presslanadi, tortiladi, prokatlanadi. Dielektrik xossalari ham shishadan yaxshi va keramika bilan deyarli bir xil.

Sapfir – dielektrik xossalari juda yaxshi, lekin sitallarga nisbatan narxi qimmat.

Dielektrik va mexanik xossalari, sirt mikrorelfi, kimyoviy ta’sirga chidamliligi bo‘yicha yupqa qatlamli integral sxemalar uchun

eng yaxshi taglik material uchun sitallar, qalin qatlamli integral sxemalar uchun esa 96% li alyumooksid keramikasi hisoblanadi.

Yupqa qatlamli integral sxemalarda yupqa qatlamni olish uchun ishlatiladigan materiallar

Yupqa qatlamli rezistorlar tayyorlash uchun ishlatiladigan materiallarni uch guruhga bo'lish mumkin:

- metallar;
- metall qotishmalar;
- metall – dielektrik aralashmalar – kermetlar.

Yupqa qatlamli metalli rezistorlarni tayyorlashda xrom (*Cr*) va tantal (*Ta*) ishlatiladi. Tantalning ko'p qo'llanilishiga sabab kimyoviy anodlash usuli bilan oson oksidlashi mumkin. Tantal qatlamini qisman oksidlab rezistor qalinligini kamaytirish va bir vaqtda himoyalovchi qatlam sifatida foydalanish mumkin. Ayrim aralashma atomlari kiritilganda tantal qatlamning elektr qarshiligi keskin ortadi va elektr qarshilikning harorat koeffitsiyentining qiymati kichikligicha qoladi. Aralashma sifatida azot ishlatilganda yaxshi natija beradi.

Yarimo'tkazgich materiallar qatlamlarining elektr qarshiligi harorat koeffitsiyenti katta manfiy qiymatga ega bo'lgani uchun qatlamli rezistorlarni yaratishda ishlatilmaydi. Qatlamli rezistor yaratishda solishtirma qarshiligi katta bo'lgan metall qotishmalardan nikel bilan xrom qotishmasi – nixrom ($\rho \approx 10^{-4} \text{ Om}\cdot\text{sm}$) va nixromga boshqa materiallar qo'shilgan *Ni* (74 %), *Cr* (20%), *Fe* (3%), *Al* (3%) singari qotishmalari ishlatiladi. Ularning solishtirma qarshiligi $\approx 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ Om}\cdot\text{sm}$ ga teng bo'ladi.

Kermetlar sifatida ishlatilishda quyidagi aralashmalar tekshirilgan va yaxshi natijalar olingan: *Cr – SiO*, *Al – SiO₂*, *Pt – Ta₂O₅*, bularning ichida eng yaxshisi *Cr – SiO* hisoblanadi.

Yupqa qatlamli kondensatorlar uchun materiallar

Yupqa qatlamli kondensatorlarning parametrlari asosan, dielektrik qatlam materialining xossasi bilan aniqlanadi. Dielektrik materialning asosiy xossalriga:

1) *solishtirma sig'im*: $S = \epsilon\epsilon_0/h$, ($\epsilon\epsilon_0$ – dielektrik doimiy, h – dielektrik qatlam qalinligi);

2) *elektr maydoniga chidamliligi*: $E_d = U_d/h$, (U_d – teshilish kuchlanishi) ni kiritish mumkin.

Katta yuzada nuqsonsiz qatlam olish qiyin bo'lgani uchun yupqa qatlamli kondensator yuzasining o'lchami cheklangan bo'ladi. Yuzaning kichikligi hosil qilish kerak bo'lgan sig'im qiymatining qanday aniqlikda olinishiga bog'liq bo'ladi. Dielektrik qatlamning eng kichik qalinligiga ham cheklanish mavjud bo'lgani uchun (qatlamdagi teshiklar elektr maydonini qiymatiga chidamli bo'lishiga ta'sir qiladi), dielektrik qatlam materialining dielektrik singdiruvchanligiga ma'lum talablar qo'yiladi. Qatlamning eng kichik qalinligi $h = 0,1$ mkm va maksimal yuzasi $S = 10 \text{ mm}^2$ bo'lsa, 10^6 pF sig'im olish uchun dielektrik materialning dielektrik singdiruvchanligi 10 dan katta bo'lishi kerak. Dielektrik materialning elektr mustahkamligi teshilish kuchlanishi qiymati bilan aniqlanadi, ya'ni $U_d = E_d h$, formula asosida eng katta ishchi kuchlanishi aniqlanadi.

Dielektrik qatlam olish uchun metall va yarimo'tkazgich oksidlari ishlatiladi. Masalan, SiO_2 , SiO , GeO (dielektrik singdiruvchanligi katta). SiO_2 qatlamli kam ishlatiladi, chunki dielektrik singdiruvchanlik kichik va vakuumda qizdirib uchirish usuli bilan qatlam hosil qilish qiyin: $T = 1600^\circ\text{C}$ da bug'larining bosimi SiO nikidan taxminan 10^5 marta kichik bo'ladi.

Qiyin eruvchi metall oksidlari Ta_2O_5 , TiO_2 boshqa metall oksidlaridan ancha yuqori dielektrik singdiruvchanlikka ega. Ta_2O_5 qatlamining olish texnologiyasi yaxshi o'rganilgan bo'lgani uchun ko'proq yupqa qatlamli kondensatorlar dielektrik qatlami sifatida ishlatiladi.

Yupqa qatlamli tok o'tkazgichlar

Yupqa qatlamli tok o'tkazgichlar integral sxemalarda passiv elementlarni ulash va mahkamlanadigan faol elementlar ulanadigan kontakt maydonchani hosil qilishda xizmat qiladi. Yupqa qatlamli tok o'tkazuvchi materiallar quyidagi xossalarga ega bo'lishi kerak:

– katta elektr o'tkazuvchanlikka;

- taglikka yaxshi adgeziya bo‘lishi;
- kavsharlash yoki payka;
- kimyoviy inert bo‘lishi.

Yuqori elektr o‘tkazuvchanlikka ega metallar: oltin, kumush, alyuminiy, mis va boshqalar hisoblanadi. Lekin bular yuqoridagi talablarni to‘liq bajarmaydi. Masalan, *Au* va *Ag* taglikka adgeziyasi yomon. *Al* ga kavsharlash va payka qilish qiyin. *Cu*– tez oksidlanadi.

Shuning uchun yupqa qatlamli tok o‘tkazgichlar hosil qilish uchun yupqa qatlamli kompozitsion materiallardan foydalaniladi. Bu kompozitsion materiallarning xususiyatlari quyidagidan iborat:

- pastki qatlam qalinligi $(1 \div 3) \cdot 10^{-2}$ mkm, taglikka yaxshi adgeziyalanadigan qilib tanlab olinadi;
- o‘tkazuvchi qatlam elektr o‘tkazuvchanligi katta bo‘lgan materialdan $0,4 \div 0,8$ mkm qalinlikda olinadi;
- himoyalovchi qatlamni kavsharlash va payka qilish mumkin bo‘lgan kimyoviy inert materialdan qalinligi $(5 \div 8) \cdot 10^{-2}$ mkm qilib tanlanadi.

9.3-jadval

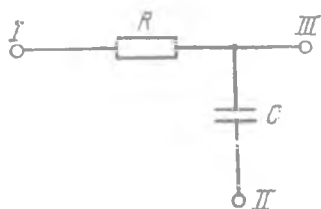
Tok o‘tkazuvchi qatlam	Himoyalovchi qatlam	Qatlam qarshiligi, Om/sm
Au	— — —	$0,03 \div 0,04$
Cu	Ni	$0,02 \div 0,04$
Cu	Ag	$0,02 \div 0,04$
Al	Ni	$0,1 \div 0,2$

Yupqa qatlamli integral sxemalarni tayyorlashning texnologik murshruti

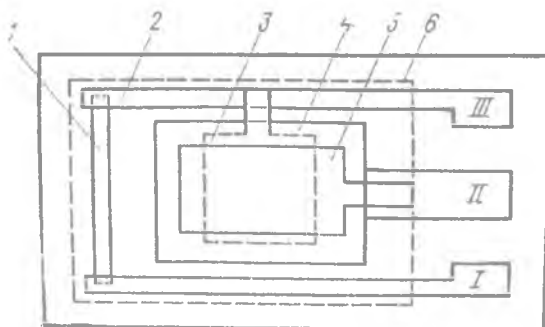
Yupqa qatlamli RC – integral sxema strukturasi tayyorlash.

Yupqa qatlamli RC – strukturani to‘siq (maska) yordamida tayyorlashni ikki bosqichga bo‘lish mumkin:

I. Rezistiv va tok o‘tkazuvchi qatlamlarni hosil qilish vakuum kamerasida uzluksiz jarayonda amalga oshiriladi.



a)

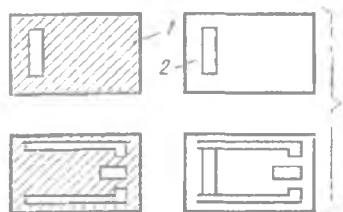


b)

9.18-rasm. Yupqa qatlamli RC – integral sxemaning prinsipial elektr sxemasi (a) va topologiyasi(b): 1 – rezistor R (xrom); 2 – tok o'tkazuvchi yo'lchalar va kontakt maydonchalari (mis, tagida xrom qatlami); 3 – kondensatorning pastki qoplamasi (Al); 4 – kondensatorning dielektrik qatlami (germaniy monooksidi GeO); 5 – kondensatorning ustki qoplamasi (Al); 6 – himoyalovchi qatlam(kremniy monooksidi SiO)

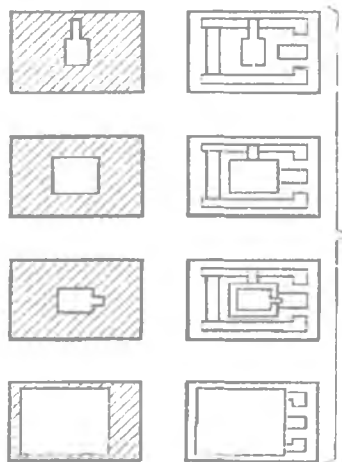
Xrom qatlamini uchirib hosil qilish jarayonida qoldiq kislorod bilan ta'sirlashib, hosil bo'lganda Cr qatlamining solishtirma qarshiligi ortadi. Taglik harorati $200\text{--}250\text{ }^{\circ}\text{C}$ oralig'ida bo'ladi. Xrom chanlatgichi qizdirilganda vakuum sifati yomonlashadi, chunki uchirgich sirtidagi va xrom parchasidagi mavjud gazlar ajralib chiqadi. Gaz ajralishi to'xtagandan so'ng vakuum ko'tarilib

yaxshilanadi. Shundan so'ng to'siq ochilib, taglik yuzasiga va tekshiruvchi sirtga xrom qatlami uchiriladi. Kerakli qalinlikdagi xrom qatlami hosil qilingandan so'ng, changlatgich to'siladi va bu taglik o'rniga boshqa taglik o'rnatiladi va xrom qatlami hosil qilinadi (rezistorlar).



a)

**a) Rezistor va tok
o'tkazuvchi qatlamlarni
hosil qilish:**
1 – erkin maska;
2 – taglik



b)

**b) Kondensator va
himoyalovchi qatlam
hosil qilish**

**9.20-rasm. Erkin maskalar yordamida yupqa qatlamli
RC – integral sxemani tayyorlash texnologiyasi**

Xromdan farqli holda mis moddasi suyuq holatdan uchiriladi. Mis qiyin eruvchi metallar bilan o'zaro ta'sirlashmaydi. Qiyin eruvchi metallardan uchiruvchi sifatida molibden ishlatiladi, chunki mexanik ishlov berish nisbatan oson va issiqlikni yaxshi o'tkazadi. Misni qizdirish jarayonida uning sochilmasligi uchun bosqichma-bosqich

olib boriladi: avval eritib olinadi, so'ngra uchiruvchidan o'tayotgan tokni to kerakli uchirish haroratiga erishguncha sekin-asta oshirib boriladi, so'ngra to'siq ochiladi va taglikda mis qatlami hosil qilinadi (tok o'tkazuvchi qatlam va yo'lchalar).

II. Kondensator va himoyalovchi qatlamlar boshqa qurilmada hosil qilinadi. Bu usulda taglikda hosil qilingan rezistor va tok o'tkazuvchi qatlamlarning parametrlarini vakuum kamerasidan olib tekshirish va to'g'rilash imkoni mavjud bo'ladi.

Himoyalovchi SiO_2 monooksid qatlam tantal yoki molibdenli uchirgich yordamida hosil qilinadi. Monooksid juda yuqori adsorbsiyalash xossasiga ega bo'lgani uchun monooksid qatlami hosil qilishdan oldin taglik qizdirilib, yutilgan gazlardan yaxshilab tozalanadi. Vakuum yaxshilangandan so'ng taglikda monooksid qatlami hosil qilinadi.

Kristallni korpusga o'rnatish va undan ulovchi elektrodlar chiqarish

Yarimo'tkazgich asboblari va integral sxemalarni korpusga joylashtirishda kristall yoki taglik quti asosiga joylashtirilib, undan ulash uchun elektrodlar chiqariladi. Elektrodlar kristalldagi metall qatlam hosil qilingan – kontakt maydonchalariga ulanadi.

Bunday ulashlarning murakkabligi metall qatlamlar yupqaligi (0,25-2,0mkm) va adgeziyasining mustahkam emasligi bilan bo'g'liq bo'ladi. Shu bilan birga kontakt maydonchalar yuzasining kichikligi va ulanuvchi simlarning qalinligi (25-180mkm) ham sabab bo'ladi.

Kontakt maydonchasi qatlamining qalinligi bilan ulanuvchi sim qalinligi orasidagi nisbat 1:100 bo'lgani uchun kontakt maydonchasining qatlami qizib ketadi yoki ulanuvchi sim yetarlicha qizimaydi natijada ulanish mustahkam bo'lmaydi.

Kley yordamida ulash tokni yaxshi o'tkazuvchi kley yordamida bajariladi. Bunday kleylar epoksid yoki poliefir smolasiga mayda (1mkm) metall kukunini (Au , Ag , Pd , Ni yoki boshqalar) qo'shib tayyorlanadi va solishtirma qarshiligi $\rho = (2-100) \cdot 10^{-4}$ Om·m bo'ladi. Kleydan foydalanishda quyidagi kamchiliklar kuzatiladi:

1) kley tarkibining bir jinsli emasligi (bir tomchidan ikkinchisi tomchisining solishtirma elektr qarshiligi bilan farq qiladi);

2) foydalanish muddatining qisqaligi (suyultiruvchi qismi tez bug‘lanib ketadi);

3) namlik va haroratga chidamli emasligi;

4) ayrim metall sirtlariga yopishqoqligi (adgeziyasi) yomonligi;

5) ichki mexanik kuchlanishlar hosil bo‘lishi;

6) harorat pasayganda cho‘kadi;

7) kleylanuvchi qismlarni haroratda chiziqli kengayish koeffitsiyenti bir-biridan keskin farq qilishi;

8) kleylanuvchi sirt yuzasining kattaligi ($0,2-0,3\text{mm}^2$).

Qalaylash – ikki metallni qattiq holatda orasidagi bo‘shliqlarni qalay bilan to‘ldirib amalga oshiriladi. Qalaylashda ulanuvchi metall va qalay erish haroratidan yuqori haroratgacha qizdiriladi. Erigan qalay ulanuvchi sirtlarda yoyilib, sirt ichiga kichik chuqurlikka diffuziyalanadi. Ulanuvchi sirtlar esa qalayda qisman eriydi.

1) Qalaylashda ko‘pincha POS-61 [61% Sn; 38,2% Pb; 0,8% Sb] qotishmasidan foydalaniladi. Erish harorati $183-194^{\circ}\text{C}$ ni tashkil etadi.

2) Agar kontakt maydonchasidagi metall qatlam qalayda kuchli erisa, u holda ПС_рОС3-58 [3% Ag; 0,5% Sb; 57,8% Sn; 38,7% Pb] qotishmadan foydalaniladi.

3) Issiqlikka chidamsiz bo‘lgan qismlar erish harorati past bo‘lgan ($142-145^{\circ}\text{C}$) qotishma ИОСК-50 [50% Sn; 18% Cd; 0,2% Sb; 0,008% Cu; 31,792% Pb] bilan qalaylanadi.

Metallni va qalayli qotishmani oksidlashdan asrash uchun passiv flyuslardan foydaniladi yoki flyussiz qalaylanadi. Flyuslardan qalaylangandan so‘ng yuvish zarurati bo‘lmaydiganlari maqsadga muvofiq:

- ФКС_n (konifol – 10÷60% massali; etil spirti 90÷40% massali);
- ФПЭ (poliefir smola 15÷20% massali; metil etilketon yoki etilatsetat 80÷85% massali).

Qalaylash kam quvvatli ($U=6V$, $P=6Vt$, $T=260^{\circ}C$) elektrik mikropayalnik yordamida $t=2\div3$ sek davomida bajariladi. Haroratni avtomatik ravishda boshqariladigan yoki ikki elektrodli impulsli qizdiriladigan payalnik ishlatiladi.

Qalayli qotishma dumaloq $\phi=0,8$ mm, qalinligi $0,08\div0,1$ mm ga teng bo'ladi.

Bu usulning kamchiligi:

- 1) Ulanishi puxta bo'lmaydi.
- 2) Ulanish yuzasining nisbatan kattaligi.
- 3) Ayrim metallnigina qalaylash mumkinligi.
- 4) Ulash tezkorligining pastligi.

Bu kamchiliklar qalaylab ulashdan foydalanishni cheklab qo'yadi.

Qalaylash ko'proq kristall yoki taglikni korpus asosiga mahkamlashda qo'llaniladi.

Yumshoq qotishmalar yoki evtektik qotishmalardan foydalanib, qalaylash quyidagi talablarga javob beradi:

- 1) Ulanish sohasining qarshiligi kichik bo'ladi.
- 2) Korpus materiali bilan qotishmani harorat chiziqli kengayish koeffitsiyenti bir-biriga yaqin bo'lib, hosil bo'ladigan mexanik kuchlanishlar kichik bo'ladi.
- 3) Issiqlik o'tkazuvchanligi yaxshi va mexanik mustahkam bo'ladi.

Bunday qotishmalarga erish harorati $T=280^{\circ}C$ bo'lgan *Au-Sn* va $T=300^{\circ}C$ bo'lgan *Pb-Sn-Ag* qotishmalar kiradi. Kristallni korpusga mahkamlanadigan sirti xrom va uning ustidan *Au*, *Ag* yoki *Ni* qatlam bilan qoplanadi. Korpus asosi *Ni* yoki *Ag* bilan qoplanadi. Kristall bilan korpus asosi orasiga erish harorati $T=370^{\circ}C$ bo'lgan evtektik qotishma *Au-Si* (94 va 6% massa) yupqa dumaloq tugmacha shaklida quyiladi. Ulanish mustahkam bo'lishi uchun qizdirish haroratini $T=390-420^{\circ}C$, bosim $1\div3$ N/mm² bo'lgan holda $t=3\div5$ sek ushlab turish kerak. Shisha bilan ulash faqat kristallarni korpusga mahkamlashda ishlatiladi. Past haroratda eruvchi C84-1, C88-1, C89-3, C90-1 qotishmalar shishalarning chiziqli kengayish harorat koeffitsiyenti $(8.4-9.0) \cdot 10^{-6} K^{-1}$ va yumshash harorati $T=550^{\circ}C$ dan katta bo'lmaydi. Shishadan foydalanilganda kristall korpusdan izolyatsiyalangan bo'ladi.

Kavsharlash usullari

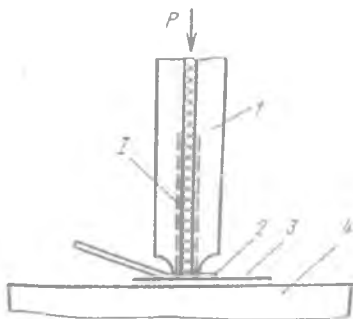
Mikrokavsharlash – deganda ulanuvchi qismlarni eritish yoki deformatsiyalash orqali ajralmaydigan holda biriktirish tushuniladi. Bunda ulanuvchi materiallarning atomlari orasida mustahkam bog‘ hosil bo‘ladi.

Qalaylashdan farqli ravishda kavsharlashda flyus ishlatilmagani tufayli ifloslanish va gaz bilan to‘yinish kam bo‘ladi.

Bosim bilan kavsharlash – (qizdirilgan holda presslash, impuls bilan qizdirib, ultratovush yordamida) bir vaqtda ulanuvchi qismlarga harorat va bosim ta‘sir ettirilishga asoslangan. Bunda ulanuvchi qismlar erimaydi. faqat ularning plastiklik holati ortadi. Plastik deformatsiyalanish natijasida ulanuvchilarning atomlari orasida metall bog‘lanish ko‘rinishida fizik tutashish yuzaga keladi va ulanuvchi moddalarning atomlari bir-biriga diffuziyalanadi.

Metall qismlarni metall yoki metall bo‘lmagan qismlar bilan yuqori bosim va harorat ta‘sirida ulashga **termokompressiya** deyiladi.

Bu usul bilan yassi va silindirsimon shakldagi sim (o‘tkazgich)larni oson sinuvchi taglik hosil qilingan yupqa metall qatlamga kavsharlash mumkin.



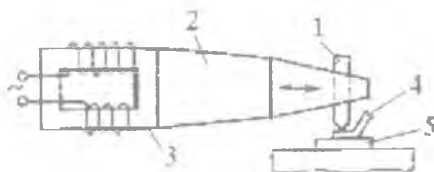
9.20-rasm. Kavsharlash qurilmasining tuzilishi:
1 – kavsharlovchi qurilma; 2 – ulanuvchi sim; 3 – kontakt maydoncha; 4 – taglik

Haroratli kompressiya usuli bilan oltin va alyuminiy simlarni kontakt maydonchalarida hosil qilingan *Au*, *Al*, *Si*, *Ge* va boshqa qatlamlarga kavsharlanadi. Oltin sim bilan *Al* li qatlam uchun haroratli kompressiya holati quyidagicha: harorat $T=350^{\circ}\text{C}$ deformatsiya kattaligi 30-60 % ni bosim 10^8 N/m^2 tashkil qiladi. Bosim vaqti davomiyligi $0.5\div 3$ sek.

Kavsharlovchi qurilma qattiq qotishmalar BK-6M, BK-15, berilliy oksidi yoki sintetik korunddan nina (pona) yoki kapillyar shaklida tayyorlanadi.

Termokompressiya usuli bilan hamma materiallarni ham kavsharlab bo'lmaydi. Kavsharlanuvchi sirtni kimyoviy yemirib, yog'sizlantirib, oksidlanishdan himoya qilib tayyorlash kerak.

Agar kavsharlanuvchi sirtlar mustahkam, qalin oksid qatlam bilan qoplangan bo'lsa (alyuminiy qatlami), ulanish sifatsiz bo'ladi. Bu holda oksid qatlamni buzish uchun ultratovushli kavsharlashdan foydalaniladi:



9.21- rasm. Ultratovushli kavsharlash:

1 – kavsharlovchi qurilma; 2 – tebranishni (ultratovushli) uzatuvchi; 3 – tebranish hosil qiluvchi; 4 – ulanuvchi sim; 5 – kontakt maydoncha

Metall va oq keramik yoki karbid titandan tayyorlangan kavsharlovchi qurilma (1) sim (4) ni $p=20\div 150 \text{ N/mm}^2$ bosim bilan kontakt maydoncha (5) da siqib turadi. Elektr tebranishni (ultratovushli) hosil qiluvchi (3) dan tebranishlar hosil qiluvchi (2) orqali kavsharlovchi qurilmaga (1) uzatiladi, mexanik ultra tovush hosil bo'ladi. Bu tebranish kavsharlanuvchi sirt yuzasida tarqaladi. Tebranishlar amplitudasi $0,5\div 5 \text{ mkm}$ va chatsotasi $20\div 60 \text{ kGts}$ bo'lganda sirdagi mikronotekisliklar silliqilanadi, oksid qatlam

buziladi (mexanik) va ulanuvchi sohadan issiqlik ajralib chiqadi. Ulanuvchi material erish haroratining $0,3 \div 0,5$ qismiga teng haroratda, 1 sekdan kamroq vaqtda yumshoqlanib qoladi va kavsharlanadi.

Bu usulning afzalligi:

1) Turli materiallarni (dielektriklarni ham) qalinligi bilan keskin farq qiluvchi kavsharlash mumkin.

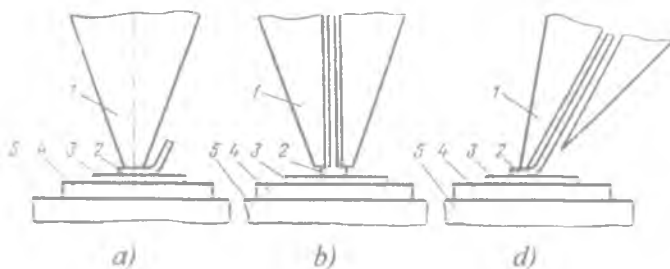
2) Kavsharlanuvchi sirtlar tozaligiga qo'yiladigan talab katta emas.

3) Lokal qizish natijasida kavsharlash sohasida yuz beradigan strukturaviy o'zgarishlar juda kam.

Qurilmada ultratovush tebranish chastotasi avtomatik boshqariladi, shuning uchun qulay holat tanlash mumkin.

Eritish orqali kavsharlash – (juft elektrod yordamida. lazer nuri bilan, elektron nur bilan) kavsharlanuvchi qismlarni erish haroratigacha qizdirishga asoslangan.

Juft elektrod yordamida kavsharlashda, integral sxemalardagi ulashlar bir tekislikda amalga oshirilishi hisobga olingan. Ikki elektrod o'zaro yupqa slyuda yoki sintetik korund (qalinligi $30 \div 220$ mkm) bilan izolyatsiyalangan mustahkam qurilma shaklida bo'ladi. Ulanuvchi sim diametri ($30 \div 150$ mkm)ga qarab, har bir elektrodning yuzasi eni $80 \div 600$ mkm va bo'yi $20 \div 100$ mkm gacha bo'ladi. Elektrod volfram, molibden yoki qattiq qotishma BK-8 dan tayyorlanadi. Bunday elektrodlarni har biri 30-40 ming kavsharlashgacha chidaydi.



9.22-rasm. Eritish orqali kavsharlash:

1 – izolyatsiyalovchi qatlam; 2 – elektrod; 3 – sim; 4 – kontakt maydoncha; 5 – taglik

Kavsharlash jarayonida sim-kontakt maydoncha soha elektr zanjirining bir qismi bo'ladi va kontakt sohasidan tok o'tayotganda qiziydi. Elektrodning bosim kuchi $3 \div 10$ N, kavsharlash vaqti 0,005 dan 0,02 sekundgacha bo'ladi.

Lazer nurida kavsharlashda ulanuvchi materiallar qismlari katta zichlikdagi elektromagnit nurlanish ta'sirida eryladi, sovitgandan so'ng qotib kavsharlanib qoladi.

Lazerli kavsharlashni afzalliklari:

1. Qisqa vaqt ichida katta energiyani kichik yuzaga yig'ish mumkinligi ($10^5 \div 10^6$ Vt/sm²). Bu har qanday metallni metall shisha va metall keramika ulanishlarga yaqin sohada kavsharlash imkonini beradi.

2. Maxsus muhit hosil qilinmaydi (vakuum, himoyalovchi atmosfera va boshqalar), 0,25÷1 mm diametrgacha lazer nurini fokuslash oson va optik shaffof moddalardan yutilmay o'tib ketadi (shisha, kvarts va boshqalar). Bular hammasi lazer nuri bilan kavsharlash usulini mikroelektronika texnologiyasida qo'llash qulay ekanligini ko'rsatadi.

Sinov savollari:

1. *Yarimo'tkazgich materiallarga mexanik ishlov berish turlari va maqsadi*

2. *Yarimo'tkazgich plastinkasining tozalik klassi*

3. *Yarimo'tkazgich plastinkasi sirtini fizikaviy tozalash usullari*

4. *Yarimo'tkazgich plastinkasi sirtini kimyoviy tozalash usullari*

5. *Kremniy uchun kislotali yemirgichlar*

6. *Kremniy uchun ishqorli yemirgichlar*

7. *Kremniy plastinkasiga bor atomlarini diffuziya qilib, p-n o'tish hosil qilish*

8. *Kremniy plastinkasiga fosfor atomlarining diffuziya qilib, p-n o'tish hosil qilish*

9. *Kremniy plastinkasiga ionlar bilan bombardimon qilib, p-n o'tish hosil qilish*

10. *Cheksiz va chekli kirishma atomlar manbaidan yarim o'tkazgichga kirishma atomlarini diffuziya qilingandagi taqsimot*

11. Fotolitografiyaning integral sxemalar tayyorlash texnologiyasida qo'llanishi

12. Kremniy plastinkasini qizdirish yo'li bilan SiO_2 qatlamini hosil qilish

13. SiO_2 qatlamining integral sxemalar tayyorlash texnologiyasida qo'llanilishi

14. Bipolyar integral sxemalar tayyorlash texnologiyasi

15. MOYa integral sxemalar

16. Gibril integral sxemalar

17. Yupqa qatlamli integral sxemalar

18. Qalin qatlamli integral sxemalar

Mikroelektronikaning rivojlanishida texnologiyaning o'rni mavzusiga doir masalalar:

Masala 1. Solishtirma qarshiligi $10 \text{ Om}\cdot\text{sm}$ bo'lgan p – turdagi kremniyga ikki bosqichli diffuziya usuli bilan kiritilgan fosfor atomlari taqsimoti chizilsin va hosil bo'lgan p - n o'tish chuqurligi aniqlansin. Diffuziya sharoiti quyidagicha: $T_1=1050^\circ\text{C}$, $t_1=10 \text{ min}$. $T_2=1150^\circ\text{C}$, $t_2=2 \text{ s}$.

1. Diffuziya harorati $T_1=1050^\circ\text{C}$ bo'lganda fosfor atomlarining kremniydagi eruvchanligi C_{01} ning qiymatini 9.23-rasmdan foydalanib aniqlaymiz, ya'ni $C_{01}=1,2 \cdot 10^{21} \text{ sm}^{-3}$ ni topamiz.

2. Diffuziya harorati $T_1=1050^\circ\text{C}$ bo'lganda fosfor atomlarining kremniydagi diffuziya koeffitsiyenti D_1 ning qiymatini 9.24-rasmdan foydalanib aniqlaymiz, ya'ni $D_1=2,5 \cdot 10^{-14} \text{ sm}^2/\text{s}$ ni topamiz.

3. Diffuziya harorati $T_1=1050^\circ\text{C}$ bo'lganda kremniy yuzasidagi fosfor atomlarining sirtiy zichligi N ni hisoblaymiz:

$$N = 2C_{01} \sqrt{\frac{D_1 t_1}{\pi}} = 2 \cdot 1,2 \cdot 10^{21} \sqrt{\frac{2,5 \cdot 10^{-14} \cdot 10 \cdot 60}{3,14}}$$
$$= 5,2 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-2} \quad (9.16)$$

4. Diffuziya harorati $T_2=1150^\circ\text{C}$ bo'lganda fosfor atomlarining kremniydagi diffuziya koeffitsiyenti D_2 ning qiymatini 9.24-rasmdan foydalanib aniqlaymiz, ya'ni $D_2=4 \cdot 10^{-13} \text{ sm}^2/\text{s}$ ni topamiz.

5. Kremniyga ikki bosqichli diffuziya usuli bilan kiritilgan fosfor atomlari taqsimotini aniqlaymiz:

$$\begin{aligned}
 C(x,t) &= \frac{N}{\sqrt{\pi D_2 t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_2 t_2}\right) \\
 &= \frac{5.2 \cdot 10^{15}}{\sqrt{3.14 \cdot 4 \cdot 10^{-13} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 10}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot 4 \cdot 10^{-13} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 60}\right) \\
 &= 5.5 \cdot 10^{19} \exp\left(-\frac{x^2}{1.15 \cdot 10^{-6}}\right) \quad (9.17)
 \end{aligned}$$

X ning ixtiyoriy 0.1-3,0 mkm gacha qiymatlari uchun $C(x,t)$ ni hisoblang, aniqlangan natijalarni 9.4-jadvalga kiriting.

9.4-jadval

$X, \text{ mkm}$									
$\exp\left(-\frac{x^2}{1.15 \cdot 10^{-6}}\right)$									
$C(x,t), \text{ sm}^{-3}$									

6. Kremniyga ikki bosqichli diffuziya usuli bilan kiritilgan fosfor atomlari taqsimotini diffuziyaning birinchi bosqichidagi taqsimoti bilan solishtirish uchun quyidagi ifoda asosida fosfor atomlarining taqsimotini aniqlaymiz:

$$\begin{aligned}
 C(x,t) &= C_{01} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1}} \\
 &= 1.2 \cdot 10^{21} \operatorname{erfc} \frac{x}{7.75 \cdot 10^{-6}} \quad (9.18)
 \end{aligned}$$

X ning ixtiyoriy 0,01-0,1 mkm gacha qiymatlari uchun $\operatorname{erfc} \frac{x}{7.75 \cdot 10^{-6}}$ funksiyaning qiymatini 9.6-jadvaldan toping n va $C(x,t)$ ni hisoblang, aniqlangan natijalarni 9.5-jadvalga kiriting.

$X, \text{ mkm}$										
$\operatorname{erfc} \frac{x}{7.75 \cdot 10^{-6}}$										
$C(x, t), \text{ sm}^{-3}$										

9.4 va 9.5-jadvallar asosida kremniyga ikki bosqichli diffuziya usuli bilan kiritilgan fosfor atomlari taqsimotining grafigini chizing (9.25-rasm).

Kremniyga ikki bosqichli diffuziya usuli bilan fosfor atomlari kiritilganda hosil bo'lgan p - n o'tish chuqurligini aniqlash uchun quyidagi ifodadan foydalanamiz:

$$x_j = 2\sqrt{D_2 t_2} \sqrt{\ln \frac{C_{02}}{C_B}} \quad (9.19)$$

Bu ifodadagi C_{02} quyidagiga teng:

$$C_{02} = \frac{N}{\sqrt{\pi D_2 t_2}} \quad (9.20)$$

C_B esa kremniydagi bor atomlari konsentratsiyasi, uning qiymatini ilovadagi 9.28-rasmdan topamiz: kremniyning solishtirma qarshiligi $\rho_p=10$ Om·sm bo'lganda undagi bor atomlari konsentratsiyasi $C_B=1.2 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ ga teng. U holda p - n o'tish chuqurligi:

$$\begin{aligned} x_j &= 2\sqrt{4 \cdot 10^{-13} \cdot 60 \cdot 60} \cdot \sqrt{2.3 \cdot \lg \frac{5.5 \cdot 10^{19}}{1.2 \cdot 10^{15}}} = 3.5 \cdot 10^{-4} \text{ sm} \\ &= 3.5 \text{ mkm} \end{aligned} \quad (9.21)$$

p - n o'tish chuqurligini quyidagi soddaroq ifodadan foydalanib hisoblanganda:

$$x_j = 6\sqrt{D_2 t_2} = 6 \cdot \sqrt{2.88 \cdot 10^{-9}} = 3.2 \text{ mkm} \quad (9.22)$$

$\operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} = \operatorname{erfc} V$ funksiyaning qiymatini quyidagi jadvaldan olish mumkin.

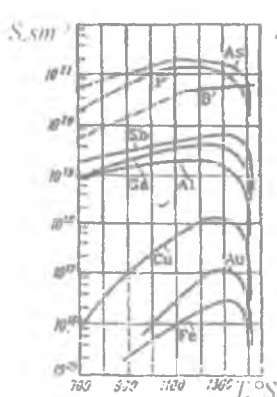
9.6-jadval

V	erfc V	V	erfc V
0	1.00000	1.50	0.03390
0.05	0.94363	1.60	0.02365
0.10	0.88754	1.70	0.01621
0.15	0.83200	1.80	0.01091
0.20	0.77730	1.90	0.00721
0.25	0.72367	2.00	0.00468
0.30	0.67137	2.10	0.00298
0.35	0.62062	2.20	0.00186
0.40	0.57161	2.30	0.00114
0.45	0.52452	2.40	0.000689
0.50	0.47950	2.50	0.000407
0.55	0.43668	2.60	0.000236
0.60	0.39614	2.70	0.000134
0.65	0.35797	2.80	0.000075
0.70	0.32220	2.90	0.000041
0.75	0.28884	3.00	0.00002209
0.80	0.25790	3.10	0.00001165
0.85	0.22933	3.20	0.00000603
0.90	0.20309	3.30	0.00000306
0.95	0.17911	3.40	0.00000152
1.00	0.15730	3.50	0.000000743
1.10	0.11980	3.60	0.000000356
1.20	0.08969	3.70	0.000000167
1.30	0.06599	3.80	0.00000077
1.40	0.04772	3.90	0.00000035

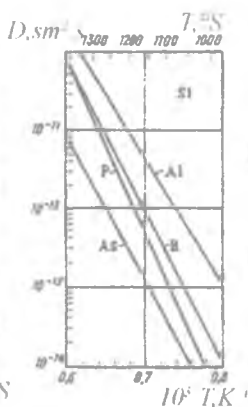
$C(x, t_1, t_2) = \frac{2C_0}{\pi} \int_0^\infty \exp(-y^2) \operatorname{erf}(ay) dy$ integral α va z ning $\sqrt{z}$ ning turli qiymatlari uchun hisoblandi.

9.7- jadval

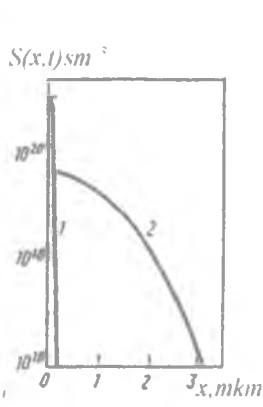
$\alpha \backslash z$	0,1	0,3	0,5	1,0	2,0	3,0	5,0
0,1	0,09015	0,07376	0,06035	0,03655	0,01340	0,00491	0,00066
0,3	0,26295	0,21403	0,17422	0,10416	0,03725	0,01333	0,00174
0,5	0,41626	0,33557	0,27058	0,15812	0,05419	0,01866	0,00224
0,7	0,54464	0,43340	0,34515	0,19596	0,06398	0,02120	0,00242
0,9	0,64829	0,50812	0,39903	0,21979	0,06867	0,02213	0,00245
1,5	0,84509	0,63065	0,47586	0,24431	0,07141	0,02247	0,00246
3,0	0,99920	0,68698	0,49825	0,24708	0,07147	0,02247	0,00246
	1,02843	0,68892	0,49843	0,24709	0,07147	0,02247	0,00246



9.24 – rasm.
Si kirishma atomlari
eruvchanligining
haroratga bog‘liqligi



9.25 – rasm.
Si kirishma atomlari
diffuziya
koeffitsiyentining
haroratga bog‘liqligi



9.26 – rasm.
Ikki bosqichli
diffuziyada Si
kirishma
atomlarining
taqsimoti

Masala II. Kremniyga ikki bosqichli diffuziya usuli bilan kiritilgan fosfor atomlari taqsimoti chizilsin va hosil bo'lgan p - n o'tish chuqurligi aniqlansin. Diffuziya sharoiti quyidagicha: $T_1=1250^\circ\text{C}$, $t_1=10$ min, $T_2=1150^\circ\text{C}$, $t_2=2$ s.

1 Diffuziya harorati $T_1=1250^\circ\text{C}$ va $T_2=1150^\circ\text{C}$ bo'lganda fosfor atomlarining kremniydagi diffuziya koeffitsiyentlari D_1 va D_2 ning qiymatlarini 9.25- rasmdan foydalanib aniqlaymiz, ya'ni $D_1=4 \cdot 10^{-12} \text{ sm}^2/\text{s}$ va $D_2=4 \cdot 10^{-13} \text{ sm}^2/\text{s}$ ni topamiz.

2 $D_1 t_1 = 4 \cdot 10^{-12} \cdot 10 \cdot 60 = 2.4 \cdot 10^{-9} \approx D_2 t_2 = 4 \cdot 10^{-13} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 60 = 2.88 \cdot 10^{-9} \text{ sm}^2$, ya'ni $D_1 t_1$ ning qiymati $D_2 t_2$ ning qiymatiga yaqin, $D_1 t_1 < D_2 t_2$ shart bajarilmagan. Bu holatda diffuziyaning birinchi bosqichidagi kirishma atomlarining taqsimoti ikkinchi bosqichidagi kirishma atomlarining taqsimotiga yaqin bo'ladi va bu taqsimotga ta'sir qiladi. Shuning uchun kirishma atomining taqsimoti Fik qonuning cheksiz yupqa qatlamdagi diffuziya manbaidan emas, balki qalin qatlamdagi diffuziya manbaidan diffuziyalanish bo'lgandagi yechimi, ya'ni quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$C(x, t_1, t_2) = \frac{2C_{01}}{\pi} \int_{\sqrt{z}}^{\infty} \exp(-y^2) \operatorname{erf}(ay) dy \quad (9.23)$$

3 α va z ni aniqlaymiz:

$$\alpha = \sqrt{\frac{D_1 t_1}{D_2 t_2}} = \sqrt{\frac{2.4 \cdot 10^{-9}}{2.88 \cdot 10^{-9}}} \approx 0.9 \quad (9.24)$$

$$\begin{aligned} z &= \frac{x^2}{4 \cdot (D_1 t_1 + D_2 t_2)} = \frac{x^2}{4 \cdot (2.4 \cdot 10^{-9} + 2.88 \cdot 10^{-9})} \\ &= \frac{x^2}{2.11 \cdot 10^{-8}} \end{aligned} \quad (9.25)$$

4. Kremniyga fosfor atomlari diffuziyasining birinchi bosqichidan so'ng, kremniy yuzasidagi fosfor atomlarining konsentratsiyasini 9.24–rasmdan aniqlaymiz: $T_1=1250^{\circ}\text{C}$ da $C_{01}=1,2 \cdot 10^{21} \text{ sm}^{-3}$.

5. Kremniyga fosfor atomlari diffuziyasining ikkinchi bosqichidan so'ng, kremniy yuzasidagi fosfor atomlarining konsentratsiyasini quyidagi ifodadan aniqlaymiz:

$$C_{02} = \frac{2C_{01}}{\pi} \arctg \alpha = \frac{2 \cdot 1,2 \cdot 10^{21}}{3,14} = \arctg 0,9$$

$$= 5,6 \cdot 10^{20} \text{ sm}^{-3} \quad (9.26)$$

6. Kremniyga fosfor atomlari diffuziyasining ikkinchi bosqichidan so'nggi taqsimotini aniqlaymiz: 9.7-jadvaldan foydalanib, $\alpha = 0,9$ bo'lganda $z = 0,1, 0,3, 0,5, 1,0, 2,0, 3,0, 5,0$ qiymatlariga mos kelgan $C(x, t_1, t_2)$ ning qiymatlari topilsin, X ning qiymatlari quyidagi ifodadan hisoblansin:

$$X = 2 \cdot \sqrt{(D_1 t_1 + D_2 t_2)} \cdot z = 1,45 \cdot 10^{-4} \sqrt{z} \quad (9.27)$$

X va $C(x, t_1, t_2)$ ning qiymatlari 9.8–jadvalga kiritilsin.

9.8–jadval

α	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
z	0.1	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0
$X, \text{ mkm}$	0.46	0.79	1.03	1.45	2.05	2.5	3.2
$\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-y^2) \cdot e^{-\frac{1}{2}y^2} dy$	0.648	0.508	0.399	0.22	0.069	0.022	0.002
$C(x, t_1, t_2), \text{ sm}^{-3}$	$\frac{2C_{01}}{\pi} \cdot 0.648$	$\frac{2C_{01}}{\pi} \cdot 0.508$	$\frac{2C_{01}}{\pi} \cdot 0.399$	$\frac{2C_{01}}{\pi} \cdot 0.22$	$\frac{2C_{01}}{\pi} \cdot 0.069$	$\frac{2C_{01}}{\pi} \cdot 0.022$	$\frac{2C_{01}}{\pi} \cdot 0.002$

7. Kremniyga fosfor atomlari ikki bosqichli diffuziyasining birinchi bosqichida fosfor atomlari taqsimoti quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$C(x) = 1.2 \cdot 10^{21} \operatorname{erfc} \frac{x}{2 \cdot \sqrt{2.4 \cdot 10^{-9}}} \\ = 1.2 \cdot 10^{21} \operatorname{erfc} \frac{x}{0.98 \cdot 10^{-4}} \quad (9.28)$$

X ning ixtiyoriy 1-10 gacha qiymatlari uchun $\operatorname{erfc} \frac{x}{0.98 \cdot 10^{-4}}$ funksiyaning qiymatini 9.6-jadvaldan toping va $C(x, t)$ ni hisoblang, aniqlangan natijalarni 9.9-jadvalga kiriting.

9.9-jadval

$X, \text{ mkm}$									
$\operatorname{erfc} \frac{x}{0.98 \cdot 10^{-4}}$									
$C(x, t), \text{ sm}^{-3}$									

9.8 – jadval asosida kremniyga ikki bosqichli diffuziya usuli bilan $D_1 t_1 < D_2 t_2$ shart bajarilmagan holatda kiritilgan fosfor atomlari taqsimoti grafigi chizilsin (9.27-rasm 1, 2 egri chiziqlar).

8 Kremniyga ikki bosqichli diffuziya usuli bilan kiritilgan fosfor atomlari hosil qilgan $p-n$ o'tish chuqurligini $D_1 t_1 < D_2 t_2$ shart bajarilmagan holat e'tiborga olingan quyidagi ifodadan foydalanib hisoblaymiz:

$$x_j = 6 \sqrt{D_1 t_1 + D_2 t_2} = 6 \cdot \sqrt{5.28 \cdot 10^{-9}} = 4.35 \cdot 10^{-4} \text{ sm} \\ = 4.35 \text{ mkm} \quad (9.29)$$

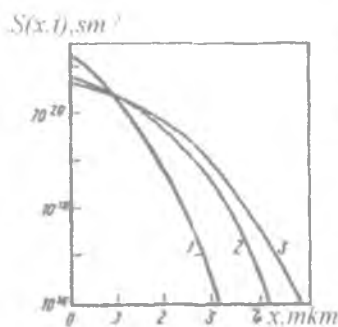
9. $D_1 t_1 \approx D_2 t_2$ ekanligini e'tiborga olmasdan solishtirish uchun $(Dt)_{ef} = D_1 t_1 + D_2 t_2$ bo'lgan holat uchun quyidagi Gauss ifodasidan foydalanib, fosfor atomlari taqsimotini aniqlaymiz:

$$C(x) = \frac{N}{\sqrt{\pi(Dt)_{ef}}} \exp \left[-\frac{x^2}{4(Dt)_{ef}} \right] \quad (9.30)$$

Bunda:

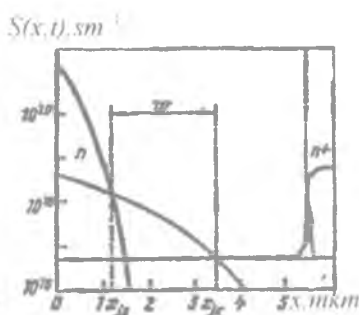
$$N = 2C_{01} \sqrt{\frac{D_1 t_1}{\pi}} = 2 \cdot 1.2 \cdot 10^{21} \sqrt{\frac{2.4 \cdot 10^{-9}}{3.14}} \\ = 6.6 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2} \quad (9.31)$$

$$C(x) = \frac{6.6 \cdot 10^{16}}{\sqrt{3.14 \cdot 5.28 \cdot 10^{-9}}} \exp \left[-\frac{x^2}{2.11 \cdot 10^{-8}} \right] \\ = 5.1 \cdot 10^{23} \exp \left[-\frac{x^2}{2.11 \cdot 10^{-8}} \right]$$



9.27-rasm.

Ikki bosqichli diffuziyaga fosfor atomlarining taqsimoti



9.28-rasm.

Tanzistorda ikki bosqichli ikkita ketma-ket diffuziya qilinganda kirishma atomlarining taqsimoti

x ning 0 dan 5mkm gacha bo'lgan qiymatlari uchun $C(x)$ ni hisoblang va 9.10-jadvalga kiriting.

$X, \text{ mkm}$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
$\exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot 11 \cdot 10^{-8}}\right)$										
$C(x), \text{ sm}^{-3}$										

9.10 – jadval asosida $(Dt)_{ef}=D_1t_1+D_2t_2$ bo‘lgan holat uchun Gauss funksiyasi bo‘yicha kremniydagi fosfor atomlari taqsimoti grafigi chizilsin (9.27 –rasm, 3 – egrichiziq). 9.9, 9.10, 9.11–jadvallar asosida chizilgan taqsimotlarni solishtiring.

Masala III. Solishtirma qarshiligi $0,15 \text{ Om}\cdot\text{sm}$ bo‘lgan n – turdagi kremniyga ketma-ket bor va fosfor atomlarini diffuziya qilib hosil qilingan $n - p - n$ strukturadagi bor va fosfor atomlari taqsimoti hisoblansin. Diffuziya holatlari: bor atomlari uchun $T_a=1200^\circ\text{C}$, $t_a=1 \text{ s}$, fosfor atomlari uchun $T_d=1100^\circ\text{C}$, $t_d=2 \text{ s}$. Bor atomlarining sirtiy zichligi $N_a=5 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-2}$, fosfor atomlarining diffuziyasi cheksiz manbadan amalga oshiriladi.

1. Solishtirma qarshiligi $0,15 \text{ Om}\cdot\text{sm}$ bo‘lgan n – turdagi kremniydagi fosfor kirishma atomlari konsentratsiyasini topamiz: $C_D = 5 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$.

2. Diffuziya harorati bor atomlari uchun $T_a=1200^\circ\text{C}$ va $T_a=1100^\circ\text{C}$ fosfor atomlari uchun $T_d=1100^\circ\text{C}$ bo‘lganda kremniydagi diffuziya koeffitsiyentlari bor atomlari uchun D_a, D_a^* va fosfor atomlari uchun D_d ning qiymatlarini 9.24-rasmdan foydalanib aniqlaymiz, ya’ni $D_a=2 \cdot 10^{-12} \text{ sm}^2/\text{s}$, $D_a^*=2.5 \cdot 10^{-13} \text{ sm}^2/\text{s}$, $D_d=1 \cdot 10^{-13} \text{ sm}^2/\text{s}$ ni topamiz. Diffuziya harorati fosfor atomlari uchun $T_d=1100^\circ\text{C}$ bo‘lganda kremniy yuzasidagi fosfor atomlarining konsentratsiyasini ilovadagi 9.24-rasmdan $T_d=1100^\circ\text{C}$ da $C_{0d}=1,2 \cdot 10^{21} \text{ sm}^{-3}$ aniqlaymiz.

$D_a t_d$ va $D_a^* t_d$ ko‘paytmalarni solishtiramiz:

$$D_a t_a = 2 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 60 \cdot 60 = 7.2 \cdot 10^{-9} \text{ sm}^2$$

$$D_a^* t_d = 2.5 \cdot 10^{-13} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 60 = 1.8 \cdot 10^{-9} \text{ sm}^2$$

Ikkita ketma-ket C_{0a} , D_a , t_a parametrlar bilan akseptor va C_{0d} , D_d , t_d parametrlar bilan donor kirishmalari n – turdagi donor kirishmalari konsentratsiyasi C_D bilan bir tekis legirlangan kremniyga diffuziya qilinganda. $D_a t_a > D_d t_d$ shart bajarilganligi uchun ikkita ketma-ket diffuziyadan so'ng natijaviy kirishma atomlari taqsimotini aniqlash uchun quyidagi ifodadan foydalanish mumkin:

$$C(x, t) = C_{0a} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_a t_a}\right) - C_{0d} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_d t_d}} - C_p \quad (9.32)$$

Bunda:

$$C_{0a} = \frac{N_a}{\sqrt{\pi D_a t_a}} = \frac{5 \cdot 10^{14}}{\sqrt{3.14 \cdot 7.2 \cdot 10^{-9}}} = 3.3 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3} \quad (9.33)$$

X ga beriladigan ixtiyoriy qiymatlarni tanlash uchun kollektor va emitter o'tishlarining chuqurligini aniqlaymiz:

$$\begin{aligned} x_{jk} &= 2\sqrt{D_a t_a} \cdot \sqrt{2.3 \lg \frac{C_{0a}}{C_B}} = 2\sqrt{7.2 \cdot 10^{-9}} \cdot \sqrt{2.3 \lg \frac{3.3 \cdot 10^{18}}{5 \cdot 10^{16}}} \\ &= 3.5 \cdot 10^{-4} \text{ sm} = 3.5 \text{ mkm} \end{aligned} \quad (9.34)$$

Emitter o'tishining chuqurligini aniqlash uchun quyidagi ifodalardan foydalanamiz:

$$\begin{aligned} x_{j\phi 0} &= 6\sqrt{D_d t_d} = 6\sqrt{1 \cdot 10^{-13} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 60} = 1.6 \cdot 10^{-4} \text{ sm} \\ &= 1.6 \text{ mkm} \end{aligned} \quad (9.35)$$

$$\begin{aligned} x_{j\phi 1} &= \left(\frac{1}{4D_d t_d} - \frac{1}{4D_a t_a}\right)^{\frac{1}{2}} \sqrt{2.3 \lg \left(\frac{C_{0d}}{C_{0a}}\right)} \\ &= \left(\frac{1}{4 \cdot 7.2 \cdot 10^{-10}} - \frac{1}{4 \cdot 7.2 \cdot 10^{-9}}\right)^{\frac{1}{2}} \sqrt{2.3 \lg \left[\frac{1.2 \cdot 10^{21}}{3.3 \cdot 10^{18}}\right]} \\ &= 1.35 \cdot 10^{-4} \text{ sm} = 1.35 \text{ mkm} \end{aligned} \quad (9.36)$$

$$\begin{aligned}
 x_{je} &= \left[\left(\frac{1}{2\sqrt{D_a t_d}} + \frac{0.3}{x_{je1}} \right)^2 - \frac{1}{4D_a t_d} \right]^{\frac{3}{2}} \sqrt{2.3 \lg \left[\frac{1.2 \cdot 10^{21}}{3.3 \cdot 10^{18}} \right]} \\
 &= \left[\left(\frac{1}{2\sqrt{7.2 \cdot 10^{-10}} + \frac{0.3}{1.35 \cdot 10^{-4}}} \right)^2 - \frac{1}{4 \cdot 7.2 \cdot 10^{-9}} \right]^{\frac{3}{2}} \\
 &\quad \cdot \sqrt{2.3 \lg \frac{1.2 \cdot 10^{21}}{3.3 \cdot 10^{18}}} = 1.2 \cdot 10^{-4} \text{ sm} \\
 &= 1.2 \text{ mkm}
 \end{aligned} \tag{9.37}$$

Kirishma atomlarining taqsimotini quyidagi ifodadan aniqlaymiz:

$$\begin{aligned}
 C(x, t) &= 3.3 \cdot 10^{18} \exp \left(-\frac{x^2}{2.84 \cdot 10^{-6}} \right) - 1.2 \\
 &\quad \cdot 10^{21} \operatorname{erfc} \frac{x}{5.35 \cdot 10^{-5}} - 5 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}
 \end{aligned}$$

X ning qiymatlari 0 dan 1,2 mkm gacha 0,3 mkm qadam bilan oshib boradi, 1,5 dan 3,5 mkm oraliqda 0,5 mkm qadam bilan oshib boradi. Hisoblangan natijalar 9.11-jadvalga kiritilsin.

9.11-jadval

$X, \text{ mkm}$	0.0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
$\exp \left(-\frac{x^2}{2.84 \cdot 10^{-6}} \right)$										
$\operatorname{erfc} \frac{x}{5.35 \cdot 10^{-5}}$										
$C(x, t), \text{ sm}^{-3}$										

9.11-jadval asosida kremniyga ketma-ket bor va fosfor atomlarini diffuziyalab, hosil qilingan $n-p-n$ strukturadagi bor va fosfor atomlari taqsimoti grafigini chizing 9.28-rasm.

Masala IV. Solishtirma qarshiligi 1 Om sm bo'lgan p – turdagi kremniyga ionlarni implantatsiya qilish usuli bilan kiritilgan mishyak atomlari 1 soat qizdirish davomida chuqurligi $x_f=0.5$ mkm bo'lgan $p-n$ o'tish hosil qilishi, kremniy sirt qatlamidagi mishyak atomlari konsentratsiyasi $C_0=1,5 \cdot 10^{20} \text{ sm}^{-3}$ ga teng bo'lishi uchun qanday haroratda qizdirish kerak. Kremniyga implantatsiya qilinishi kerak bo'lgan mishyak atomlari konsentratsiyasi hisoblansin.

1. Solishtirma qarshiligi 1 Om sm bo'lgan p – tur kremniydagi bor atomlari konsentratsiyasini 9.29 – rasmdan aniqlaymiz: $C_B=1,5 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$.

2. Mishyak atomlarining diffuziya koeffitsiyenti quyidagi ifodadan hisoblansin:

$$D = \frac{x^2}{4t \ln \frac{C_0}{C_B}} = \frac{0.25 \cdot 10^{-6}}{4.1 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 2.3 \lg \left[\frac{1.5 \cdot 10^{20}}{1.5 \cdot 10^{16}} \right]}$$

$$= 1.9 \cdot 10^{-14} \frac{\text{sm}^2}{\text{s}} \quad (9.38)$$

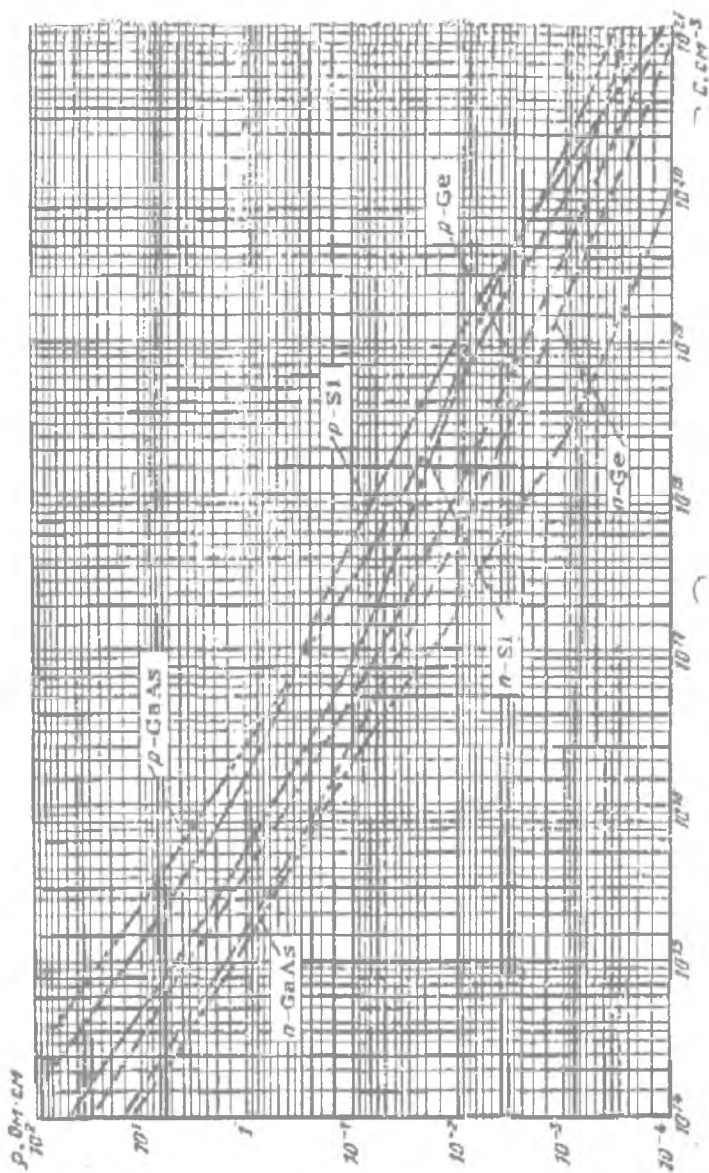
3. Hisoblangan mishyak atomlarining kremniydagi diffuziya koeffitsiyentining qiymati 1070°C ga mos kelishi 9.25-rasmdan aniqlansin:

4. Kremniyga implantatsiya qilingan mishyak atomlarining sirtiy zichligi (N)ni aniqlashda quyidagi kremniy sirt qatlamidagi kirishma atomlarining konsentratsiyasi (C_0)ni hisoblash ifodasidan foydalanamiz:

$$C_0 = \frac{N}{\sqrt{\pi D t}} \rightarrow N = C_0 \sqrt{\pi D t}$$

$$= 1.5 \cdot 10^{20} \sqrt{3.14 \cdot 1.9 \cdot 10^{-14} \cdot 1 \cdot 60 \cdot 60}$$

$$= 2.2 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-2}$$



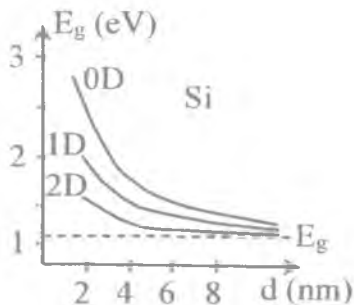
9.29—rasm. Yarimo'tkazgich materialning solishtirma qarshiligi kirishma atomlarining konsentratsiyasiga bog'liqligi

10.NANOO'LCHAMLI YARIMO'TKAZGICHLAR FIZIKASI

Nanoo'lchamli materiallar deganimizda, o'lchamlari bir nanometrdan (10^{-9} m) bir necha yuz nanometrga teng bo'lgan materiallar tushuniladi.

Bunday materiallarni yaratish va o'rganishdan fan va texnikaga nima yangilik kutiladi va ular qaysi sohalarida ishlatilishi mumkin? Bu savollarga ilmiy asoslangan javob berishdan oldin qisqacha shuni aytish mumkin:

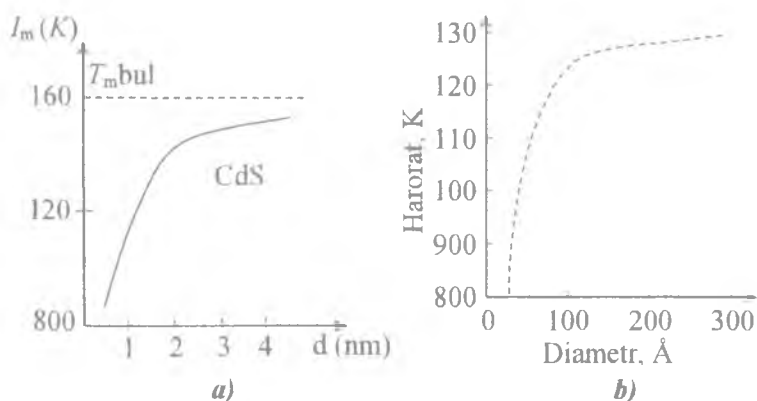
Materiallarning o'lchovlari nanoo'lchamlarga yetgan holatda ularning fundamental parametrlari, ya'ni yarimo'tkazgich materiallarda taqiqlangan soha kengligi, tok tashuvchilar harakatchanligi, ularning yashash vaqti, elektronlarni hosil qilgan energetik sathlar va boshqa asosiy xossalari juda keskin o'zgaradi. Bu degani kremniy nanoo'lchamli bo'lganida kremniy materiali, ya'ni kremniy atomlaridan tashkil topgan bo'lsa ham, o'zining elektrofizik parametrlari bilan butunlay yangi material xossalari ega bo'ladi.



10.1-rasm. Kremniy (Si) materialining taqiqlangan sohasi kengligining uning o'lchovlariga bog'liqligi

Bunda kremniy materialining o'lchamlarini kamaytirib, nano o'lchamli holatlarga kelganda uning taqiqlangan energetik soha kengligi o'lchamlariga bog'liqligi tajriba natijalari keltirilgan.

Ko'rinib turibdiki, kremniy moddasining uch o'lchovi ($0D$) yoki ikki o'lchovi ($1D$) yoki bir o'lchovi nanoo'lchamlarga yaqinlashganda kremniyning taqiqlangan soha kengligi ikki yarim marta oshar ekan. Endi bu modda atom tarkibi bo'yicha kremniy bo'lib qolsa ham uchchala o'lchamlar nano materiallarga yaqinlashganda uning fizik xossalari bilan umuman boshqa materialga aylanib qolar ekan. Yoki 10.2-rasmdagi CdS va oltin kristallining o'lchamlari nanometrlarga yaqinlashganda, uning erish harorati bir necha yuz graduslarga kamayib ketar ekan. Demak, moddalarning shu jumladan, yarim-o'tkazgich moddalarning o'lchamlarini nanometrlarga kamaytirib borish yo'li bilan ularning fundamental xossalarini boshqarish va yangi xossaga ega bo'lgan materiallar yaratish imkoniyati mavjud ekan.



10.2-rasm. a) CdS kristallining erish harorati uning o'lchovlariga bog'liqligi; b) oltin nanozarralarining erish harorati uning diametriga bog'liqligi ($10 \text{ Å} = 1 \text{ nm}$)

Bundan juda muhim ikkita masala chiqadi: birinchidan, bunday materiallarning xossalarini o'rganish fanda yangi nanofizika yo'nalishini yaratishga olib kelsa, ikkinchidan, bunday materiallarni yaratish va ularning o'lchamlarini boshqarish yangi nanotexnologiya faniga asos soladi. Masalaning ikkinchi tomoni bu materiallar asosida

nanoo'lchamli qurilmalar va asboblari yaratish mumkin ekan. Bu yanada murakkab va o'ta muhim bo'lgan nanoelektronika yo'nalishining rivojlanishiga olib keladi.

Nanoo'lchamli materiallar tarkibini, tuzilishi va shunga mos o'lchamlarini boshqarish asosida yangi nanomuhandislik yo'nalishi shakllanadi. Yaratilgan nanoo'lchamli moddalar tuzilishi va tarkibini o'rganishga imkon beradigan – nanospektraskopiya yo'nalishi asosida tubdan yangi qurilmalar kashf etilmoqda. Quyida bu sohadagi yangi yo'nalishlar va ularning asoslari haqida ma'lumotlar keltirilgan.

10.1. Nanofan yo'nalishlari va qo'llanilish sohalari

Nanomateriallar – obyekt o'lchamini bir, ikki yoki uch o'lchamda nanometr o'lchamigacha kichiklashtirish oqibatida yangi sifatlariga ega bo'lgan obyektlar yoki obyektlar kompozitsiyasi. Bunday nanomateriallarda juda ko'p yangi fizik hodisalar elektronning to'lqin tabiatiga ega ekanligidan kelib chiqadi, ya'ni nanoo'lcham de-Broyl to'lqin uzunligidagi qonuniyatlar namoyon bo'ladi.

Nanoelektronika – elementlarning topologik o'lchamlari 100 nm dan kichik bo'lgan integral elektron sxemalarning fizikaviy va texnologik asoslarini yaratish bilan shug'ullanadigan elektronika sohasi.

Nanomuhandislik – nanoo'lchamli obyektlar yoki strukturalar. shuningdek, nanotexnologiya usullari bilan yaratilgan obyekt yoki strukturalarni loyihalash, yaratish va ishlatish bilan bog'liq bo'lgan insonning ilmiy-amaliy faoliyati.

Nanofizika – nanoobyektlardagi hodisalarni o'rganuvchi kondensatsiyalangan modda holati fizikasining bo'limi. Ko'pincha nanotexnologiya terminiga nanofan va nanomuhandislik ham qo'shiladi.

Nanotexnologiya – nanoo'lchamli materiallarni yaratish, sintez qilish va tubdan yangi texnologiya usullarini ishlab chiqish va qo'llash. Shu bilan birga yaratilgan nanomateriallar o'lchamlari bilan birga ularning xossalari o'rganish metodlarini ham yaratishdir.

Nanotexnika – nanoo‘lchamga o‘tishda tizimning yangi xossalari va funksional imkoniyatlaridan foydalanilgan holda hosil bo‘ladigan mashinalar, mexanizmlar, asboblari, qurilmalar, materiallar uchun yangi texnik usullar yaratish. Bunda oldin erishib bo‘lmagan katta o‘lchamli massa va energetik ko‘rsatkichlar, texnik, iqtisodiy parametrlar va funksional imkoniyatlarga ega bo‘ladi.

Nanotexnologiyaning zamonaviy qo‘llanilish sohalari quyidagilarni o‘z ichiga oladi:

- Yuqori darajada mustahkam bo‘lgan nanokristall va amorf materiallarni, polimer asosidagi yonmas nanokompozitlarni yaratish.

- Nanoelektronika va nanofotonika elementlari, yarimo‘tkazgichli tranzistorlar va lazerlar, fotodetektorlar, quyosh elementlari, sensorlar va boshqalar, yangi avlod mikroelektronika va optoelektronikaning yupqa pardali va geterostruktura komponentalar, yumshoq va qattiq magnit materiallar.

- Axborotlarni o‘ta zich yozish qurilmalari, telekommunikatsion, axborot va hisoblash texnologiyalari, super kompyuterlar, yassi ekranlar, video qurilmalar va kompyuter monitorlari.

- Molekulyar elektron qurilmalar, shu jumladan, molekulyar o‘lchamli o‘chirib – ulagichlar va elektron sxemalar.

- Nanolitografiya va nanoprinter.

- Mikro va nanomexanika qurilmalari, molekulyar motorlar va nanomotorlar, nanorobotlar, integrallangan mikroelektron qurilmalar.

- Nanokimyoy va kataliz, kimyoy va neftkimyoy sanoati uchun yonish bilan boshqariladigan qoplamalar, elektrokimyoy usullarida olinadigan nanog‘ovak materiallar (katalizatorlar, adsorbentlar, molekulyar filtrlar va separatorlar).

- Issiqlik elementlari, elektr akkumulyatorlar energiyani o‘zgartirib beruvchi va energiyani saqlovchi qurilmalar.

- Farmatsevtika, dori va prateinlarni maqsadli yetkazib berish, biopolimerlar va biologik to‘qimalarni jonlantirish, klinik va tibbiyot diagnostikasi, sun‘iy muskullar va suyaklarni yasash, tirik organlarni implantatsiya qilish (ko‘chirish), kanserogen to‘qimalarni qayd etish va identifikatsiya qilish, transplantatsiya uchun petogenlar, biologik

qo'shila oladigan to'qimalar, dori preparatlari va boshqa ko'p mahsulotlar.

10.2. Mikrozarralarning to'qlin xossalari

Yuqorida jismlarning fizik xossalari ularning o'lchamlari nanometrlar atrofida bo'lganda o'zgarishi va yangi fizik xususiyatlarga ega bo'lishini eslatib o'tgan edik. Endi bunday hodisalar kuzatilishi uchun jismlarning o'lchamlari va ularda harakatda bo'layotgan elektronlar qanday holat va qonuniyatlarga bo'ysunishi kerakligini aniqlash lozim bo'ladi.

Albert Eynshteyn, tashqi fotoeffekt hodisasini va uning qonuniyatlarini tushuntirishda yorug'lik nafaqat to'qlin xossasiga, balki "foton" nomli kvazizarrachalardan tashkil topgan zarrachalar oqimidan iborat ekanligi va "foton"ning energiyasi, yorug'lik chastotasi (ν) hamda to'qlin uzunligiga bog'liq holdagi qiymatini ko'rsatib berdi va u quyidagicha ifodalanadi:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = \frac{1.24}{\lambda} \quad (10.1)$$

Bunda foton energiyasi eV larda, to'qlin uzunligi mikrometrlarda hisoblanadi. Bu nazariyaga asosan, yorug'lik to'qlin xususiyatiga ham, energiyasi kvantlangan (hoxlagan qiymatga ega emas, balki aniq diskret qiymatlarga ega bo'lgan) zarrachalar oqimidan (fotonlar) ham iborat ikki xil xossaga ega bo'lishini isbot qilib berdi.

1923 – yil fransuz olimi Lui-de -Broyl A. Eynshteynning yorug'likni korpuskulyar-to'qlin g'oyasini rivojlantirib, bunday holat nafaqat yorug'likka xos, balki barcha elementar zarrachalarga, elektronga ham xos xususiyat degan g'oyani oldinga surdi. Bu g'oyaga asosan elektronlar to'qlin xossaga ega bo'lganda ularning impulsi:

$$P = h\nu \quad (10.2)$$

Bunda: k – to'qlin soni $k = \frac{1.24}{\lambda}$ ga teng bo'lib, energiyasi quyidagi formula yordamida aniqlanadi:

$$E = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m} = \frac{h^2 k^2}{2m} = \frac{h^2}{2m\lambda^2} \quad (10.3)$$

10.3 – ifoda elementar zarracha elektronning to‘lqin uzunligi bilan uning energiyasi o‘rtasidagi bog‘liqlikni ko‘rsatadi. Shunga asosan massasi m ga teng bo‘lgan elementar zarrachalarning to‘lqin uzunligi quyidagi ifodaga teng bo‘ladi:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}} \quad (10.4)$$

Lui-de Broylning taklif qilgan g‘oyasi va elementar zarracha energiyasi, massasi va uning to‘lqin uzunligi o‘rtasidagi bog‘lanish ifodasi (10.4), 1927 – yil kristallga ma‘lum energiyaga ega bo‘lgan (elektronning to‘lqin uzunligini, kristall panjara doimiysiga mos kelgan energiya tanlab olinganda) elektronlar oqimi kristall panjaradan o‘tayotganda kuzatilgan difraksiya hodisasi asosida o‘z isbotini topdi. Demak, haqiqatdan ham har qanday elementar zarrachalar korpuskulyar va to‘lqin xossasiga ega bo‘lar ekan.

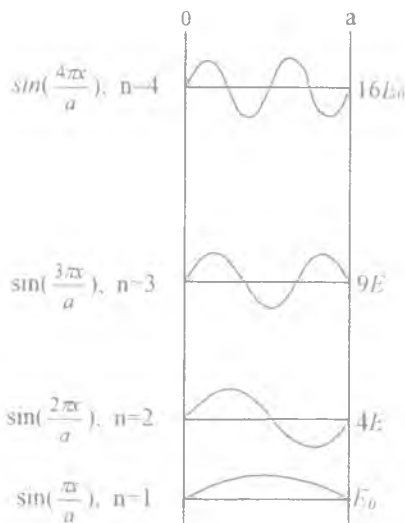
10.4-ifodaga asosan metallardagi erkin elektronlarning to‘lqin uzunligi hisoblanganda $\lambda=0.55$ nm, ya‘ni $\lambda=5.5$ Å ga teng bo‘lib, haqiqatdan ham kristall panjara doimiysi qiymatlariga mos keldi(hisobda elektron energiyasi $E=5$ eV= $8 \cdot 10^{-19}$ Dj, massasi $m=9,1 \cdot 10^{-31}$ kg deb olindi).

Ifodaga asosan yarimo‘tkazgichlardagi erkin elektron energiyasi hisoblansa, $T=300$ K da. $E=kT=0.0256$ eVga teng bo‘ladi. Elektronlar yarimo‘tkazgichda effektiv massaga ega bo‘lganligi uchun (masalan, *Si* – $m=0.92 m_0$, *GaAs*– $m=0.088 m_0$) shunga mos holda de – Broyl to‘lqin uzunligi *Si* da 8 nm (80 Å), *GaAs* da 30 nm (300 Å) ga teng bo‘ladi.

Demak, yarimo‘tkazgichlarda elektronlarning de – Broyl to‘lqin uzunligi metallardagi elektronlar to‘lqin uzunligidan juda katta ekan. Bu yarimo‘tkazgich materiallardan nanoo‘lchamli hodisalarni tajribada ko‘rish va uni tadbiq etish mumkin degan xulosaga keladi.

10.3. To'g'ri burchakli potensial to'siqlarda elektronlar energiyasi

Nanoo'lchamli moddalarda, ayniqsa nanoo'lchamli yarimo'tkazgichlarning sirti yoki ichida hosil qilingan nanoo'lchamli boshqa yarimo'tkazgichlardagi elektronlarning energetik holatini elektronlarning to'g'ri burchakli potensial to'siqdagi holati deb qarash mumkin. Bunday potensial to'siqda joylashgan elektron to'liqini potensial to'siq devorlaridan qaytishi va ularning interferensiyalanishi, hatto potensial to'siqdan tunnel effekti hisobiga chiqishi ham mumkin. Bu, albatta, potensial to'siq o'lchamlari, potensial to'siq energiyasi-ning qiymati va potensial to'siq kengligi bilan elektronning to'liqin uzunligining munosabatlariga bog'liq bo'ladi.



10.3 – rasm. Potensial to'siqda elektronlarning energetik sathlari va ularning to'liqin uzunligi

Elektronlar energiyasi uning to'liqin uzunligiga (λ) bog'liqligi quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$E = \frac{h^2 \pi^2}{2m\lambda^2} \quad (10.5)$$

Potensial to'siqda elektronlarning turg'un to'liqin hosil qilishi uchun quyidagi shart bajarilishi kerak:

$$L = \frac{\lambda}{2} \cdot n \quad (10.6)$$

Bunda: L – potensial to'siq kengligi; n – kvant soni (aniq, butun qiymatga ega).

10.5-ifodadagi λ ning o'rniga uning (10.6) – ifodadagi qiymatini qo'ysak, elektronning potensial to'siqdagi energetik qiymati kelib chiqadi:

$$E = \frac{h^2 \pi^2}{2mL^2} n^2 \quad (10.7)$$

(10.7) – ifodadan ko'rinib turibdiki, bunday potensial to'siqda elektron energiyasi har qanday uzluksiz energiya qabul qila olmaydi va ma'lum aniq diskret qiymatlarda – kvantlangan energiyaga ega bo'ladi. Bu qiymatlar kvant soni n – qiymat bilan aniqlanadi.

$$\begin{aligned} n = 1 \quad & \text{bo'lganda,} \quad E_1 = \frac{h^2 \pi^2}{2mL^2} \\ n = 2 \quad & \text{bo'lganda,} \quad E_2 = \frac{h^2 \pi^2}{2mL^2} \cdot 4 = 4E_1 \\ n = 3 \quad & \text{bo'lganda,} \quad E_3 = \frac{h^2 \pi^2}{2mL^2} \cdot 9 = 9E_1 \\ n = 4 \quad & \text{bo'lganda,} \quad E_4 = 16E_1 \\ n = 5 \quad & \text{bo'lganda,} \quad E_5 = 25E_1 \end{aligned} \quad (10.8)$$

Demak, o'lchamlari katta bo'lgan yarimo'tkazgichdagi erkin elektronlarning uzluksiz energetik sathlari o'rniga nanoo'lchamli moddalarda elektron energetik sathlarini kvantlangan bo'lishi bilan farq qiladi. Elektron energiyalari bu holda yetarli darajada katta qiymatlarga ega bo'lishi ham mumkin bo'ladi. Endi (10.7) – ifodaga e'tibor bersak, potensial to'siqni eni L oshgan sari elektronning energetik sathlari qiymati kamayib borishi va L juda katta bo'lganda, ya'ni $L \gg \lambda$, elektronning energetik sathlari orasidagi farq toboro kamayib, qariyb uzluksiz qiymatlarga ega bo'lib qoladi. Bundan shunday xulosa kelib chiqadi, o'rganayotgan moddalarning uchchala koordinatalari bo'yicha o'lchamlari, de-Broyl to'lqin uzunligi qiymatlaridan uncha katta bo'lmagan holatda, ularni nanoo'lchamli moddalar deb qarash mumkin bo'ladi. Bunday moddalarning bir, ikki, yoki uchchala o'lchamlarini de – Broyl to'lqin uzunligi orasidagi munosabatlarga qarab uch xilga bo'lish mumkin.

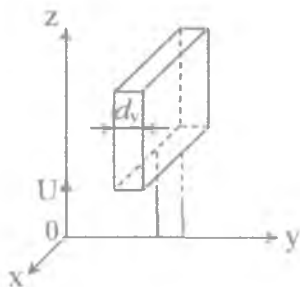
10.4. Nanoo'lchamli moddalarning turlari

Moddalarning bir, ikki yoki uch koordinata yo'nalishlari bo'yicha o'lchamlar qiymatini moddadagi elektronlarning de-Broyl to'lqin uzunligining o'rtasidagi nisbatiga qarab, nanomoddalar uch toifaga bo'linadi. Bular kvant o'ra, kvant ipi va kvant nuqtalardir.

1) **Kvant o'ra** – bu ikki o'lchamli obyekt bo'lib, $2D$ belgisi bilan ifoda qilish qabul qilingan. (D – dimension – o'lchov so'zini qisqartmasi). Bunday moddalarning ikki yo'nalish koordinatalari bo'yicha (x , va y o'qlari bo'yicha) qiymatlari de – Broyl to'lqin uzunligidan juda katta bo'lib, faqat bitta yo'nalish, ya'ni z o'qi bo'yicha qiymati de – Broyl to'lqin uzunligi qiymatlari atrofida bo'ladi. Kvant o'ra bo'lishining sharti quyidagicha:

$$x \gg \lambda_g, \quad y \gg \lambda_g, \quad z \sim \lambda_g \quad (10.9)$$

Bu shunday deganiki. har qanday yarimo'tkazgich modda sirtida qalinligi λ_g ga teng yupqa boshqa modda qatlamining hosil qilish deganidir.



10.4-rasm. Ikki o'lchamli (2D) nanoobyektning tasviri

Ikki o'lchamli (2D) nanoobyektning bir qismini tasviri, y o'qi bo'yicha elektronlarning harakati cheklangan, x va z o'qlarida elektronlar harakati cheklanmagan.

Bu holatda elektronlar yupqa qatlamning x va z yo'nalishlari bo'yicha hech qanday to'siqqa uchramay harakat qila oladi, ammo y yo'nalishi bo'yicha to'siqqa duch keladi, chunki u endi yupqa qatlam moddasidan chiqish ishini yengishi kerak. Bu degani, xona haroratida $kT=0.026$ eV energiyaga ega bo'lgan elektron uchun kamida chiqish ishi $3\div 5$ eVga teng bo'lgan moddadan chiqishdir.

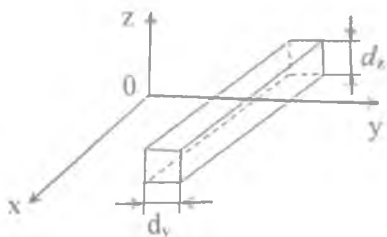
2D kvant o'rasiga maydonli tranzistorlarda metall bilan yarimo'tkazgich o'rtasida hosil qilingan o'ta yupqa SiO_2 qatlami misol bo'la oladi.

2) **Kvant ipi (1D)** – bunday moddalarda ikki koordinata yo'nalishi bo'yicha o'lchamlari λ_g – qiymatlariga mos bo'ladi uchinchi koordinata yo'nalishi bo'yicha qiymati de– Broyl to'lqin uzunligidan (λ_g) juda katta bo'ladi.

$$x \sim \lambda_g, \quad y \sim \lambda_g, \quad z \gg \lambda_g \quad (10.10)$$

Bunday holatda elektron faqat bitta z yo'nalish bo'yicha erkin harakat qila oladi, ammo qolgan ikki yo'nalish x va y bo'yicha harakati cheklanadi, ya'ni potensial to'siqqa uchraydi. Bunga misol qilib, kremniy kristallini sirtiga eni va qalinligi λ_g – ga teng va uzunligi

$L \gg \lambda_g$ bo'lgan *Ge* yupqa qatlamini hosil qilishni ko'rsatish mumkin. Bunday tizimda elektron *Ge* qatlamida faqat bir yo'nalish bo'yicha erkin harakat qila oladi, ammo qolgan ikki yo'nalish – yon va ostki tomonlari boshqa modda *Si* bo'lgani uchun uning harakati chegaralanadi.

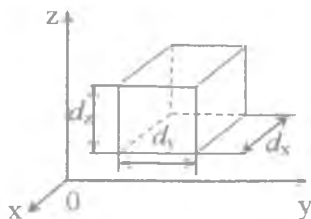


10.5-rasm. Bir o'lchamli (1D) nanoobyektning tasviri

3) **Kvant nuqtasi (0D)** – bunday moddalarning uchchala koordinata yo'nalishi bo'yicha o'lchamlar qiymati λ_g – atrofida bo'ladi.

$$x \sim \lambda_g, \quad y \sim \lambda_g, \quad z \sim \lambda_g \quad (10.11)$$

Bunday holatda elektronning harakati uchchala yo'nalish bo'yicha potensial to'siq bilan chegaralanadi. Kvant nuqtasiga misol, *GaAs* kristalli hajmiga uchta koordinata bo'yicha o'lchovlar qiymati λ_g – miqdoriga teng bo'lgan *AlGaAs* – nanomaterial hosil bo'ladi. Bunday holatda elektron faqat *AlGaAs* nanokristallida harakat qila oladi va undan tashqariga chiqa olmaydi.



10.6-rasm. Nol o'lchamli (0D) nanoobyektning tasviri

10.5. Nanoo'lchamli kristallarda elektronlarning energetik sathlari va kvant holatlar zichligi

Elektronlarning energetik sathlari va ularning kvant holatlar zichligini bilish, aniqlash nanokristallarning fizik, foto va optik xossalarini aniqlovchi va bunday moddalarning potensial imkoniyatlarini to'la ochib beruvchi eng muhim omildir. Nanokristallarda *energetik sathlar* – bu elektronlar qabul qila olishi mumkin bo'lgan energetik holatlardir. *Energetik holatlar zichligi* – bu elektronlarning bir birlik energiya oralig'ida hajm birligida joylasha olishi mumkin bo'lgan kvant holatlar sonidir. Odatda energetik holatlar zichligi quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$g(E) = \frac{dN(E)}{dE} \quad (10.12)$$

Bunda: $dN(E) - E + E + \Delta E$ – oralig'ida elektron joylashishi mumkin bo'lgan holatlar soni. Elektronlarning energetik sathlari bo'yicha taqsimoti, bu holda ham Fermi –Dirak taqsimoti asosida bo'ladi.

Uch o'lchamli odatdagi yarimo'tkazgich materiallarda elektron uchta yo'nalish bo'yicha to'siqsiz harakat qila oladi va ularning energiyasi E

$$E = \frac{p^2}{2m^*} = \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}{2m^*} = \frac{\hbar^2}{2m} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2) \quad (10.13)$$

ga teng bo'ladi.

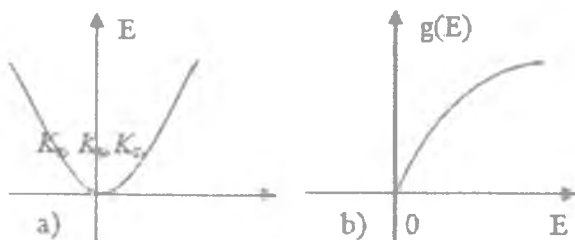
Bunda p , k elektronning impulsi va to'liq funksiyasi (10.12) ga asosan materiallarning o'tkazuvchanlik sohasida elektronning energiyasi va holatlar zichligi energiya oshishi bilan uzluksiz o'zgaradi.

Agar nanoo'lchamli kristall kvant to'sig'i shaklida (2D) bo'lganda elektronlar x va z yo'nalish bo'yicha harakati to'siqsiz va ularning energiyasi ham bu yo'nalishlar bo'yicha uzluksiz o'zgaradi, ammo y yo'nalishi bo'yicha ko'rsatilgandek kvantlangan diskret qiymatlarga ega bo'ladi, ya'ni:

$$E = \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m^*} + E_n + \frac{\hbar^2 k_z^2}{2m^*} \quad (10.14)$$

$$E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2}{m^{*2} L^2} \cdot n^2 \quad (10.15)$$

bo'ldi.



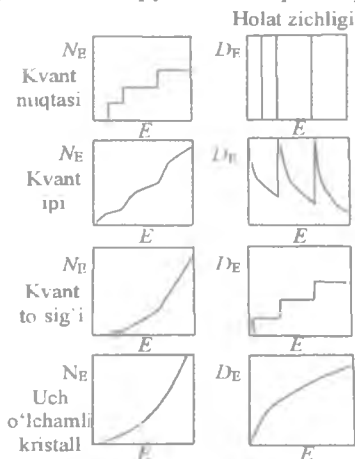
10.7-rasm. a) chegaralanmagan kristallda elektron energiyasining kvazi to'liqin vektori tashkil etuvchilariga bog'liqligi; b) chegaralanmagan kristallda elektronlar uchun kvant holatlar zichligi (g) ning energiya (E) ga bog'liqligi

Demak, bu holatda elektron energiyasi uzlukli diskret qiymatlarga ega bo'ladi. Bunday yo'nalish bo'yicha har bir kvant soniga to'g'ri keladigan energiya E_n ga mos x va z yo'nalishlar bo'yicha uzluksiz juda ko'p energetik sathlarga ega bo'lgan qo'shimcha sohalar hosil bo'ladi. Energiyaning bunday holati ikki o'lchamli sohalar kvantlanishi deb ataladi va shunga mos energetik holatlar zichligi energiya oshishi bilan uzluksiz bo'lmay pog'ona-pog'ona o'zgarishga ega bo'ladi.

Nanoo'lchamli yarimo'tkazgich kristall kvant ip (1D) shaklida bo'lganda elektron energiyasi faqat bitta yo'nalish x bo'yicha uzluksiz bo'lib, y va z yo'nalishlari bo'yicha kvantlangan bo'lishi yuqorida ko'rsatilgan edi. Bu holatda elektronning to'la energiyasi:

$$E = \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m^*} + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^* L_y} n_y^2 + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^* L_z} n_z^2 \quad (10.16)$$

Bunda, n va $m=1,2,3 \dots$ butun qiymatlarni qabul qiladi



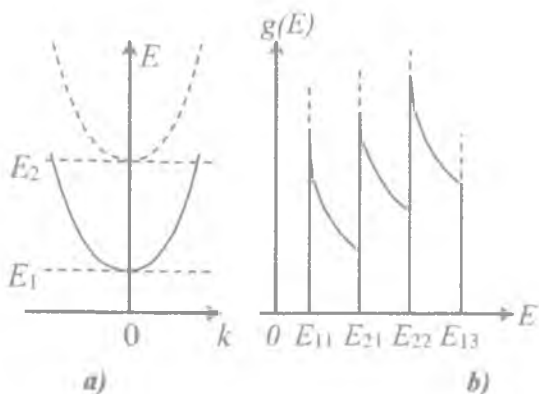
10.8-rasm. To'g'ri burchakli chuqurlik va Fermi – gaz nazariyasiga mos holda to'rtta turdagi kvant tizimlar elektronlar miqdori $N(E)$ (chapda) va holatlar zichligi $D(E)$ ning (o'ngda) energiyaga bog'liqligi

Demak, bu holatda elektron energiyasining qiymatlari ikkita kvant soni n va m hamda potensial to'siqning y va z yo'nalishlardagi kengligiga (L_y , L_z) bog'liq bo'ladi. Bu holatda o'tkazuvchanlik sohasi bir o'lchamli qo'shimcha sohalarga ajraladi (10.8 – rasm). Bunday energetik kvant holatlar zichligi shunga mos holda uzilishga ega bo'lgan tez o'sib kamayuvchi qiymatlar majmuasidan iborat bo'ladi.

Nanoo'lchamli kristall kvant nuqta (0D) holatida bo'lganda elektronlar harakati barcha yo'nalishlar bo'yicha chegaralangan bo'lishi bilan birga ularning energiyasi ham uchchala yo'nalish bo'yicha kvantlangan bo'ladi, xuddi elektronning alohida atomdagi holatiga o'xshash.

$$E_{n,m,k} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^*} \left(\frac{n^2}{L_x^2} + \frac{m^2}{L_y^2} + \frac{k^2}{L_z^2} \right) \quad (10.17)$$

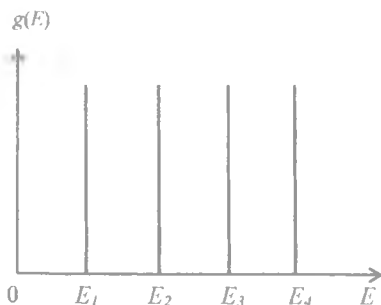
Bunda: $n, m, k=1,2,3 \dots$ butun qiymatlarni qabul qiladi.



10.9-rasm. Kvant iplari uchun energiyaning to'liqin vektoriga (a) hamda holatlar zichligining energiyaga bog'liqligi (b)

Albatta, elektron energiyasi kvant nuqta o'lchamlari L_x, L_y, L_z ga bog'liq bo'lib, ularning energetik spektrlari ham bu yo'nalishlar bo'yicha o'ziga hos kvantlangan bo'ladi.

Kvant nuqtalarida elektron energiyasi faqat diskret qiymatlarga ega bo'lganligi uchun bunday energetik sohalar holat zichligi endi juda kichik bo'lgan yakkա maksimum chiziqlardan iborat bo'ladi.



10.10-rasm. Nol o'lchamli (0D) elektron tizimi uchun holatlar zichligining funksiyasi

10.6. Yarimo'tkazgichli o'ta panjaralar

O'ta panjara bu – o'zida mavjud bo'lgan davriy kristall panjara potentsialidan tashqari kristall panjara doimiysidan ancha katta bo'lgan, ammo nanoo'lchamli boshqa davriy kristall potentsialiga ega bo'lgan sun'iy kristalldir.

Bu degani ma'lum kristall yuzasida epitaksial yo'l bilan nanoo'lchamli boshqa kristall qatlamlarini ustma-ust davriy takrorlash usuli bilan olingan kristalldir. Bunda kristall sirt yuzasida hosil qilinayotgan boshqa nanoo'lchamli kristall qatlamlarning qalinligi $5\div 10$ nm atrofida bo'ladi.

Odatda ikki xil o'ta panjaralar mavjud: kompozitsion va legirlangan.

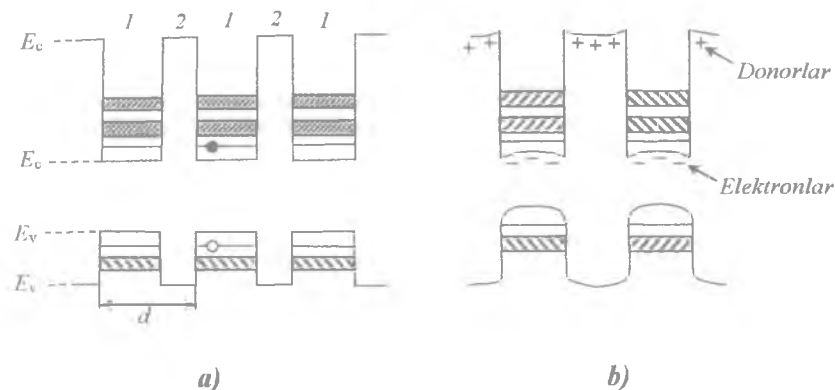
Kompozitsion o'ta panjaralar har xil taqiqlangan sohaga ega bo'lgan nanoqatlamlari yarimo'tkazgichlarni ustma-ust (ketma-ket) o'stirish yo'li bilan yaratiladi.

Masalan, $GaAs$ kristall yuzasiga nanoo'lchamli In_xGaAs , qatlami, uning ustiga yana nanoo'lchamli $GaAs$ qatlami ketma-ket hosil qilingan tizimi.

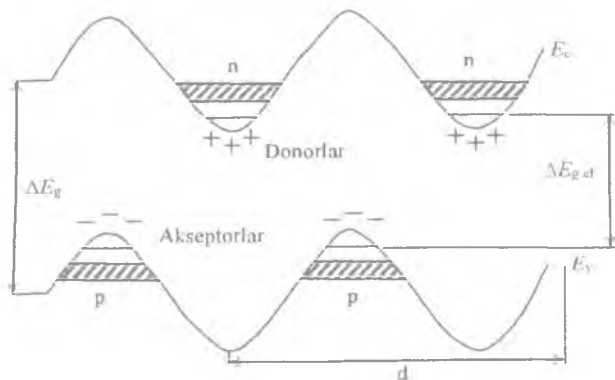
Legirlangan o'ta panjara bir xil yarimo'tkazgich materialining turli xil tur o'tkazuvchanlikga ega bo'lgan davriy takrorlanib boradigan $n-p-n-p...$ nanoqatlamlar majmuasidan iborat tizimidir.

Masalan, kremniy kristalli ustiga 5-10 nm o'lchamidagi n va p tur o'tkazuvchanlikga ega bo'lgan kremniy qatlamlarni epitaksiya yordamida ketma-ket davriy o'stirishdir. Bunday o'ta panjaralarning o'lchamlari bir necha nm bo'lganligi uchun ularda elektronlar kvantlangan bo'lishi bilan birga, odatdagi kvant to'siq yoki kvant nuqtalardan farqli holda kvantlangan energetik sathlar o'rniga juda tor energetik sohalar paydo bo'ladi. O'ta panjaralarda qatlamlar soni va ularning qalinligini boshqarish yo'li bilan hosil bo'ladigan kvantlangan energetik sohalar parametrlarini boshqarish mumkin. 10.12-rasmda ko'rsatilganidek legirlangan o'ta panjaralarda elektron

va kovaklar bir-biridan fazoviy ajratilganligi uchun ular o'zaro rekombinatsiyalana olmaydi. Shuning uchun bunday strukturalarda zaryad tashuvchilarning yashash vaqti juda katta qiymatlarga ega bo'ladi.



10.11-rasm. Oddiy kompozitsion (a) va modulyatsiyali legirlangan (b) o'ta panjara energiya diagrammalari: d – o'ta panjara doimiysi



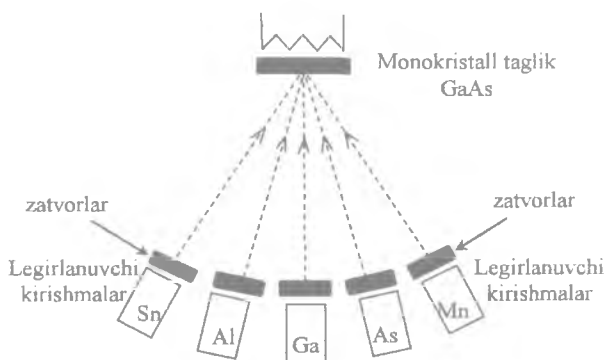
10.12-rasm. Legirlangan o'ta panjara energiya diagrammasi: $\Delta E_{g\text{ ef}}$ – o'ta panjara taqiqlangan sohasining effektiv kengligi; d – uning davri

Quyidagi 10.11 va 10.12-rasmlarda kompozitsion va legirlangan – kompozitsion o'ta panjaralar va ularning energetik sohalarining tuzilishi ko'rsatilgan.

10.7. Nanoo'lchamli strukturalarni hosil qilish usullari

Nanoo'lchamli strukturalarni hosil qilish usullari juda ko'p bo'lib, hozirda yanada yangi usullar yaratilmoqda. Bu mavzuda asosan yarimo'tkazgich nanomateriallar olishda eng ko'p ishlatiladigan usullar haqida qisqacha ma'lumot berildi.

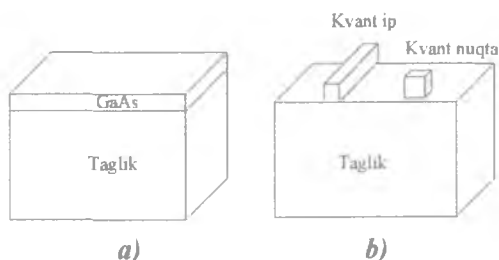
1. Molekulyar – nurli epitaksiya usuli (MNE). Bu usul o'z mohiyati jihatdan moddalarni termik bug'lantirish usulining takomillashgan va o'ta yuqori vakuumda bajariladigan (10^{-8} Pa = 10^{-10} mm. sim. ust) va bug'lanishi lozim bo'lgan moddalarning (bug'lantirish nuqtalari bir nechta bo'lishi mumkin) oqimini, tezligini, tarkibini, taglikda joylashishini, koordinatalari va o'lchamlarini boshqarish imkoniyatiga ega. Bu usul taglikda hosil bo'ladigan yupqa qatlamlarning qalinligi (bir nm aniqlik bilan) va tarkibining tuzilishini juda katta aniqlik bilan (massalar spektrometri, OJE spektroskopiya, lazer nurlari, elektron mikroskoplar,...) to'g'ridan - to'g'ri kuzatish, boshqarish imkonini beradigan yuqori texnologik tizimlarni amalga oshiradigan zamonaviy murakkab elektron qurilmadir (10.13-rasm).



10.13 – rasm. Molekulyar – nurli epitaksiya qurilmasining tuzilishi:

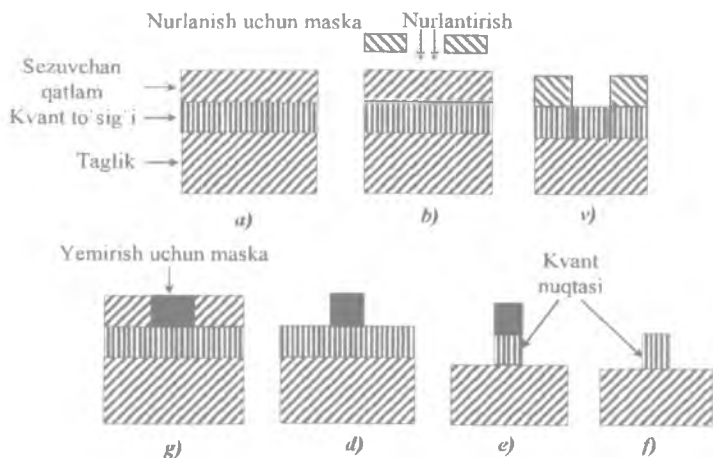
GaAs tagligida $Al_xGa_{1-x}As$ qattiq eritma yupqa qatlami o'stirish

2. Kvant ipi va kvant nuqtasini hosil qilishning yana bir keng tarqalgan usuli bu *litografiya usulidir*. Yarimo'tkazgich sirtiga kvant chuqurlik qatlami hosil qilingandan so'ng bu qatlam ustiga juda yupqa yorug'lik ta'sirida o'z xossalarini o'zgartiradigan (erishi oson bo'ladigan) polimer [$C_5O_2H_8$]_n – fotorezist o'tqaziladi. Bu fotorezist ustiga kerakli shakl va o'lchovga ega bo'lgan fotoshablon o'rnatiladi (ma'lum texnologiya asosida yaratilishi lozim bo'lgan kvant ipi yoki kvant nuqtasi shakli tushirilgan shaffof shisha), fotoshablon ustidan hosil qilinishi kerak bo'lgan kvant ipi yoki kvant nuqtasi o'lchovlariga mos (bir necha nanometr) to'lqin uzunlikga ega bo'lgan elektron oqimi yuboriladi (elektron oqimining to'lqin uzunligi $\lambda = \frac{h^2\pi^2}{2mE}$) ga teng, shundan so'ng fotorezistli struktura ma'lum kimyoviy suyuqlik yordamida (KOH) yuviladi. Yorug'lik tushgan joylardagi fotorezistlar yuvilib, darchalar paydo qilinadi. Bu darcha ostidagi kvant o'ra qatlami kimyoviy yo'l bilan olinib tashlangandan so'ng qolgan fotorezist qoldiqlari ham kimyoviy yo'l bilan olinib tashlanadi va kristall sirtida kerakli nanoo'lchamli kvant nuqtalar hosil bo'ladi.



10.14– rasm. a) taglik ustida arsenid galliy qatlamidan tashkil topgan kvant o'ra; b) litografiya usuli yordamida olingan kvant ip va kvant nuqta

Yuqorida keltirilgan usullar kvant o'ra, kvant ip va kvant nuqtalarini kristall sirtida kerakli o'lchov va ketma-ketliklarda hosil qilish imkonini beradi.



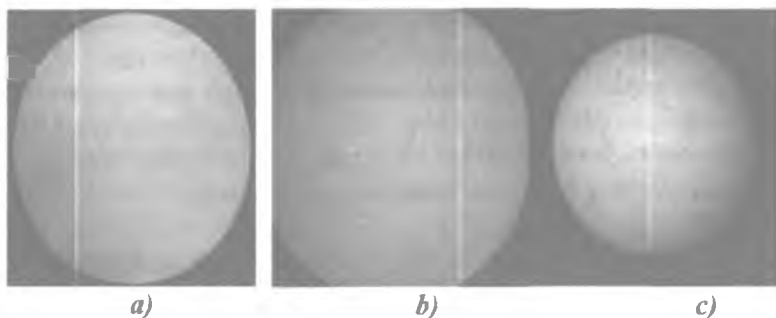
10.15 – rasm. Elektron – nurli litografiya usulida hosil qilinadigan kvant iplar yoki nuqtalarning olinish bosqichlari: a) taglikdagi kvant o'raning himoya qatlam bilan dastlabki qoplanishi; b) maska orqali namunani nurlantirish; v) radiatsiyaga sezgir himoya qatlamining yuvib tashlangandan keyin ko'rinishi; g) yemirish orqali maskani shakllantirish; d) sezgir himoya qatlam olib tashlangandan keyingi holati; e) kvant o'ra materialining bir qismi yemirilgandan keyingi holat; f) yemirish maskasini olib tashlangandan keyin nanostrukturaning so'nggi ko'rinishi

Kvant iplari yoki kvant nuqtalari kabi nanostrukturalarni kristall hajmida hosil qilish, ularning yanada o'rganilmagan boshqa fizik xususiyatlarini ochishga imkon berishi mumkin. Kristall hajmida kvant nuqtalarini hosil qilishning asosiy yo'llaridan biri bu – kirishma atomlar klasterlarini yarimo'tkazgich hajmida hosil qilishdir.

Klaster ma'lum miqdordagi (bir nechta atomdan to bir necha ming atomgacha) kirishma atomlarning ma'lum bir tartibga mos holda shakllangan tuzilishi bo'lib, kristall panjara tuzilishini o'zgartirmagan holda uning fundamental xossalarini tubdan boshqarish imkonini beradi.

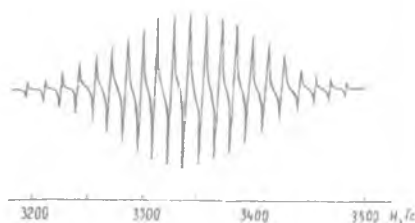
Klasterlarni tashkil etgan kirishma atomlar tabiatiga qarab monoatomli yoki har xil atomli (binar kirishmalar) bo'lishi bilan birga elektr neytral, ko'p zaryadli va yetarli magnit momentiga ega bo'lishi mumkin. Kristallning klaster shakllangan qismining xossalari boshqa qismlaridagi elektrofizik xossalardan tubdan farq qilib, mos holda klaster–yarimo'tkazgich kontaktlari, nanoo'lchamli Shottki to'siqlari, p - n o'tishlar, geteroo'tishlar hatto varizon strukturalarni hosil qilish imkonini beradi.

Klasterlarning shakllanishi, ularning tuzilishi, tarkibi va o'lchamlari nomuvozanat kirishma atomlari bo'lgan kristallni qo'shimcha turli xil termodinamik usullar bilan ishlov berishga bog'liq. Klassik nazariya bo'yicha hamma kirishma atomlar har qanday yarimo'tkazgichlarda klasterlar hosil qilishi mumkin, ammo ularning shakllanish jarayoni kirishma atomlarning nomuvozanat sharoitidagi diffuziya parametrlari va eruvchanligiga bog'liq. Quyidagi 10.16-rasmda nikel atomlarining kremniy kristali sirtida shakllangan klasterlarining holati ko'rsatilgan.

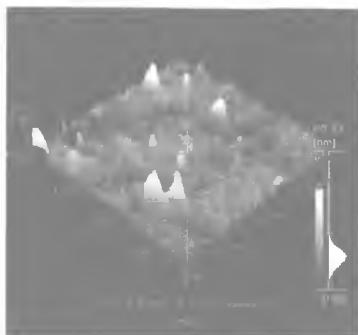


10.16- rasm. Nikel atomlarining klasterlarini kremniy kristall sirtidagi holatlari: a) tekis taqsimlangan holat: b) tartiblangan holat: c) halqasimon holat

10.16-rasmdan ko'rinib turibdiki, klasterlar o'lchamlarini boshqarish bilan birga ularning o'zaro ta'sir holatlarini ham boshqarish mumkin ekan.



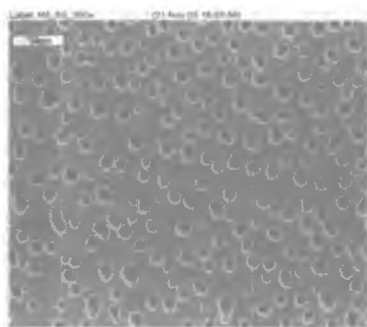
a)



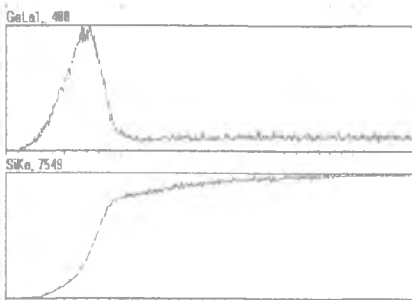
b)

10.17-rasm. Marganets atomlarining kremniydagi nanoklasterlari:

a) EPR spektri [Mn]₄, b) atom kuchlari mikroskopida olingan spektri



a)



b)

10.18-rasm. Germaniy atomlarining kremniydagi klasterlari:

a) Jeol superprobe JXA-8800R/RI qurilmasida olingan germaniy atomlarining kremniy yuzasidagi klasterlari, b) germaniy atomlarining kremniy yupqa sirtini Jeol superprobe JXA-8800R/RI qurilmasida olingan taqsimoti

10.8. Nanoo'lchamli yarimo'tkazgichlar asosidagi yangi elektron qurilmalar

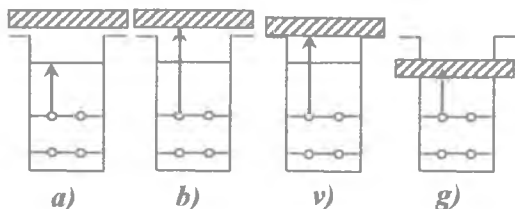
Oldingi mavzuda ko'rsatilganidek, nanoo'lchamli yarimo'tkazgich materiallarda ro'y beradigan asosiy fizik hodisalar – kvant o'ra, kvant ip va kvant nuqtalarda elektronlar energetik sathlarning kvantlangan holatga o'tishi, birinchidan energetik sathlar va ular orasidagi energetik masofalar qiymatini kvant o'ra, ip va nuqtalar o'lchovlari bilan boshqarish mumkinligi bo'lsa, ikkinchi tomondan nanoo'lchamli kirishmalarda elektronlar harakati asosan tunnel effekti hisobidan amalga oshirishidir. Bu materiallarning funksional xossalari asosida tubdan yangi elektron qurilmalarni yaratish imkonini berdi. Nanoo'lchamli qurilmalar nafaqat o'lchamining o'ta kichik bo'lishiga, balki tez ishlash xususiyati, kam energiya sarflashi bilan yangi avlod – nanoo'lchamli integral sxemalarni yaratish imkonini beradi.

1. Infraqizil detektor. Infraqizil to'lqin uzunligidagi nurlarni qabul qilib, ularni elektr signallarga aylantirib beruvchi qurilmalarga – *infraqizil detektorlar* deyiladi. Bularga qo'yiladigan asosiy talab – katta to'lqin uzunligiga ega ($\lambda \approx 8 \div 20$ mkm) va eng kichik quvvatli ($10^{-6} \div 10^{-11}$ W) infraqizil nurlarni qayd etishidir. Odatdagi yarimo'tkazgich materiallar o'zlarining taqiqlangan soha kengligiga va taqiqlangan sohasida mavjud kirishma atomlar energetik sathlarining qiymatiga mos ($h\nu = \frac{1.24}{\lambda}$) to'lqin uzunligidagi nurlarni qayd qila oladi. Ammo, ularning xossalari zamonaviy harbiy sohalar va optik tolali qurilmalarni yaratishdagi talablarga javob bera olmaydi. Bu muammoni, kvant o'ralardagi elektron sathlar orasida elektronlarni o'tishlari orqali juda oson hal qilsa bo'ladi.

Elektron o'tishlar yuzaga kelishi uchun energetik sathlar orasidagi energiyalarga mos kelgan

$$\left(\Delta E_1 = \frac{1.24}{\lambda_1} = E_2 - E_1, \quad \Delta E_2 = E_3 - E_2 = \frac{1.24}{\lambda_2}, \quad \Delta E_3 = E_{k2} - E_2 = \frac{1.24}{\lambda_3}, \quad \Delta E_4 = E_{M2} - E_2 = \frac{1.24}{\lambda_4} \right)$$

to'lqin uzunlikka ega bo'lgan infraqizil nurlar orqali amalga oshiriladi. Bunday o'tishlar natijasida elektr toki paydo bo'ladi, ya'ni infraqizil nurlar elektr signalga aylanadi.

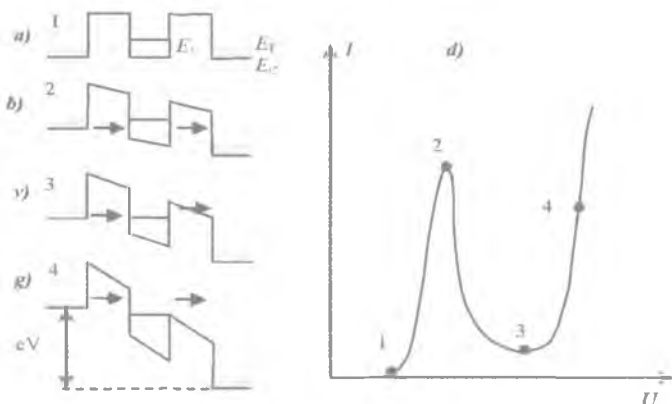


10.19 – rasm. Kvant o‘ralari asosida ishlaydigan IQ fotodetektorlarni quyidagi turlarining o‘tkazuvchanlik sohasi (shtrixlangan) va elektronlar o‘tishlarining (vertikal strelkalar) sxematik tasvirlanishi: a) ikki lokallashgan holatlar orasida; b) lokallashgan holatdagi sohaga; v) bog‘langan holatdan kvazi bog‘langan holatga; g) bog‘langan holatdan mini sohaga

Kvant nuqtaga ega bo‘lgan bunday yarimo‘tkazgich material yetarli katta to‘lqin uzunligiga ega bo‘lgan infraqizil nurlarni qayt qilish imkonini beradi. Kvant nuqtalar majmuasini yaratish va kvant nuqtalar o‘lchamlarini boshqarish orqali nafaqat energetik sohalar energiyasini boshqarish, balki ularda kichik energetik sathlarni ham hosil qilish mumkin bo‘ladi. Demak, odatdagi yarimo‘tkazgich materiallar qayd qila olmaydigan katta to‘lqin uzunlikdagi infraqizil nurlarni qayd qiluvchi detektorlarni yaratish mumkin ekan. Kremniyda marganets atomlari hosil qilgan nanoklastlar – kvant nuqtalar asosida yaratilgan infraqizil detektorlarning spektral tavsifi 10.19-rasmda keltirilgan. Rasmdan ko‘rinib turibdiki, kvant nuqtalari mavjud bo‘lgan kristallning nafaqat infraqizil nurni sezish sohasi yetarli darajada kengayadi (katta to‘lqin uzunligi tomonga), balki bunday kristallarning fotosezgirlik xossalari ham oshadi.

2. Rezonansli tunnel diod. Tunnel diodning ishlashi va uning volt – amper tavsifining fizik ma‘nosi bizga ma‘lum. Ammo huddi tunnel diodga o‘xshash, manfiy differensial qarshilikga ega bo‘lgan elektron qurilmalarni kvant o‘ralariga ega bo‘lgan kristallarda yaratish mumkin ekan. Bular nafaqat o‘ta kichik o‘lchamli, balki juda kam energiya talab qiladigan va tez ishlaydigan qurilmalar hisoblanadi. Tunnel

diodlar o'ta kam energiya sarfi, tez ishlashi, juda kichik o'lchami va bir qator funksional imkoniyatlari bilan odatdagi tunnel diodlaridan farq qiladi. Tunnel diodlar tuzilishi, kuchli legirlangan (n^+) va taqiqlangan sohasi $\Delta E_g \sim 2.2$ eV teng bo'lgan *GaAlAs* kristalli orasiga joylashtirilgan kvant o'ra vazifasini bajaruvchi kam legirlangan, qalinligi 5÷10 nm ga teng *GaAs* ($\Delta E_g \sim 1.43$ eV) dan iborat bo'ladi. Ularning energetik sohalar diagrammasi 10.20-rasmda ko'rsatilgan.



10.20 – rasm. Rezonans tunnel diodining o'tkazuvchanlik sohasi sxematik ko'rinishi: a) tashqi kuchlanish bo'lmaganda; b) – g) qo'yilgan kuchlanishning oshishida; d) tizimning volt-amper tavsifi

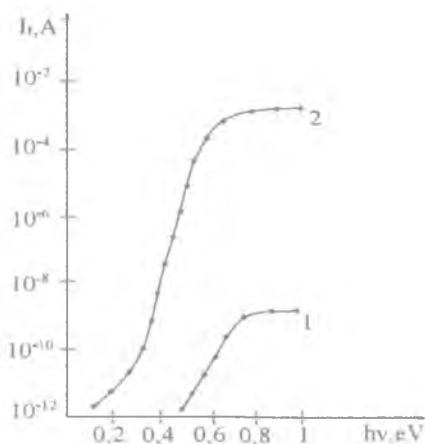
1 – holat, ya'ni tashqi maydon qo'yilmaganda, kvant o'ralaridagi yagona energetik sath Fermi sathidan ancha yuqorida joylashgani uchun elektronlarni n^+ dan *GaAs* ga tunnel orqali o'tishi mumkin emas.

2 – holatda kuchlanishni asta-sekin oshirib, uning qiymati $E = \frac{2E_g}{3}$ teng bo'lganda, n^+ sohadagi Fermi sathi bilan kvant o'radagi energetik sath o'zaro mos keladi, ya'ni rezonans holati yuzaga keladi. Bu holatda elektronning potensial to'siqdan o'tish ehtimoli keskin oshadi. Elektronning kvant o'radagi to'liqin funksiyasi, ikki potensial to'siq ichida turg'un to'liqin holatiga o'tadi va chapdan kvant o'raga

kelgan elektron to'liqini kvant o'radagi elektron sathini rezonans qo'zg'atishga olib keladi. Natijada elektronlarni potensial to'siqdan tunel o'tishi ehtimoli oshadi va tunel toki eng katta qiymatga erishadi.

3-holatda kuchlanish yanada oshirilganda, E_f energetik sath n qatlamdagi Fermi sathidan pastda bo'ladi va elektronlarning tunnel harakati kamayadi va nihoyat to'xtaydi. Tok eng kichik qiymatga ega bo'ladi. Kuchlanishning yanada oshishi odatdagi termoemissiya hisobiga tokning oshishiga olib keladi. Demak, bunday qurilmaning volt – amper tavsifida manfiy differensial qarshilik kuzatiladi.

Hozirda elektronikada shunday rezonans tunnel diodlar asosida yaratilgan asbob va qurilmalar ko'plab qo'llanilmoqda.



10.21-rasm. Kremniy namunalarining fotoo'tkazuvchanligi fotonlar energiyasiga bog'liqligi: 1 – nanoklastersiz, 2 – nanoklasterli

Nanostrukturali materiallar asosida juda ko'p yangi turdagi spektrlari boshqariladigan va juda kichik kuchlanishlarda ishlaydigan infraqizil nurli lazerlar, bitta elektronli tranzistorlar, optik modulyatorlar va boshqa elektron qurilmalar kashf etilgan.

10.9. Nanoklasterli kremniyning magnit xossalari

Bosqichma-bosqich haroratni ma'lum bir tezlikda oshirish orqali kirishma atomlarni diffuziya qilish asosida nanoklasterlarni shakllantirish jarayonida marganets kirishma atomlarning maksimal ishtirokini ta'minlash bilan bir qatorda kremniy materialning butun hajmi bo'yicha magnit xususiyatli nanoklasterlarning olish imkoniyatlari mavjudligini ko'rsatdi. Diffuziya jarayonida kirishma atomlarining faollashish energiyasini tajribada aniqlangan qiymati va unga mos ravishda diffuziyaning haroratga bog'liqligi $D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$,

yuqori haroratli diffuziya asosida kirishmalarni kremniydagi eruvchanlik formulasidan past haroratli diffuziya sharoitida foydalanish mumkin emasligini to'liq asoslab berildi. Past haroratli diffuziya jarayoni yuqori haroratli diffuziyadan ancha tez sodir bo'ladi va tugunlararo kirishma atomlarning diffuziyasi haqidagi farazni to'liq tasdiqlaydi.

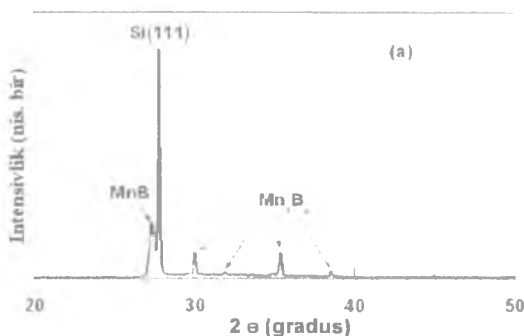
Yangi texnologiya bilan kremniy panjarasiga kiritilgan marganets atomlarining holati zamonaviy elektron paramagnitli rezonans (EPR), atom kuchli mikroskopi (AKM) hamda rentgen strukturali tahlil usullarda tadqiq qilindi.

Kremniy panjarasidagi marganets atomlarining holati tabiati EPR spektri yordamida «Broker» qurilmasida 77 K haroratda tadqiq qilindi. Unda EPR spektrlarini qayt qilish uchun to'liq uzunligini 3 santimetrli oraliqda ishlaydigan spektrometrdan foydalanildi. Asbobni integral sezgirliigi $\sim 5 \cdot 10^{10}$ spin/Gs bo'lib, o'lchashni o'rnatish aniqligi 0,001% ni tashkil qildi. Kuzatilayotgan spektrdagi g-faktorni aniqlash $g=2,0024$ marker chizig'i bo'yicha amalga oshirildi.

Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, Fermi sathi $F=E_V+(0,38 \pm 0,45)$ eV oraliqdagi yangi texnologiya bo'yicha olingani $p\text{-Si}<B,Mn>$ namunalarida 21 ta chizig'idan iborat bo'lgan o'ta yupqa EPR spektri aniq kuzatildi (10.17-rasm, a). Bu natijalar nanoklasterlarning tarkibi to'rtta marganets atomidan tashkil topganini tasdiqlaydi. Fermi sathi $F=E_V+(0,38 \pm 0,45)$ dan taqiqlangan sohaning o'rtasigacha $F=E_V+(0,52 \pm 0,55)$ eV siljiganda, Mn^{2+} holatidagi atomlar konsentratsiyasi kamayishi va mos holda Mn^{3+} holatidagi

atomlar konsentratsiyasi oshishi hisobiga EPR spektrining intensivligini kamayishi kuzatildi

Janubiy Koreyaning Dongguk universiteti yarimo'tkazgichlarni Kvantofunksional tadqiqot markazi jamoasi bilan ham-korlikda olib borilgan izlanishlar uchun magnit nanoklasteriga ega bo'lgan kremniy namunalari tayyorlandi. Rentgen difraktometrida Mn bilan legirlangan Si namunalarining strukturasi tahlili amalga oshirildi. 10.22-rasmda Si [111] da manganets atomlarining nanoklasterlari bo'lgan namunalarda kuzatilgan difraksion cho'qqilar keltirildi, bu (Mn_4B) manganets-bor kompleksi hosil bo'lishini ko'rsatadi.



10.22-rasm. Magnit klasterlarining rentgenografik tasvir

Diffuziya jarayonida aniq termodinamik sharoitlarni bilish kremniy panjarasida klasterlar hosil bo'lishining eng kichik potensial energiyasini aniqlash imkonini beradi. Manganets atomlarining o'zaro Kulon ta'sirlashishi hamda manganets atomlari bilan bor atomlarining o'zaro ta'sirini hisobga olib amalga oshirilgan nazariy hisoblashlar asosida nanoklasterlarning o'lchami aniqlandi. Bu 0,7 dan 1,4 nm gacha qiymatni tashkil etdi.

Shunday qilib, past haroratli diffuziya jarayonida nafaqat sirti erroziyaga uchramagan va sirt osti sohasida silitsidlar hosil bo'lmagan kremniy namunalarini olish hamda kremniy namunalarida belgilangan chuqurlikda va konsentratsiyada manganets kirishma atomlarini bir tekis taqsimlab legirlash mumkinligi ko'rsatib berildi.

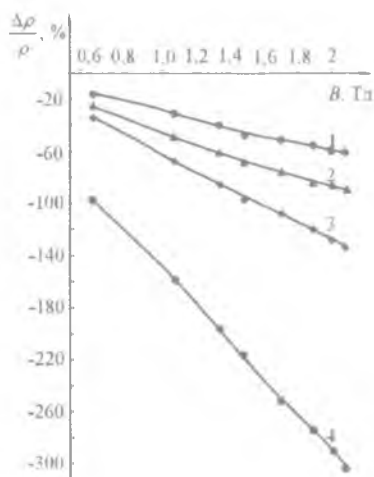
Manfiy magnit qarshilik (MaMQ) hosil bo'lishida magnit nanoklasterlarning hissasini bilish uchun turli konsentratsiyada

nanoklastarlari bo'lgan bir xil solishtirma qarshilikli namunalar tayyorlandi. $N=10^{15} \text{ sm}^{-3}$ nanoklasterlar konsentratsiyasiga ega bo'lgan namunalarda xona haroratida va elektr maydon kuchlanganligi $E=100 \text{ V/sm}$ bo'lganda qiymati juda katta $\Delta\rho/p \sim 300 \%$ bo'lgan MaMQ kuzatildi va bunda magnit maydonining sezgirliigi $\alpha=150 \%/Tl$ ni tashkil qildi (10.23-rasm, *a*). Tajriba natijalari shuni ko'rsatdiki, magnit nanoklasterlarining konsentratsiyasi ortishi bilan MaMQ qiymati sezilarli oshdi.

Olingan natijalar kremniy namunalarida MaMQning paydo bo'lishi va uning tabiati bevosita panjaradagi marganets atomlarining nanoklasterlari mavjudligi bilan bog'liq ekanligi hamda nanoklasterlar konsentratsiyasini o'zgartirish yo'li bilan MaMQ qiymatini keng oraliqda boshqarish imkoniyatlari mavjudligini tasdiqladi. Nanoklasterlarning konsentratsiyasini $2 \cdot 10^{13} \div 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ oraliqda oshirish bilan, bir xil tajriba sharoitida MaMQ qiymati $8 \div 10$ marta oshishi aniqlandi va bunda namunalarning magnit maydoniga sezgirliigini $\alpha=28 \%/Tl$ dan $\alpha=150 \%/Tl$ gacha oshirish mumkinligi ko'rsatib berildi. Ishlab chiqilgan, takomillashtirilgan diffuzion texnologiyadan foydalanilib olingan namunalarda nanoklasterning konsentratsiyasini $N=10^{17} \text{ sm}^{-3}$ gacha yetkazish mumkinligi aniqlandi. Bunda namunalardagi MaMQ ning qiymati 1,5 darajagacha katta bo'lishini kutish mumkin.

10.23-rasm, *b* da Fermi sathining holati $F=E_V+0,29 \div E_V+0,48 \text{ eV}$ oraliqda bo'lgan $p\text{-Si} < B, Mn >$ nanoklasterli namunalarning hamda oshirib kompensatsiyalangan Fermi sathi $F=E_S-(0,35 \div 0,54) \text{ eV}$ oraliqda bo'lgan $n\text{-Si} < B, Mn >$ namunalarni magnit qarshiligiga magnit maydon qiymatining ta'siri tasvirlangan. p – turdagi Fermi sathi $F \leq E_V+0,28 \text{ eV}$ bo'lgan namunalarda katta bo'lmagan musbat magnit qarshilik (MuMQ) kuzatildi va uning qiymati o'zgarishi magnit maydoniga kuchsiz bog'langanligi aniqlandi. Fermi sathi $F \geq E_V+0,29 \text{ eV}$ ga siljiganda magnit maydonini kichik qiymatlarda, qiymati katta bo'lmagan MuMQ kuzatildi va uning qiymati magnit maydonini oshishi bilan kamaydi. Magnit maydon induksiyasi $B \geq 1,8 \div 1,9 \text{ Tl}$ bo'lganda bu namunalarning magnit qarshiligi ishorasi o'zgardi, ya'ni MuMQ dan MaMQ ga o'tdi (10.23-rasm, *b*, *1* – egri chiziq). Ko'p sonli tajribalar shuni ko'rsatdiki, nanoklasterli kremniyda Fermi

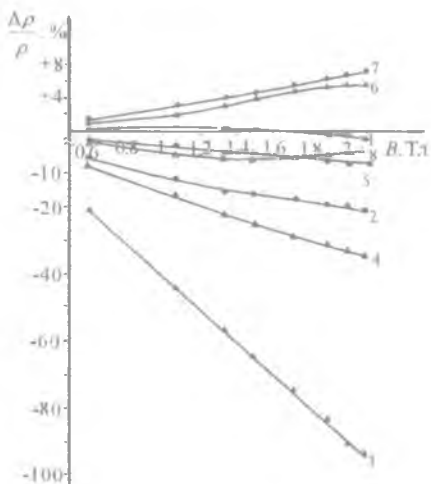
sathining chegaraviy qiymati $F \sim E_V + 0,29$ eV bo'lganda MaMQ effekti namoyon bo'lar ekan. Marganets atomlarining magnit nanoklasterlariga ega bo'lgan kremniy namunalarda Fermi sathi $F \sim E_V + 0,29$ eV dan taqiqlangan sohaning o'rtasiga siljishi MaMQ effekti kuchayishiga olib keldi (10.23-rasm, b dagi 2, 3-chiziq).



- 1- $N_{(Mn)4} = 2 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$,
 2- $N_{(Mn)4} = 2 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$,
 3- $N_{(Mn)4} = 5 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$,
 4- $N_{(Mn)4} = 10^{15} \text{ sm}^{-3}$.

10.23-rasm, a).

Turli konsentratsiyadagi nanoklasterlarga ega bo'lgan namunalardagi MaMQ ning magnit maydon qiymatiga bog'liqligi. $T=300 \text{ K}$, $E=100 \text{ V/sm}$



- p*-turdagi: 1- $F = E_V + 0,29 \text{ eV}$,
 2- $F = E_V + 0,32 \text{ eV}$, 3- $F = E_V + 0,385 \text{ eV}$, 4- $F = E_V + 0,434 \text{ eV}$, 5- $F = E_V + 0,48 \text{ eV}$.

- n*-turdagi: 6- $F = E_S - 0,45 \text{ eV}$,
 7- $F = E_S - 0,384 \text{ eV}$,

- p*-turdagi nanoklastersiz:
 8- $F = E_V + 0,385 \text{ eV}$

10.23-rasm, b).

Fermi sathining turli holatlarida *p*-Si<B, Mn>i va *n*-Si<B, Mn> namunalardagi MQ ni magnit maydoni qiymatiga bog'liqligi. $E=100 \text{ V/sm}$, $T=300 \text{ K}$

MaMQ magnit maydoning qiymati ortishi bilan oshadi va $T=300$ K haroratda Fermi sathi qiymati $F \sim E_V + 0,375 \div E_V + 0,385$ eV bo'lgan namunalarda MaMQ maksimal qiymatga erishdi. Oshirib kompensatsiyalangan namunalarda xona haroratida Fermi sathiga bog'liq bo'lmagan holda uncha katta bo'lmagan MuMQ kuzatildi (10.23-rasm, *b* dagi 6, 7 – chiziq). O'rganilgan namunalarda Fermi sathi o'tkazuvchanlik sohasini tagidan taqiqlangan sohani o'rtasiga siljiganda MuMQ qiymati chiziqli oshib bordi va o'zgarish 2,5 % dan 7 % gacha bo'ldi. Harorat pasayishi bilan MuMQ qiymati sekin kamaydi va $T \sim T_{por}$ (T_{por} - MaMQ ni paydo bo'lish harorati) bo'lganda MQ ni ishorasi MuMQ dan MaMQ ga o'zgardi. Fermi sathi taqiqlangan sohaning o'rtasidan o'tkazuvchanlik sohasi tomon siljishi bilan marganets atomlari ikki karra zaryadlangan holatidan bir karra zaryadlangan holatiga o'tishi kuzatiladi va shunga mos ravishda Fermi sathi $F = E_C - 0,37$ eV holatida bo'lgan namunalarda $T=150$ K haroratda MaMQning maksimal qiymati 35% ni tashkil qildi. Oshirib kompensatsiyalangan namunalarda MaMQ ni kuzatilishi marganets atomlarini $S=5/2$ spinga ega ekanligi va ularni zaryad holati bilan tushuntirildi.

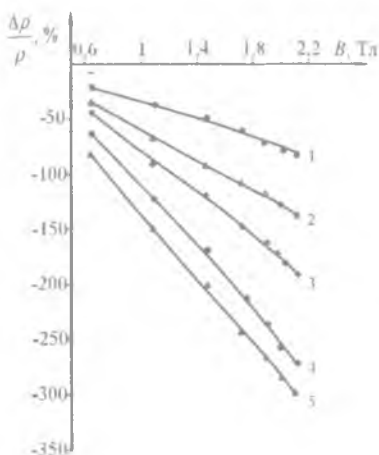
MaMQ ni maksimal qiymati Fermi sathi $F = E_V + (0,375 \div 0,385)$ eV bo'lgan namunalarda kuzatilishi aniqlandi. Bunday namunalarda Fermi sathining holatini boshqarib manfiy magnit qarshilik qiymatini o'zgarish qonuniyati aniqlandi

Harorat pasayishi bilan MaMQ ni qiymatining ortishi kuzatilib, magnit maydonni ortishi bilan namunalarning MaMQ gini $\frac{\Delta\rho}{\rho}(B)$ chiziqli bog'liqligi saqlanar ekan (10.24-rasm, *a*).

Kompensatsiyalangan va oshirib kompensatsiyalangan namunalarda MQ ni tadqiq qilishda olingan natijalar asosida, Fermi sathining taqiqlangan sohada joylashish hoatiga bog'liq MaMQ va MuMQ ni kuzatilishini past va yuqori harorat chegaralari aniqlandi (10.24-rasm, *b*).

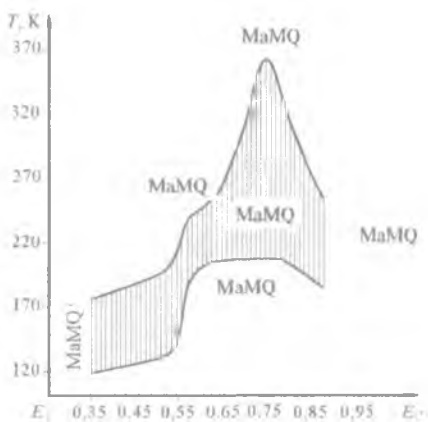
10.24-rasm, *b* da marganets bilan legirlangan kremniyda etarli darajada keng harorat oralig'ida katta MaMQ kuzatildi. Kremniyda Fermi sathining holatini boshqarib MaMQ ning qiymatini etarli darajada katta oraliqda ($T=300$ K haroratda $1 \div 100$ %) o'zgartirish

imkoni borligi aniqlandi. Fermi sathining holati $F=E_V+0,29$ eV dan $F=E_C-0,32$ eV gacha chegara oralig'ida, haroratning $T=120\div370$ K sohalari oralig'ida MaMQ kuzatildi.



1-300 K, 2-283 K, 3-270 K,
4-262 K, 235 K.

10.24-rasm a).
Fermi sathi holati $F=E_V+0,385$
eV bo'lgan p-Si<B,Mn>
namunadagi MaMQ ni turli
haroratlarda magnit maydonga
bog'liqligi. $E=100$ V/sm

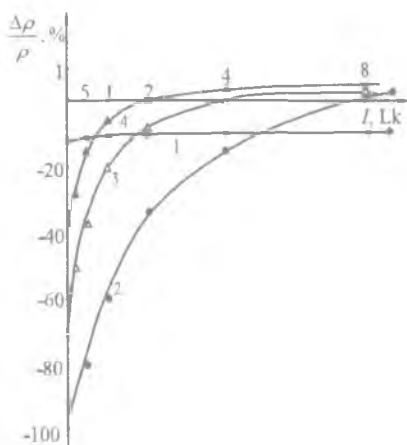


10.24-rasm, b).
MaMQ mavjudligining harorat
sohasini, marganets kirishma
atomlari bilan legirlangan
kremniydagi Fermi sathining
holatiga bog'liqligi.
 $V=2Tl$, $E=100$ V/sm

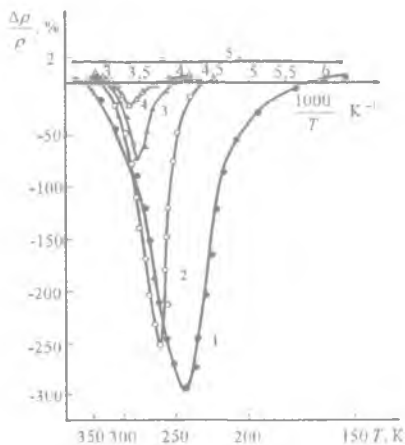
Aniq bo'lgan tajriba natijalarining tahlili shuni ko'rsatadiki, yoritilganlik MaMQ ning kamayishiga va so'nishiga hamda MQ ning ishorasi o'zgarishiga olib kelar ekan. Bu natijalar MQ ni o'rganishdagi yangi fizik hodisa hisoblanadi. MaMQ ni qorong'ilikdagi boshlang'ich qiymati qancha katta bo'lsa, MQ ning ishorasi

almashishining qiymati yoritilganlik intensivligining katta qiymatiga to'g'ri keldi (10.25-rasm, a).

Bu natijalar bir tomondan o'rganilinayotgan materiallarni magnit xossalari marganets atomlari klasterlarining energetik sathlarini qayta zaryadlanishi sabab bo'lsa, ikkinchi tomondan boshqa yarimo'tkazgich magnit materiallarda kuzatilmagan fotomagnit sezgirlik mavjudligini ko'rsatdi.



- 1- $F=E_V+0,3 \text{ eV}$,
- 2- $F=E_V+0,38 \text{ eV}$,
- 3- $F=E_V+0,42 \text{ eV}$,
- 4- $F=E_V+0,44 \text{ eV}$.



- 1- qorong'ilatilgandagi;
 - 2- $I=10 \text{ Lk}$; 3- $I=40 \text{ Lk}$;
 - 4- $I=80 \text{ Lk}$; 5- $I=160 \text{ Lk}$.
- Yutilgandagi

10.25-rasm, a).

Fermi sathi turli holatlarda bo'lgan p-turdagi Si<B, Mn> namunalarda MQning yoritilganlik intensivligiga bog'liqligi.

$E=100 \text{ V/sm}$, $T=300 \text{ K}$, $B=2 \text{ Tl}$

10.25-rasm, b).

Fermi sathini $F=E_V+0,38 \text{ eV}$ bo'lgan Si<B, Mn> namunalardagi MQ ning haroratga bog'liqligi.

$E=100 \text{ V/sm}$, $B=2 \text{ Tl}$

Pastroq haroratlarda namunalarning magnit qarshiligi xossalriga yorug'lik intensivligi ta'sirini tadqiq qilinishida aniqlangan natijalar ham qiziqish uyg'otadi. 10.25-rasm, *b* da nanoklasterga ega bo'lgan kremniyning turli darajadagi fon yorug'ligida MQ ning haroratga bog'liqligi ko'rsatilgan. Ko'rinib turibdiki, yoritilganlik bo'lmaganda harorat pasayishi bilan MaMQ qiymati sezilarli darajada tez ortadi va harorat $T=235\div 240$ K bo'lganda o'zining maksimal qiymatiga etdi. Bunda MaMQ ni qiymatining o'zgarishi $\Delta\rho/\rho=300$ % ni tashkil qildi.

Bu bog'lanishni $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_T = \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_0 \left(\frac{T_0}{T}\right)^5$ qonuniyat ko'rinishda yozish

mumkin. Haroratni $T=215\div 220$ K gacha kamayishi MaMQ ning qiymati kamayishga olib keldi. Bu bog'liqlikni quyidagi

$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_T = \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_1 \left(\frac{T_1}{T}\right)^5$ ko'rinishda ifoda qilish mumkin. Harorat $T\leq 170\div 175$

K bo'lganda MQ ishorasi o'zgaradi, ya'ni MaMQ dan MuMQ ga o'tdi.

Tadqiqotlar $I=10$ Lk; 40 Lk; 80 Lk va 160 Lk yoritilganlikda o'tkazildi (10.25-rasm, *b* dagi 2, 3, 4, 5 – egri chiziqlar). Bunda birinchidan, yoritilganlik MaMQ ning qiymati sezilarli kamayishiga olib keldi. Masalan, $T=240$ K bo'lganda MaMQ ni qiymati $\frac{\Delta\rho}{\rho}\sim 300$

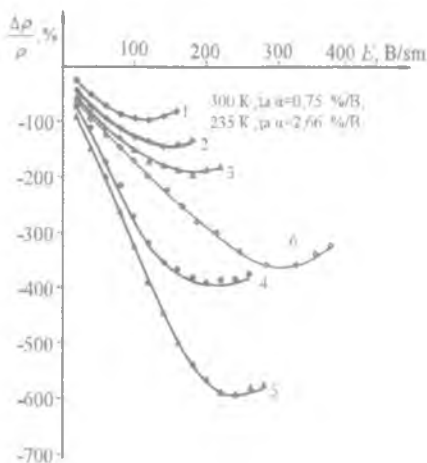
% dan nolgacha kamaydi. Ikkinchidan, yoritilganda maksimal MaMQ ning kuzatilishi harorat qiymatining yuqori tomonga siljidi (2, 3, 4–egri chiziqlar).

Uchinchidan, yoritilganlik MaMQ kuzatiladigan harorat sohasini sezilarli darajada kichiklashtirdi. Yoritilganlik intensivligining yanada oshishi bilan MaMQ kuzatiladigan harorat sohasi yanada torayib $I=160$ Lk da MaMQ amalda yo'qoldi (10.25-rasm, *b* dagi 5 – egri chiziq). Bu shuni ko'rsatadiki, yoritilganlik MQ ning ishorasini o'zgartirib, faza o'tishiga olib kelar ekan.

10.26-rasmda Fermi sathi $F=E_V+0,385\text{eV}$ bo'lgan namunaning MaMQgini turli haroratlarda elektr maydonga bog'liqligini o'rganish natijalari keltirilgan.

Natijalar shuni ko'rsatadiki, elektr maydoni ortishi bilan barcha haroratlarda MaMQ qiymatlari chiziqli ortadi. Elektr maydoni yanada ortishi bilan MaMQ qiymatining chiziqli ortishi kuchsizlanadi va u

o'zini maksimal qiymatiga (E_m) erishadi. Elektr maydon qiymatining yanada ortishi MaMQ ning kamayishiga olib keldi. 10.26-rasmdan ko'rinib turibdiki, harorat pasayishi bilan MaMQ qiymatining chiziqli ortish sohasi kengaydi hamda MaMQ ning maksimal qiymati E_m elektr maydonining katta qiymatlari tomoniga siljidi.



1-300 K, 2-283 K, 3-270 K, 4-62 K, 5-235 K, 6-220 K

10.26-rasm. Fermi sathi $F=E_v+0,385$ eV bo'lgan p -Si<B, Mn>namunaning magnit qarshiligini, turli haroratlarda elektr maydonga bog'liqligi. $B=2$ Tl

Harorat $T=235$ K va $E_m=240$ V bo'lganida MaMQ maksimal qiymatga ega bo'ldi ($\Delta\rho/\rho=600$ %).

Haroratni $T<235$ K dan kichik qiymatlarida MaMQ kamaydi, ammo elektr maydonining qiymatini ortirishi bilan uning kamayishini boshqarib ko'paytirish mumkin bo'ldi.

Xona haroratda marganets atomlarining klasterlari mavjud bo'lgan kremniyda MaMQning so'nish hodisasi hamda yorug'lik intensivligi bilan boshqarib MQning ishorasini o'zgarish mumkinligi elektronika va asbobsizlik sohasida magnit va yorug'lik

datchiklarining tomomila yangi sinfini yaratish imkoniyatlarini ochib beradi.

Marganets atomlari nanoklasterlariga ega bo'lgan kremniy namunalariidagi MaMQning qiymatiga xona haroratida tushayotgan yorug'lik infraqizil nurining $\lambda=1,2\div4$ mkm bo'lgandagi to'lqin uzunligiga bog'liqligi tadqiq qilindi, bunda nurlanish quvvati $5\cdot10^{-5}$ Vt/sm², magnit maydon qiymati $V=0\div1,7$ Tl qilib tanlab olindi.

IKS (IQN)-2Ispektrometrda maxsus qurilma (kirostat) yaratilgan bo'lib, u elektr va magnit maydon qiymatini hamda haroratning keng oraliqda o'zgartirish imkonini berdi.

Namunalardagi MaMQning nisbiy o'zgarishi $\left[\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{max}/\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{hv}\right]$ ifoda asosida hisoblandi (bunda $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{hv}$ - hv energiyali infraqizil nurlanish ta'siridagi MaMQ; $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{mc,u}$ - infraqizil

nurlanish mavjud bo'lmagandagi MaMQ). MaMQ ni tushayotgan infraqizil nurlanish fotonlarining energiyasiga bog'liqligi 10.27-rasm, α da keltirilgan.

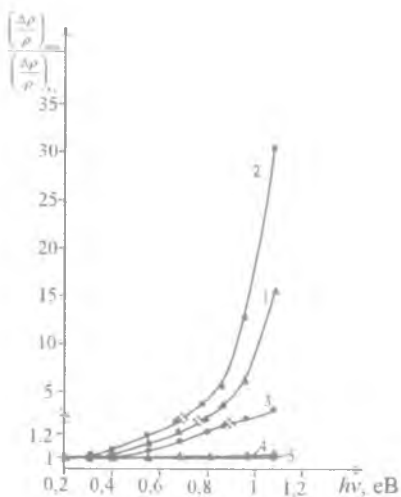
Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, nurlanishning $hv=0,3$ eV (4 mkm) qiymatidan boshlab Fermi sathi $F=E_v+0,385$ eV bo'lgan namunalarda MaMQ qiymatining kamayishi kuzatildi. Tushayotgan yorug'lik fotonlarining energiyasini ortishi bilan MaMQ ning kamayishi kuchaydi va o'zini maksimal qiymatiga $hv=1$ eV bo'lganda erishdi ya'ni, xona harorati sharoitida MaMQ ning so'nishining g'ayri oddiy effekti kuzatildi va uning qiymati 30 martadan ko'p kamayishi aniqlandi.

Bu natijalar infraqizil nurlanishning to'lqin uzunligi $\lambda=1,2\div4$ mkm gacha o'zgarganida MaMQ qiymatini etarlicha katta oraliqda boshqarish mumkinligini ko'rsatdi.

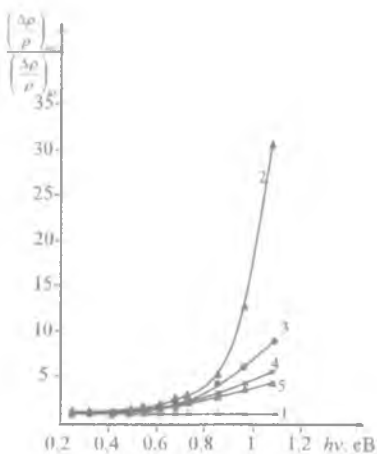
Tadqiqot natijalarini tahlili asosida, MaMQ ni infraqizil yorug'lik ta'sirida so'nish effekti marganets atomlari nanoklasteriga ega bo'lgan barcha p – turdagi kremniy namunalarda kuzatilishi aniqlandi. Shuni qayt etish kerakki, so'nish darajasi namunalardagi Fermi sathining holatiga ya'ni namunalarning solishtirma qarshiligiga kuchli bog'liq ekan. MaMQning maksimal so'nishi Fermi sathi energiyasining

qiymati $F=E_V+0,375$ eV bo'lgan namunalarda kuzatildi. Fermi sathi $F=E_V+0,375$ eV dan taqiqlangan sohani o'rtasi tomon siljiganida so'nish darajasi kamaydi. Fermi sathi $F>E_V+0,48$ eV bo'lgan hamda oshirib kompensatsiyalangan namunalarda MaMQ ning so'nish effekti kuzatilmadi.

10.27-rasm, b da Fermi sathi $F=E_V+0,37$ eV bo'lgan nanoklasterli $p\text{-Si}<\text{B,Mn}>$ namunaning MaMQ gini elektr maydonga bog'liqligining turli energiyali fotonlar ta'siridagi o'zgarishlari keltirilgan.



1- $F=E_V+0,35$ eV, 2- $F=E_V+0,37$ eV,
3- $F=E_V+0,44$ eV, 4- $F=E_V+0,48$ eV.
5- $F=E_S-0,44$ eV



1-2 V/sm, 2-20 V/sm,
3-50 V/sm, 4-80 V/sm, 5-100
V/sm

10.27 –rasm, a).

Fermi sathlari turli qiymatlarida
bo'lgan $\text{Si}<\text{B,Mn}>$ namunalarda
MaMQ ning so'nish darajasi
spektrga bog'liqligi. $E=20$ V/sm,
 $V=1,7$ Tl, $T=300$ K

10.27 –rasm, b).

Turli elektr maydon
kuchlanganliklari ta'sirida
MaMQ so'nish darajasining
spektrga bog'liqligi

Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, MaMQ ga infraqizil nurlanishning ta'siri namunaga qo'yilgan elektr maydon qiymatiga kuchli bog'liq bo'lar ekan. Kichik elektr maydon $E=1\div 20$ V/sm qiymatlarida. elektr maydoni infraqizil nurlanishni MaMQ ga ta'sirini kuchaytirdi, ya'ni MaMQ ni so'nish effekti kuchaydi va o'zining maksimal qiymatiga $E=20\div 25$ V/sm bo'lganda erishdi. MaMQ ning infraqizilnurlanish ta'sirida so'nishini kuchaytirildi. Elektr maydonining qiymati yanada orttirilganda teskari effekt kuzatildi, ya'ni elektr maydonining oshishi bilan infraqizil nurlanish ta'siri kuchsizlanib so'nish effekti sekinlashdi. Elektr maydonining qiymati $E\geq 150$ V/sm bo'lganida barcha tadqiq qilinayotgan spektr sohalarida MaMQ ning so'nish effekti yo'qolishiga olib keldi.

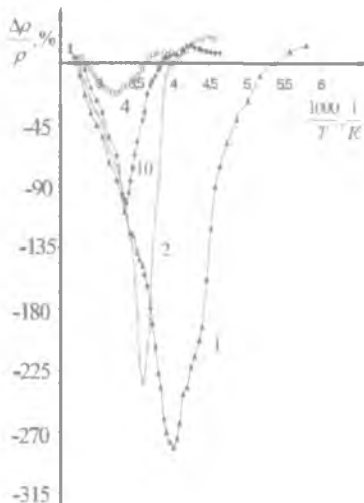
Shunday qilib, katta elektr maydon kuchlanganligining $E>20$ V/sm qiymatlarida ta'siri infraqizil nurlanish ta'siriga qarama-qarshi bo'lib, ularni o'zaro to'liq kompensatsiyasi $E=150$ V/sm bo'lganida kuzatildi. Bu fizik hodisa p – turdagi barcha namunalarda kuzatildi. Fermi sathi kremniyning taqiqlangan sohani o'rtasiga siljishi bilan namunalarda elektr maydon kuchlanganligi va infraqizil nurlanishni o'zaro ta'sir etish tavsifi o'zgarmadi, lekin stimullovchi elektr maydon kuchlanganligi kattaligi nisbatan kichik qiymatlar tomonga siljidi.

Qorong'ilikda va infraqizil nurlarni $h\nu=0,45$ eV; $0,62$ eV; $0,85$ eV energiyalari bilan yoritilganlikda MaMQ ning haroratga bog'liq o'zgarishi 10.28-rasmda ko'rsatilgan. Ko'rinib turibdiki. infraqizil nurning ta'sirida $\frac{\Delta\rho}{\rho}(T)$ bog'lanishni sezilarlicha o'zgartirish mumkin ekan. Bu o'zgarishlar asosan quyidagilardan iborat bo'ldi:

1. MaMQning maksimal qiymati kuzatiladigan harorat ($T_{\max}$) elektr maydon ta'sirida nisbatan yuqoriroq harorat tomonga siljishi kuzatildi. Tushayotgan infraqizil nurlanish fotonlarining energiyasi qiymati qancha katta bo'lsa, haroratning siljishi shuncha katta bo'ldi;

2. Infraqizil nurlanish fotonlarining energiyasi qiymati ortishi bilan $T_{\max}$ mos bo'lgan MaMQ ni qiymati sezilarli kamaydi. Misol uchun $h\nu=0,85$ eV $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\max}$ bo'lganda, o'zgarish 300 % dan 25 % gacha, ya'ni 12 martaga kamaydi;

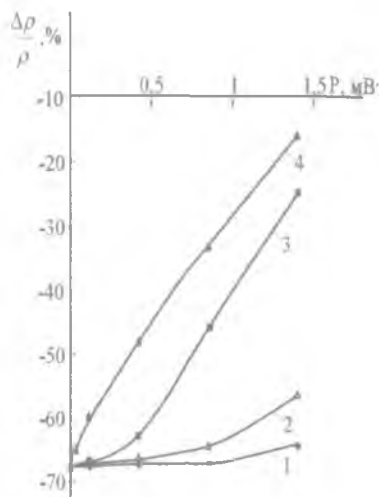
3. MaMQ mavjud bo'ladigan harorat sohasi tushayotgan fotonlarning energiyasi ortishi bilan sezilarli darajada kichiklashdi. Kichiklashish asosan haroratning pastki chegarasi yuqori tomonga siljishi hisobiga sodir bo'ldi. MQ ishorasi o'zgarishi, yuqoriroq haroratlarda ro'y berdi va infraqizil nurlanishga sezilarli bog'liq bo'lmadi.



1- qorong'ilikdagi, 2- 0,45 eV,
3-0,62 eV, 4-0,85 eV

10.28 –rasm.

Turli energiyali infraqizil nurlanish fotonlari ta'sirida Fermi sathi $F=E_V+0,37$ eV bo'lgan p-Si<B,Mn> namunaning MQgining haroratga bog'liqligi, $V=1,7$ Tl



1- 0,5 eV; 2-0,62 eV;
3- 0,85eV; 4- 1,08 eV

10.29-rasm.

Turli energiyali infraqizil nurlanish fotonlari ta'sirida Fermi sathi $F=E_V+0,37$ eV bo'lgan p-Si<B,Mn> namunaning MQ gining monoxromatik nurlanish intensivligiga bog'liqligi. $E=100$ V/sm, $V=1,7$ Tl, $T=300$ K

10.29-rasmda infraqizil nurlarning turli to'liqin uzunligining (λ) ta'siri ostida Fermi sathi $F=E_V+0.37$ eV bo'lgan Si<B,Mn> namunalarda MaMQ ning infraqizil nurlanish quvvatiga bog'liqligi ko'rsatildi. Infraqizil nurlanish intensivligi oshishi bilan MaMQ ni qiymati kamaydi. Masalan, $h\nu=1,08$ eV energiyali infraqizil nurlanishni sezish $R=0,03$ mVt dan boshlandi. Infraqizil nurlanish quvvati $R=1,4$ mVt gacha oshganda MaMQ ning qiymati 7 martaga kamaydi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, MaMQ ni infraqizil nurlanish ta'sirida hosil bo'lish chegarasi tushayotgan infraqizil nurlanish fotonlarning energiyasini kamayishi bilan katta quvvatli nurlanishlar tomonga siljidi.

Ushbu ma'lumotlar, marganets atomlari nanoklasterlariga ega bo'lgan kremniyning funksional imkoniyatlaridan yana birini ochadi, ya'ni infraqizil nur yordamida materialning magnit xossasini sezilarli darajada boshqarish imkoniyati mavjudligini ko'rsatdi.

Infraqizil nurlanish bilan namunalarga ta'sir etib, to'liqin uzunligiga bog'liq ravishda MaMQ ning qiymatini nafaqat 30 martadan ko'proq kamaytirish, balki infraqizil nurlanishning kattaroq quvvatlarida MQ ning ishorasi o'zgarishi, ya'ni MQ ni MaMQ dan MuMQ ga o'zgartirish mumkin ekan.

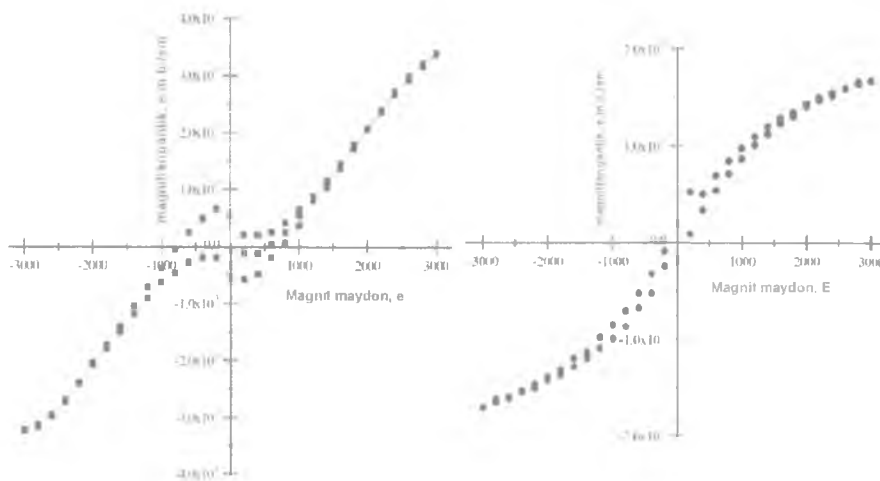
Tajriba natijalari asosida infraqizil nurlanishning to'liqin uzunligi va elektr maydoni optimal qiymatini tanlab, marganets atomlari bilan legirlangan kremniy materiallarning magnit xossalarini maqsadli boshqarish mumkinligi aniqlandi. Bu o'z navbatida marganets atomlarining nanoklasterlari mavjud kremniy asosida nafaqat infraqizil sohada ishlovchi sezgir fotomagnit asboblarni yaratish imkoniyatlarini ochib beradi shu bilan birga yangi ilmiy yo'nalish hisoblangan infraqizil spintronika rivojlanishiga ham katta hissa qo'shadi.

Haroratning $T=30$ K gacha bo'lgan sohalarida, maksimal konsentratsiyadagi ($N\sim 10^{15}$ sm⁻³) magnit klasterlarga ega bo'lgan kremniy namunalarda ferromagnit holat kuzatildi.

Namunalarning magnit xususiyati past harorat sohasida SKVID (o'tao'tkazuvchi kvant interferension datchik) – magnitometr qurilmasida tadqiq qilindi. $T=30$ K haroratda, turli konsentratsiyadagi marganets atomlarining nanoklasterlariga ega bo'lgan kremniy

namunalarining magnitlanganligi va magnit maydonga bog'liqligi 10.30-rasmda ko'rsatilgan.

Rasmdan ko'rinib turibdiki, $T=300$ K da MaMQ ning maksimal qiymatlari kuzatilgan namunalardagi magnitlanishni past ($T \leq 30$ K) haroratlar sohasida magnit maydonga bog'liqligi gisterezis harakteriga ega bo'ldi. Bu nanoklasterga ega bo'lgan kremniyda ferromagnit holat mavjudligini tasdiqlaydi (10.30-rasm, a). Nanoklasterlar konsentratsiyasi kamayishi bilan magnitlanganlikni magnit maydonga bog'liqligidagi gesterizes tabiati kuchsizlandi (10.30-rasm, b). $n\text{-Si} < \text{B, Mn} >$ namunalarda bunday hodisa kuzatilmadi. Marganets atomlarining nanoklasterlariga ega bo'lgan kremniyni ferromagnit holati harorat oshishi bilan kuchsizlandi va $T \sim 40 \div 50$ K da yo'qoldi. Tajriba ma'lumotlari asosida nanoklasterlarning magnit momenti hisoblandi va uning qiymati $\mu = 800 \mu_B$ ga teng bo'lib chiqdi.

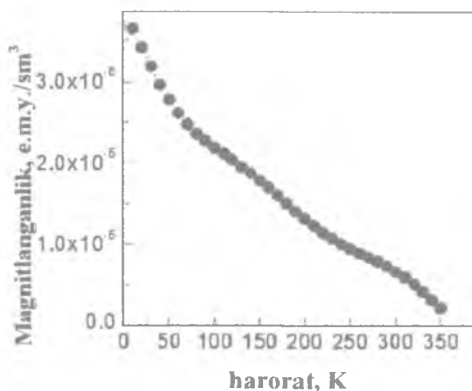


a) $N_{(\text{Mn})4} = 10^{15} \text{ sm}^{-3}$

b) $N_{(\text{Mn})4} = 2 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$

10.30-rasm. Turli konsentratsiyadagi marganets atomlarining nanoklastarlari bo'lgan kremniyning magnitlanganligining magnit maydonga bog'liqligi (gisterezis). $T=30$ K

Tajriba natijalaridan koʻrindiki, harorat oshishi bilan, magnit nanoklasterga (Mn)₄ ega boʻlgan kremniy namunalari magnitlanishining haroratga bogʻliqligi chiziqli kamaydi (10.31-rasm).



10.31-rasm. Magnit nanoklasterli (Mn)₄ Kremniy magnitlanganligining haroratga bogʻliqligi

Olingan tajriba natijalari asosida marganets atomlarining magnit nanoklasterlari shakllanishi kremniyni magnit xossalariga sezilarli taʼsir koʻrsatishi aniqlandi.

Haroratning $T=230\div330$ K oraligʻida, kremniy namunalardagi nanoklasterlarining konsentratsiyasini boshqarib, oʻta yuqori MaMQ ni olish imkoniyati koʻrsatildi. Haroratning past $T<40$ K sohasida, magnit nanoklasterli kremniy yangi faza holatiga oʻtdi va ferromagnit hodisasi kuzatildi.

Haroratning $T<40$ K sohasida $p\text{-Si}<\text{B,Mn}>$ namunalaridagi ferromagnitizm hodisasini, magnit nanoklasterlarni sezilarli magnit momentiga ega boʻlgan ($S_{\text{Mn}^{2+}} = 4 \cdot \frac{5}{2} = 10$) spinlarining yoʻnaltirilishini qayta oʻzgarishi bilan tushuntirish mumkin. Biz tomonimizdan kremniyni marganets bilan legirlashning texnologiyasi yangi usuli ishlab chiqilgan boʻlib, uni asosida va u $N=10^{16}\div10^{17}\text{sm}^{-3}$ gacha marganets atomlarining magnit nanoklasteriga ega boʻlgan kremniy

namunalarini olish imkonini beradi. Bunday namunalar xona harorati sharoitida MaMQ qiymatining nafaqat oshirish imkonini, shuningdek, ferromagnit holat kuzatilishining harorat sohasini sezilarli kengaytirish imkonini beradi.

Tadqiqotlar natijalarining tahlili shuni ko'rsatdiki, nanoklastlar mavjud bo'lgan kremniy materiallari asosida spintronika sohasida tubdan yangi yuqori sezgirlikka ega bo'lgan magnitodatchiklar va fotomagnit asboblarni yaratish mumkin ekan.

Sinov savollari:

1. *Nanoo'lchamli moddalar deganda nimalarni tushunasiz?*
2. *Nanoo'lchamli moddalarning qanday fundamental xossalari o'zgarishi mumkin?*
3. *De – Broyl to'liq uzunligining fizik ma'nosi va uning qiymati nimalarga bogliq?*
4. *Mikrozarralar (elektron, proton) to'liq xossalarini qaysi tajribalar asosida yaqqol ko'rsatish mumkin?*
5. *Fotonlarning zarracha ekanligini qaysi fizik hodisalar asosida ko'rsatish mumkin?*
6. *Kvant o'ra, kvant ip va kvant nuqtasi deganda nima tushuniladi va ularning mavjudlik shartlari.*
7. *Potensial to'siqlarda elektronlarning energetik sathlari qanday o'zgaradi va u nimalarga bogliq?*
8. *O'ta panjara nima va uning qanday turlari mavjud?*
9. *Nima uchun metallarda nanoo'lchamli strukturalarni hosil qilish maqsadga muvofiq emas?*
10. *Nanoo'lchamli strukturalar yaratish usullari.*
11. *Nanoo'lchamli strukturalarni o'rganish usullari.*

Nanoo'lchamli yarimo'tkazgichlar fizikasi mavzusiga doir masalalar:

1. *Kremniy kristallida de – Broyl to'liq uzunligini hisoblang ($m^* = 0.69 m$, $T = 100$ va 300 K, $n = 1$).*
2. *GaAs kristallida de – Broyl to'liq uzunligi $T = 50, 150, 250$ K bo'lganda qanday qiymatga ega ($m^* = 0.18 m$) bo'ladi?*

3. Potensial to'siq eni $d=5,15$ va 30 nm bo'lgan holda undagi elektronlarning energetik sathlarini hisoblang ($n=1,2,3,4$).

4. Elektron, proton zarralari uchun de – Broyl to'liqin uzunligini hisoblang va tushuntiring.

5. Elektron energiyasi (E) qanday qiymatlarga ega bo'lganda, elektronlar oqimi yordamida kremniy kristallida difraksiya hodisasini kuzatish mumkin?

6. Kristall panjara doimiysi $d=3,5$ Å va $d=5,2$ Å bo'lganda difraksiya hodisasini kuzatish uchun qanday energiyaga ega bo'lgan protonlar oqimi lozim?

11. KREMNIYDA CHUQUR ENERGETIK SATH HOSIL QILUVCHI KIRISHMALAR ASOSIDA KUZATILGAN FIZIK HODISALAR

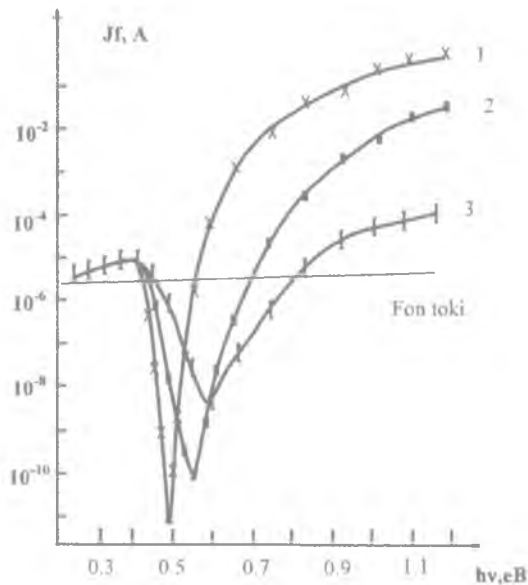
Odatdagi kirishma atomlardan farqli yarimo'tkazgich materiallarida chuqur energetik sath hosil qiluvchi kirishma atomlar ionizatsiyalanishi energiya qiymati kattaligi bilan ($E=0,1\div0,6$ eV), balki energetik sathlari soni va kirishma atomlarning kristall panjarada joylashishi, zaryadlanish darajasi hamda kristall panjaradagi boshqa atomlar bilan murakkab komplekslar hosil bo'lishi va ularni yarimo'tkazgich materiallining elektrofizik, optik, fotoelektrik xossalriga ta'sir qilishi natijasida, ba'zi yangi fizik hodisalar kuzatildi. Shu sababli yarimo'tkazgich materiallarning funksional imkoniyatlari yanada kengayadi va ular asosida tubdan yangi asboblardan va qurilmalarni yaratish mumkin bo'ldi. Bu bobda chuqur energetik sath hosil qiluvchi kirishma atomlar bilan kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan va nazariy tasdiqlangan ba'zi bir fizik hodisalarga oid ma'lumotlar keltirilgan.

11.1. Kompensatsiyalangan kremniyda fotoo'tkazuvchanlikning infraqizil nur ta'sirida so'nishi

Yarimo'tkazgich materiallarda kuzatilgan fotoelektrik hodisalar ichida materialni qo'shimcha infraqizil (IQ) nurlar bilan yoritilgan, ya'ni fon yorug'lik mavjud bo'lganda fototokning so'nish effekti ko'plab olim va mutaxassislarni qiziqtirib kelmoqda. Bu effektning o'rganish birinchidan yarimo'tkazgich materiallaridagi kirishma atomlarining fundamental parametri hisoblangan kirishma atomlarning energetik sathlarning qiymatini, tok tashuvchilarni shu energetik sathda yutilish yuzasi haqidagi ma'lumotlarni bilish bilan birga fon yorug'lik mavjudligida ishlay oladigan infraqizil fotopriyomliklarni yaratish imkoniyatlarini ochib beradi.

Fotoo'tkazuvchanlikning infraqizil nurlar ta'sirida so'nishi, so'nish darajasining qiymati $K = \frac{\sigma_f}{\sigma_f + h\nu}$ bilan ifodalanadi. Bunda, σ_f – (doimiy fon ($h\nu > E_g$) yorug'ligi mavjud bo'lgandagi

fotoo'tkazuvchanlik, $\sigma_{f, h\nu}$ — fotoo'tkazuvchanlikga qo'shimcha infraqizil nur ta'sir etgandagi fotoo'tkazuvchanlik qiymati. 11.1-rasmda marganets kirishma atomlari bilan kompensatsiyalangan p – tur kremniy materialida kuzatilgan infraqizil nur ta'sirida fototokning so'nishi ko'rsatildi.



11.1-rasm. Boshlang'ich kremniy materialidagi kirishma bor atomlarining konsentratsiyasiga bog'liq holda fotoo'tkazuvchanlikning infraqizil nur ta'sirida so'nishi. p – Si<B, $Mn>T=80$ K, $E = 20$ V/sm: 1 – $\rho \approx 10^5$ Om·sm (KDB-1); 2 – $\rho \approx 10^5$ Om·sm (KDB-10); 3 – $\rho \approx 10^5$ Om·sm (KDB-100)

Kompensatsiyalangan kremniyda fotoo'tkazuvchanlikning infraqizil nur ta'sirida so'nishini o'rganish natijalari tahlili asosida quyidagilar aniqlandi:

1. Fotoo'tkazuvchanlikni infraqizil nur ta'siridagi so'nish darajasining qiymati $K=10^2 \div 10^6$ gacha bo'lishi.
2. Materialning solishtirma qarshiligi o'zgarishi bilan infraqizil nur ta'sirida so'nishning kuzatilish chegarasi siljishi.

3. Materialning solishtirma qarshiligi kamayishi bilan infraqizil nur ta'sirida so'nishning kuzatilish spektr oralig'i kengayishi.

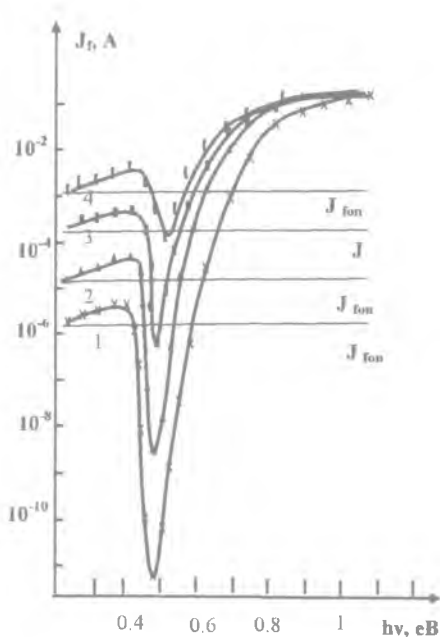
Kirishma atomlar bilan kompensatsiyalangan kremniyda fotoo'tkazuvchanlikning infraqizil nur ta'sirida so'nishi boshlang'ich materialdagi kirishma bor atomlarining konsentratsiyasiga bog'liqligini o'rganish maqsadida boshlang'ich kirishma bor atomlari konsentratsiyasi $N_V = 2 \cdot 10^{14} \div 2 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ oralig'ida o'zgartirib olindi.

Tajriba natijalari tahlili shuni ko'rsatdiki, kompensatsiyalangan kremniydagi fotoo'tkazuvchanlik infraqizil nur ta'sirida so'nishining boshlanish chegarasi qiymati, so'nish darajasi, fotonlar energiyasi bo'yicha so'nish oralig'i materialning solishtirma qarshiligiga, o'tkazuvchanlik turiga, kirishma atomlarning elektrfoal konsentratsiyasiga, fon yoritilganlik qiymatiga hamda so'ndirishga sabab bo'lgan infraqizil nurning energiyasi va quvvatiga bog'liq ekan (11.1 va 11.2-rasm). Bu natijalarni ilmiy asoslashda, ya'ni kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan fotoo'tkazuvchanlik hodisasining mexanizmini tushuntirishda Rouz tomonidan yaratilgan, taqiqlangan soha kengligida ikkita chuqur energetik sath bo'lgan klassik model asosida amalga oshirib bo'lmadi. Bunga quyidagi tajriba natijalarini misol qilish mumkin.

1. Kompensatsiyalangan kremniydagi fotoo'tkazuvchanlikning infraqizil nur ta'sirida so'nishi $h\nu = 0,47 \div 0,48 \text{ eV}$ oralig'ida bo'lib, yarimo'tkazgich materialida kuzatilganda ikkilangan optik o'tish hodisasiga mos tushmaydi.

2. Fotoo'tkazuvchanlikning infraqizil nur ta'sirida so'nishi kremniy materialining solishtirma qarshiligi va kirishma atomlarning elektr foal konsentratsiyasiga bog'liq bo'lishi.

3. Fotoo'tkazuvchanlikning infraqizil nur ta'sirida so'nishining darajasi $K = 10^5 \div 10^6$ bo'lib, mavjud model orqali hisoblanganda so'nishga sabab bo'lgan energetik sathning tok tashuvchi kovaklarni yutish yuzasi, rekombinatsion markazda kovaklarni yutish yuzasidan 10^{12} darajada katta bo'lib nazariy hisoblar asosida mos ravishda $S_{RMn} \approx 10^{-26} \text{ sm}^{-3}$ va $S_{RR} \approx 10^{-14} \text{ sm}^{-3}$ tashkil etdi. Odatda tok tashuvchilarning bunday yutish yuzasiga ega bo'lgan energetik sathlar yarimo'tkazgich materiallarda uchramaydi.

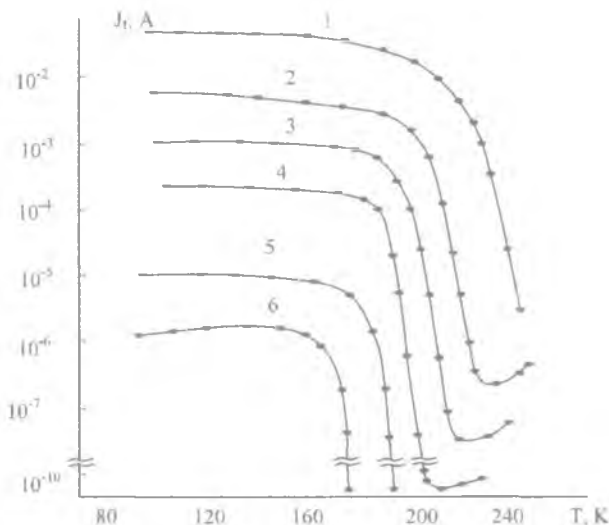


11.2 –rasm. Kompensatsiyalangan kremniyda turli fon yorug‘ligidagi fotoo‘tkazuvchanlikning so‘nishini spektral bog‘lanishi. $\rho=10^{-5}$ Om-sm, $E=20$ V/sm, $T=80$ K. $I_4>I_3>I_2>I_1$ $I_1=10^{-3}$ lk. $I_4=0,5$ lk

11.2. Kompensatsiyalangan kremniyda fotoo‘tkazuvchanlikning harorat ta’sirida so‘nishi

Kirishma atomlar bilan kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan fotoo‘tkazuvchanlikning tashqi muhit haroratiga bog‘liqligini o‘rganishlar shuni ko‘rsatdiki, fotoo‘tkazuvchanlik materialning solishtirma qarshiligi va o‘tkazuvchanlik turiga qarab, $T=77\div350$ K harorati oralig‘ida kuzatilar ekan. Integral yorug‘likning turli qiymatlarida yoritilganda hosil bo‘lgan fotoo‘tkazuvchanlikning haroratga bog‘liqligi $T=77\div200$ K oralig‘ida o‘rganilganda $T=140$ K dan boshlab, fototokning harorat ta’sirida so‘nishi kuzatildi (11.3-rasm).

Integral yorug'likning intensivligi ortishi bilan fototokning harorat ta'sirida so'nishi yuqori harorat tomonga siljib bordi. Harorat ta'sirida fotoo'tkazuvchanlikning so'nish darajasi qiymati $K = \frac{If}{jf+t} \approx 10^6 \div 10^7$ ga teng bo'lib, fototokni infraqizil nur ta'sirida so'nishiga qaraganda ham ko'proq bo'ldi.



11.3-rasm.

Kompensatsiyalangan kremniydai yorug'likning turli qiymatlarda fotoo'tkazuvchanlik harorat ta'sirida so'nishi $Si < B, Mn > p \approx 10^5$ Om·sm, $E=40$ V/sm: 1— 25 lk, 2—10 lk, 3— 5 lk, 4— 1 lk, 5— 0,5 lk, 6— 0,1 lk

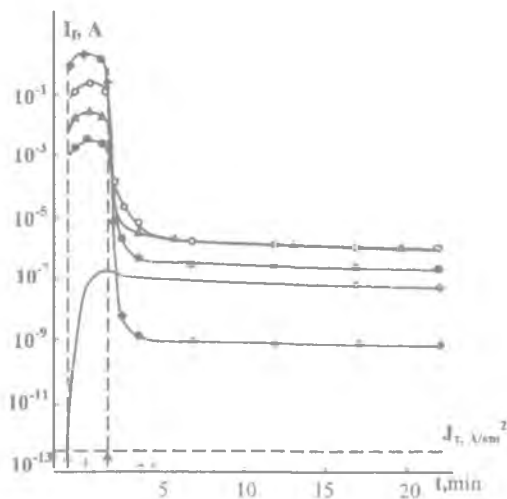
Kompensatsiyalangan kremniyda fototokning harorat ta'sirida so'nish effekti boshqa yarimo'tkazgich materiallardagidan quyidagilar bilan farqlandi.

1. Fototokning fon yorug'likdagi qiymatidan qat'i nazar fotoo'tkazuvchanlikning so'nish darajasi $K=10^5 \div 10^7$ ni tashkil etdi.

2. Fotoo'tkazuvchanlikning so'nishi haroratning kichik oralig'ida kuzatilib, $\Delta T = 25 \div 30^\circ$ ga teng bo'ldi.

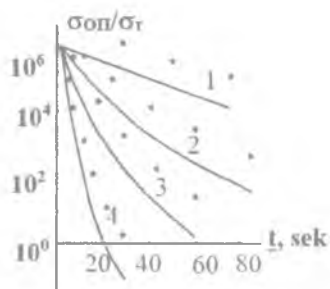
11.3. Kompensatsiyalangan kremniyda fotoo'tkazuvchanlikning uzoq muddatli relaksatsiyasi va qoldiq o'tkazuvchanlik

Kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan g'ayri oddiy fotoo'tkazuvchanlik hodisalaridan yana biri, fotoo'tkazuvchanlik hosil qilganidan so'ng yorug'lik manbasi o'chirilsa, qorong'u holatda fotoo'tkazuvchanlik qiymati o'zining boshlang'ich holatiga qaytmasdan ma'lum bir qoldiq o'tkazuvchanlikga ega bo'ladi. Fototokning qiymati qoldiq o'tkazuvchanlik qiymatiga birdan tushmasdan ma'lum bir vaqt oralig'ida kamayib borishi kuzatildi. Bu fizik hodisa yarimo'tkazgich materiallaridagi **fotoo'tkazuvchanlikning qoldiq o'tkazuvchanligi** deb nomlanadi. 11.4-rasmda kompensatsiyalangan kremniy materialida harorat $T=77K$ bo'lganida hamda yorug'lik quvvati turli qiymatlarida yoritib, yorug'lik manbasi o'chirilganda kuzatilgan uzoq muddatli relaksatsiya va qoldiq o'tkazuvchanlikning qiymatining vaqtga bog'liq o'zgarishi ko'rsatilgan.

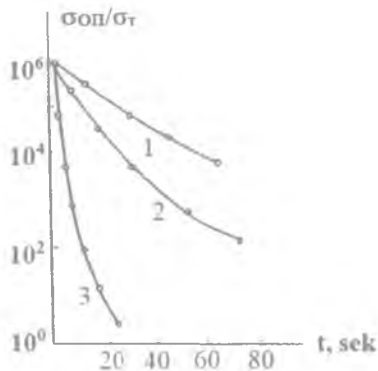


11.4-rasm. Kompensatsiyalangan kremniyda integral yorug'likning turli qiymatlarida fotoo'tkazuvchanlikning uzoq muddatli relaksatsiyasi p-Si/B, Mn/

Kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan qoldiq o'tkazuvchanlikga infraqizil nur va harorat ta'siri o'rganilganda, qoldiq o'tkazuvchanlikning infraqizil nur va harorat ta'sirida so'nish hodisasi kuzatildi. 11.5-rasmda qoldiq o'tkazuvchanlik infraqizil nur ta'sirida so'nishi ko'rsatilgan.

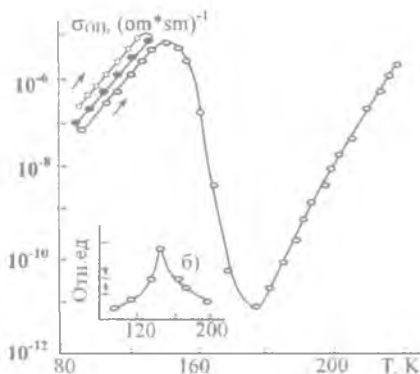


a)



b)

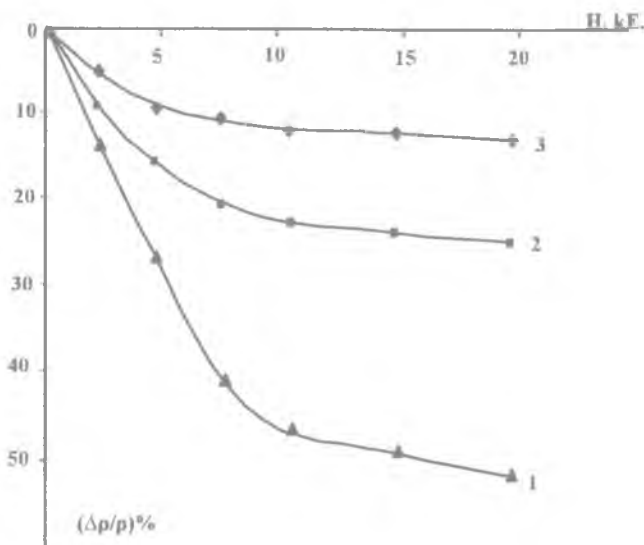
11.5-rasm. Kompensatsiyalangan kremniydagi qoldiq o'tkazuvchanlikning infraqizil nur ta'sirida so'nishi: a) 1 - $h\nu=0,42$ eV, 2 - $h\nu=0,45$ eV, 3 - $h\nu=0,5$ eV, 4 - $h\nu=0,6$ eV; b) $h\nu=0,62$ eV



11.6-rasm. Kompensatsiyalangan kremniydagi qoldiq o'tkazuvchanlikning harorat ta'sirida so'nishi

11.4. Kompensatsiyalangan kremniya manfiy magnit qarshilik

Marganets kirishma atomlari bilan kompensatsiyalangan p – turdagi kremniy materialiga magnit maydon kuchlanganligining taʼsirini oʻrganishda boshlangʻich kremniy materialidagi bor atomlari konsentratsiyasining turli qiymatlarida, yaʼni $N_V=2\cdot 10^{14}\div 2\cdot 10^{16}\text{sm}^{-3}$ oraligʻida tanlab olindi. Past haroratli diffuzion usul yordamida marganets kirishma atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniy materiali olinganidan soʻng, solishtirma qarshiligi $\rho\approx 6\cdot 10^3\text{Om}\cdot\text{sm}$, boshlangʻich bor atomlarining konsentratsiyasi $N_V=2\cdot 10^{14}$, $2\cdot 10^{15}$, $2\cdot 10^{16}\text{sm}^{-3}$ qiymatlarda boʻlgan namunalarda tajribalar oʻtkazildi (11.7-rasm).



11.7-rasm. Marganets kirishma atomlarining elektr faol konsentratsiyasi miqdoriga nisbatan solishtirma qarshilikning magnit maydon kuchlanganligini qiymatiga bogʻliqligi.

$Si<B,Mn>I=150\text{lk}$, $E=100\text{ V/sm}$, $T=300\text{ K}$,

1 – $\rho=6,3\cdot 10^3\text{Om}\cdot\text{sm}$ (KDB-1), 2 – $\rho=6,3\cdot 10^3\text{Om}\cdot\text{sm}$ (KDB-10),

3 – $\rho=6,5\cdot 10^3\text{Om}\cdot\text{sm}$ (KDB-100)

Bu natijalar tahlili asosida marganets atomlari bilan kompensatsiyalangan p -turdagi kremniy materialida manfiy magnit qarshilik kuzatilishi aniqlanadi. Magnit maydon kuchlanganligi qiymati oshib borishi bilan manfiy magnit qarshilikning qiymati ham oshib bordi. Boshlang'ich kremniy materialida bor atomlarining konsentratsiya miqdori ko'p bo'lganida manfiy magnit qarshilik qiymati ham katta bo'lishi kuzatildi.

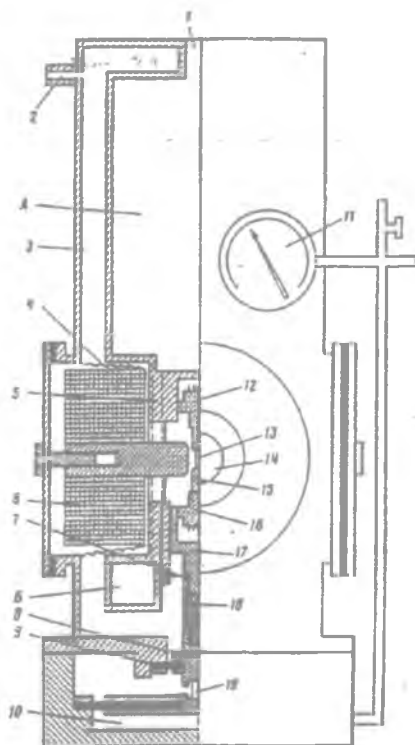
Manfiy magnit qarshilikning qiymati nafaqat boshlang'ich kremniy materialidagi bor atomlarining konsentratsiyasi qiymatiga, balki tashqi ta'sirlarga, ya'ni haroratga, yoritilganlik va elektr maydon kuchlanganligining qiymatiga, tushayotgan monoxromatik nurning to'liq uzunligiga bog'liq ekan. Yuqorida sanab o'tilgan tashqi ta'sirlarni boshqarib, manfiy magnit qarshilikni vujudga keltirish va turg'un kuzatilish mumkinligi aniqlandi.

11.5. Kirishma atomlar bilan kompensatsiyalangan kremniyning tenzo xususiyatlari

Mikroelektronikaning rivojlanishida, texnikani avtomatlashtirishda, zamonaviy kompyuterlarni yaratishda, texnologik jarayonlarni takomillashtirishda yangi, elektrofizik parametrlari tashqi ta'sirlarga o'tasezgir bo'lgan yarimo'tkazgich materiallar asosidagi datchiklar yaratishni talab etmoqda. Kompensatsiyalangan kremniy materialining elektrofizik parametrlari mexanik ta'sirlarga (bir o'qli yoki har tomonlama bosim) o'tasezgirliги tajribalardan aniqlandi. Kompensatsiyalangan kremniyning elektrofizik parametrlariga bir o'qli va har tomonlama bosimning ta'sirini o'rganish natijalari asosida kirishma atomlarning kremniy kristall panjarasida joylashishi, materialning taqiqlangan sohasining energetik qiymati o'zgarishi, hosil bo'ladigan klasterlarda atomlar soni va zaryadi haqida ma'lumotlarni olishi bilan birga, bu materiallar asosida tashqi bosimni o'lchovchi va nazorat qiluvchi tenzodatchiklar hamda qurilmalarni yaratish imkonini beradi.

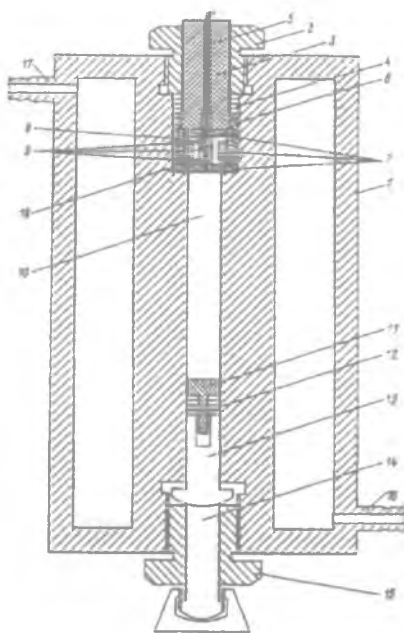
Kompensatsiyalangan kremniyning tenzoxususiyatlarini o'rganishdagi bir o'qli bosim hosil qilish qurilmasi

Bir o'qli bosim hosil qilish qurilmasining tuzilishi 11.8– rasmda keltirilgan. Bu qurilmada haroratni $T=100\div 400\text{K}$ oralig'ida turg'un ushlay oladigan hamda tajriba o'tkazilayotgan yarimo'tkazgich materialini bir vaqtning o'zida integral va monoxromatik nurlar bilan yoritish, magnit maydon kuchlanganligini ta'sir ettirish imkoniyatlari mavjud.



***11.8-rasm. Yarimo'tkazgich materiallar va sturukturalarning bir o'qli bosim ta'sirida tenzo xususiyatini o'rganuvchi qurilma
Har tomonlama gidrostatik bosim hosil qilish qurilmasi***

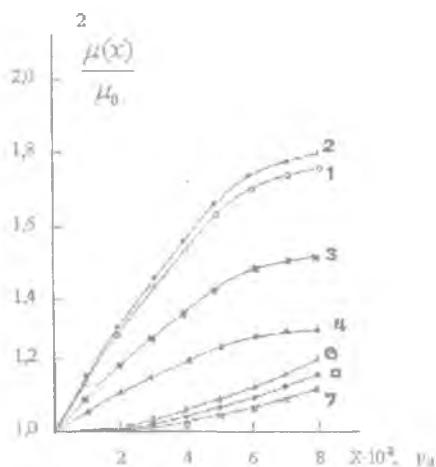
Kompensatsiyalangan kremniydagi kirishma atomlarining holatini hamda materialning elektrofizik parametrlariga gidrostatik har tomonlama bosim ta'sirini o'rganishda $P=10^9$ Pa gacha yuqori bosim olish imkonini beradigan bronza kameradan foydalanildi. Kameraning ichiga har tomonlama tekis ta'sir etuvchi bosimni hosil qilish uchun PES-5 markali texnik yog' quyildi. Bu turdagi yog' keng harorat oralig'ida har tomonlama bosimni $P=1,6 \cdot 10^9$ Pa gacha olish imkonini beradi (11.9-rasm).



11.9-rasm. Har tomonlama yuqori bosim hosil qilish kamerasi

Bir o'qli bosim ta'sirida yarimo'tkazgich materiallarida kuzatilgan deformatsion effektlarning fizik mexanizmi, kirishma atomlarining chuqur energetik sathlarining siljishi natijasida tok tashuvchi elektron yoki kovaklarning konsentratsiyasi va harakatchanligi o'zgarishi bilan tushuntirildi. Shu sababli,

kompensatsiyalangan kremniyning elektro'tkazuvchanligi va Xoll doimiysini bir o'qli bosim ta'sirida o'rganish, kremniyda chuqur energetik sath hosil qiladigan kirishma atomlarning holati va ularning ionlashish energiyasining qiymati haqida ko'plab ma'lumotlarni olish imkonini beradi.

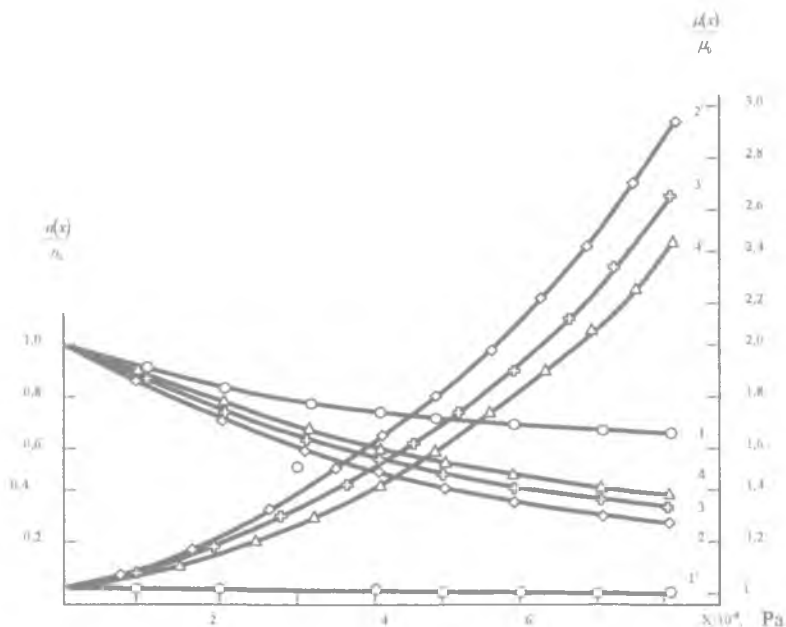


11.10-rasm. Kompensatsiyalangan kremniyda bir o'qli bosim ta'sirida kovaklar harakatlanganligining o'zgarishi

Yuqoridagi 11.10-rasmdan ko'rinadiki, kompensatsiyalangan kremniy materialining solishtirma qarshiligining qiymati ortib borgan sari tok tashuvchi kovaklarning harakatchanligi qiymati kamayib borar ekan. Harakatchanlikning qiymati o'zgarishi [111] kristall o'qi asosida o'stirilgan kremniy namunalarida boshqa [110] va [100] kristall o'qlari asosida o'stirilganlariga qaraganda katta bo'lishi kuzatildi. Materialning solishtirma qarshiligi va Xoll doimiysining qiymatlarini bir o'qli bosim ta'sirida o'zgarishdagi natijalarni inobatga olib amalga oshirilgan nazariy hisoblar yordamida tok tashuvchi elektronlarning konsentratsiyasi va harakatchanligining qiymati hisoblandi. Hisoblash natijasida aniqlangan kattaliklar 11.11-rasmda berildi.

Olingan natijalar asosida kompensatsiyalangan n – turdagi kremniyda kuzatilgan tenzoqarshilik effekti bir o‘qli bosim ta’sirida faqat elektronlarning harakatchanligi o‘zgarishiga bog‘liq bo‘lmay, ularning konsentratsiyasiga ham bog‘liq ekan.

Bir o‘qli bosim ta’sirida [100], [110] va [111] kristall o‘qlar asosida o‘stirilgan materiallarda elektronlar harakatchanligining kamayishini, kremniyning o‘tkazuvchanlik sohasidagi oltita energetik sohalarning minimumlari materialni kristallografik o‘q yo‘nalishiga bog‘liq holda o‘zgarishi bilan tushuntirildi.



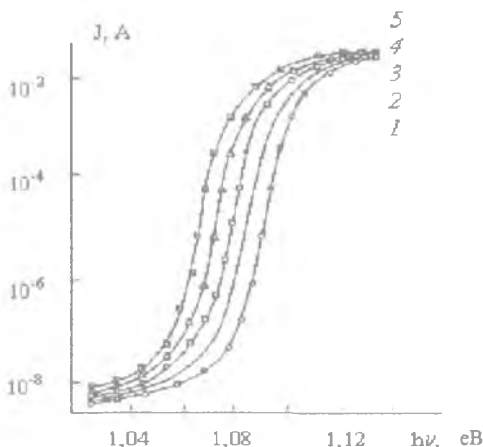
11.11-rasm. Boshlang‘ich KEF-80 va kompensatsiyalangan kremniydagi elektronlar harakatchanligi va konsentratsiyasining bir o‘qli bosim ta’sirida o‘zgarishi $n\text{-Si}<B, Mn> \{J||X||/100\}$ $i T=300K$.

$KЭФ-80$ $Om\cdot sm$; $n\text{-Si}<B, Mn>$: 2– $\rho=40 Om\cdot sm$; 3– $\rho=5\cdot 10^3 Om\cdot sm$; 4– $\rho=1,3\cdot 10^5 Om\cdot sm$

Kompensatsiyalangan kremniydagi foto o'tkazuvchanlik hodisiga bir o'qli bosimning (BO'B) ta'sirini o'rganish kremniya chuqur energetik sath hosil qiluvchi va fotoo'tkazuvchanlik hodisasiga asosiy sababchi bo'lgan kirishma atomlarning energetik sathlari haqida qimmatli ma'lumotlarni beradi. Shu sababli, kompensatsiyalangan kremniya kuzatilgan fotoo'tkazuvchanlik, fotoo'tkazuvchanlikning infraqizil nurlar ta'sirida so'nishi, qoldiq fotoo'tkazuvchanlik kabi hodisa va effektlarga bir o'qli bosimning ta'siri o'rganildi.

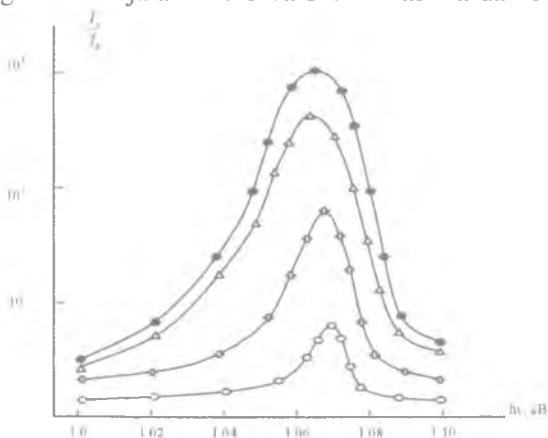
11.6. Bir o'qli bosimning kompensatsiyalangan kremniydagi fotoo'tkazuvchanlik hodisasiga ta'siri

Kompensatsiyalangan kremniydagi fotoo'tkazuvchanlik hodisiga bir o'qli bosim ta'sir etgandagi tajriba natijalari 11.12-rasmda keltirilgan.

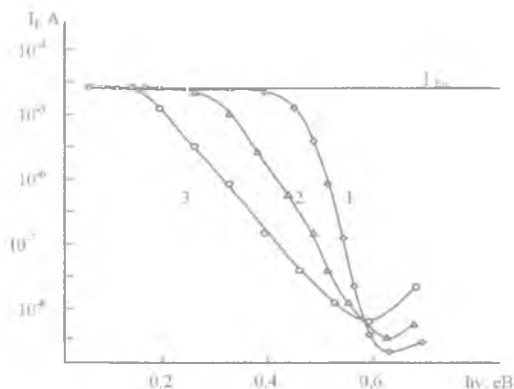


11.12-rasm. Kompensatsiyalangan kremniydagi fotoo'tkazuvchanlikning spektral bog'lanishiga bir o'qli bosim ta'siri $Si<B,Mn>T=80K$. $\{J/X/[100]\}$: 1- $X=10^5 Pa$, 2- $X=2 \cdot 10^5 Pa$, 3- $X=4 \cdot 10^5 Pa$, 4- $X=6 \cdot 10^5 Pa$, 5- $X=8 \cdot 10^5 Pa$

Kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan infraqizil nur ta'sirida fotoo'tkazuvchanlikni so'nish hodisasiga bir o'qli bosimning ta'sirini o'rganish natijalari 11.13 va 11.14— rasmlarda keltirilgan.



11.13-rasm. Kompensatsiyalangan kremniydagi fotoo'tkazuvchanlikning infraqizil nur ta'siridagi so'nishi bir o'qli bosim qiymatiga bog'liqligi $T=77\text{ K}$ dal $x/I_0=f(x)$ $\Phi\Pi\text{ Si}\langle B, Mn\rangle$. $\{J/X/[100]\}$: 1- $X=2\cdot 10^8\text{ Pa}$; 2- $X=4\cdot 10^8\text{ Pa}$; 4- $X=8\cdot 10^8\text{ Pa}$



11.14-rasm. Kompensatsiyalangan kremniydagi fotoo'tkazuvchanlikning infraqizil nur ta'siridagi so'nishi bir o'qli bosim qiymatiga bog'liqligi $\text{Si}\langle B, Mn\rangle$. $J/X/[100]$. 1- $X=10^5\text{ Pa}$; 2- $X=4\cdot 10^8\text{ Pa}$; 3- $X=8\cdot 10^8\text{ Pa}$

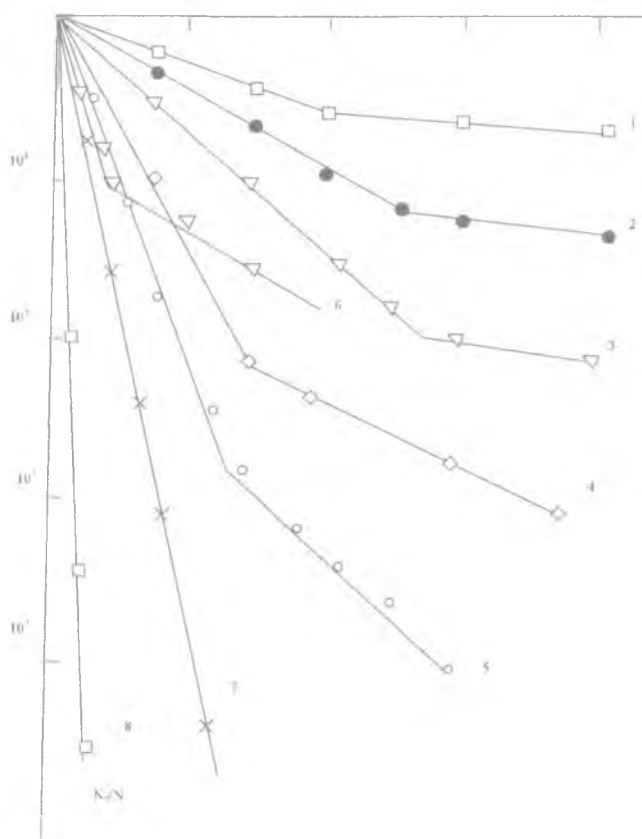
Tajriba natijalaridan ko'rinadiki, fotoo'tkazuvchanlikning infra-qizil nur ta'sirida so'nish chegarasi bir o'qli bosim ta'sirining qiymati oshgani sari fotonlarni kichik energiya qiymati tomon siljir ekan.

11.7. Har tomonlama gidrostatik bosimning kompensatsiyalangan kremniydagi kirishma atomlarining holatiga ta'siri

Kirishma atomlari bilan kompensatsiyalangan har qanday yarimo'tkazgich materiallarda kirishma atomlar hajm bo'yicha teng taqsimlanmaydi. Natijada, yarimo'tkazgichning kristall panjarasida kirishma atomlar to'planishlari, turli kompleks va klasterlar hosil bo'lishi kuzatiladi. Bu o'z navbatida yarimo'tkazgich materialining hajmida kuchli ichki elektrostatik maydonlar va mexanik kuchlanishlar vujudga kelishiga hamda kristall panjara simmetriyasining buzilishiga olib keladi.

Bunday yarimo'tkazgich materiallarga har tomonlama gidrostatik bosim berilib va odatdagi haroratga nisbatan past haroratlarda qizdirilsa, kristall panjara simmetriyasi tiklanib, kirishma atomlar va nuqsonlar hosil qilgan hajmiy ichki elektrostatik maydon va mexanik kuchlanishlarning ta'siri yo'qolar ekan.

Tajriba natijalari asosida, haroratli ishlov berishda harorat va vaqtni boshqarib, kirishma atomlarining elektr faol konsentratsiyasini o'zgartirish mumkinligi ko'rsatib berildi (11.15— rasm). Harorat $T=175^{\circ}\text{C}$ da har tomonlama bosim qiymati $P=6\cdot 10^8$ Pa va haroratli ishlov berish vaqti $t=25\div 30$ minut bo'lganda kompensatsiyalangan kremniy materialining elektrofizik parametrlari yarimo'tkazgich kremniyni boshlang'ich holdagi qiymatlariga qaytib keldi. Bu tajribalar, har tomonlama bosim ta'sirida kompensatsiyalangan kremniyda kirishma atomlar hosil qilgan turli klaster va birikmalarni parchalanishi hamda zaryad qiymatini o'zgarish tezligi boshqa turdagi tashqi ta'sirlarning natijalaridan ko'ra tezroq sodir bo'lar ekan.



11.15-rasm. Kompensatsiyalangan kremniyda Mn kirishma atomlarining klasterlari kinetikasi Si-Mn $T=423\text{ K}$: 1- $X=10^5\text{ Pa}$, 2- $X=3\cdot 10^8\text{ Pa}$, 3- $X=6\cdot 10^8\text{ Pa}$, 4- $X=9\cdot 10^8\text{ Pa}$. $T=438\text{ K}$: 5- $X=6\cdot 10^8\text{ Pa}$. $T=473\text{ K}$: 6- $X=10^5\text{ Pa}$, 7- $X=6\cdot 10^8\text{ Pa}$. $T=448\text{ K}$: 8- $X=6\cdot 10^8\text{ Pa}$

Bu ilmiy xulosaga kelish uchun o'tkazilgan tajribalarda kirishma atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniy materiali bir xil

geometrik shaklda tayyorlab olindi va ularni solishtirma qarshiligi ham bir xil qiymatlarda olindi.

Kirishma atomlari bo'lgan kremniydagi avtotebranish hodisalar

XX asrning 60-yillarida ayrim yarimo'tkazgich materiallarda doimiy tokning avtotebranishi ma'lum termodinamik shart-sharoitlarda vujudga kelishi aniqlandi hamda olim va mutaxassislar tomonidan o'rganila boshlandi. Hozirgi davrgacha mutaxassislar tomonidan elementar (kremniy, germaniy) va birikmali ($A^{II}V^{VI}$, $A^{III}V^V$) yarimo'tkazgich materiallarda va yupqa epitaksial qatlamlarda tabiati turli mexanizmlarga bog'liq bo'lgan tokning avtotebranishlari o'rganildi va ular asosida yaratilgan qattiq jisimli generatorlardan texnikada foydalanishda ko'plab ixtirolar taklif etildi.

Tokning avtotebranishlari ko'plab yarimo'tkazgich materiallar va strukturalarda kuzatilgan bo'lib, ularning paydo bo'lish sharti, tebranish chastotasi va vujudga kelishidagi termodinamik shart-sharoitlarining tabiati turlicha bo'lib, avtotebranishlarni xususiyatlariga qarab quyidagi turlarga bo'lish mumkin:

1. Yarimo'tkazgich materiallaridagi tok tashuvchi zarrachalarning rekombinatsiya vaqtining haroratga noxiziq bog'liqligi.

2. Yarimo'tkazgich materiallaridagi tok tashuvchilarning harakatchanligining haroratga noxiziq bog'liqligi.

3. Yarimo'tkazgichlarda harorat – elektrik noturg'unligi asosidagi avtotebranishlar.

4. Segnetoelektrikdagi radiochastota maydonining Kyuri nuqtasi yaqinida haroratni noxiziqqligi asosidagi trigger tebranish muhiti.

5. Lazer nurlari ta'sirida yarimo'tkazgich materiallarini qizdirganda hosil bo'ladigan nomuvozanat holatdagi avtotebranishlar.

6. Yarimo'tkazgich materialidagi tok tashuvchilarni konsentratsiya va konsentratsiya – elektr maydon holatiga bog'liq bo'lgan avtotebranishlar.

11.1-jadvalda yarimo'tkazgich materiallarda kuzatilgan avtotebranish hodisalari va ularning kuzatilishdagi shart-sharoitlari hamda parametrlari haqida ba'zi ma'lumotlar berildi.

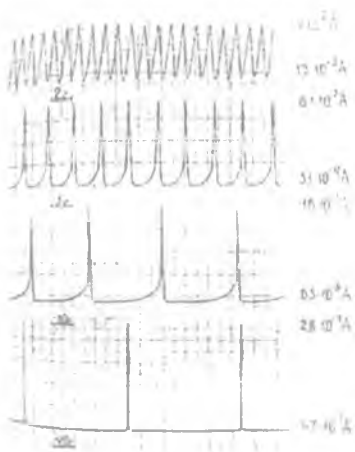
Mualliflar	Material	Materialning solishtirma qarshiligi ρ , Om sm	Harorat oralig'i T , K	Vujudga kelish elektr maydon kuchlanganligi, V/sm	Amplituda I , A	Chastota F , Gs	Kuzatilish sharti
L. V. Vinitskiy va boshqalar (Rossiya)	SdSe	10^8	$77 \div 100$	$10^3 \div 10^4$	$1 \cdot 10^{-4}$	$10^{-3} \div 1$	Integral va monoxromatik yorug'lik $\lambda = 2$ mkm
S. G. Kalashnikov va boshqalar (Rossiya)	CdSe, CdS	10^7	$150 \div 220$	$400 \div 800$	$2 \cdot 10^{-2}$	$10^{-1} \div 5 \cdot 10^{-1}$	Integral yorug'lik
B. I. Kornilov va boshqalar (Rossiya)	Si<Zn>	10^7	77	$3 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^{-6}$	$10^{-1} \div 3 \cdot 10^{-1}$	Monoxromatik yorug'lik $\lambda = 2$ mkm
YU. K. Vishakas va boshqalar (Litva)	CdSe	$10^6 \div 10^{10}$	$200 \div 300$	200	10^{-4}	$10 \div 10^2$	Monoxromatik yorug'lik $\lambda = 0.7$ mkm
K. S. Germanova (Bolgariya)	CdS	10^6	$270 \div 340$	$5 \cdot 10^3 \div 10^4$	$2 \cdot 10^{-4}$	$10^{-3} \div 10^{-1}$	Monoxromatik yorug'lik $\lambda = 0.8$ mkm
N. YA. Xaffman (Germaniya)	CdS	$10^6 \div 10^8$	$240 \div 300$	$5 \cdot 10^2 \div 6 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^{-7}$	$10^{-3} \div 10$	Monoxromatik yorug'lik $\lambda = 0.895$ mkm
R. Koet va boshqalar (Germaniya)	SdS	$10^6 \div 10^7$	300	150	10^{-3}	$10^{-3} \div 10$	Monoxromatik yorug'lik $\lambda = 0.73$ mkm

A SH Abdinov va boshqalar (Ozarbayjon)	InSe	$10^4 \div 10^6$	77÷120	300	10^{-4}	$10^{-1} \div 10^{-2}$	Monoxromatik yorug'lik $\lambda = 0.7 \div 1.9$ mkm
S.G.Kalvenas (Latviya)	n-Si	$4 \cdot 10^2$	77	80	$2 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-2}$	Monoxromatik yorug'lik $\lambda = 0.62$ mkm
L.L.Golik va boshqalar (Rossiya)	SdSe	$10^6 \div 10^7$	77÷100 250÷300	10^3	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$10^{-2} \div 10^{-1}$	Integral va monoxromatik yorug'lik $\lambda = 0.52 \div 1.0$ mkm
M.K.Baxadixonov va boshqalar (O'zbekiston)	Si<Mn>	$5 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^5$ R	77÷200	150÷30	0.3	$10^{-3} \div 10^{-1}$	Integral yorug'lik $J = 10^{-2} \div 50$ лк Monoxromatik yorug'lik $\lambda = 1 \div 3.5$ mkm
M.K.Baxadixonov va boshqalar (O'zbekiston)	Si<Zn>	$20 \div 10^3$ R	77÷180	150÷20	0.2	$10^{-3} \div 10^{-1}$	
M.K.Baxadixonov va boshqalar (O'zbekiston)	Si<Zn>	$10^3 \div 10^5$ R	77÷140	300÷600	1.0	$10^{-3} \div 10^{-1}$	
M.K.Baxadixonov va boshqalar (O'zbekiston)	Si <B,Mn>	$10^3 \div 10^5$	200÷350	40-200	$(1 \div 20) \cdot 10^{-6}$	$(0.5 \div 20) \cdot 10^{-3}$	
M.K.Baxadixonov va boshqalar (O'zbekiston)	Si <B.S>	$10^3 \div 10^5$	250÷300	250÷300	$10^3 \div 10^4$	30	$10^{-3} \div 10^{-4}$

11.8. Kompensatsiyalangan kremniydagi past chastotali avtotebranishlar

Oldingi bobda bayon etilgan, yarimo'tkazgichlar fizikasida yangi bo'lgan effektlar kirishma atomlar bilan kompensatsiyalangan kremniy materialida kuzatildi. Xuddi shu materiallarda, ma'lum bir termodinamik shart-sharoitlarda tabiati turli xil bo'lgan avtotebranishlarning vujudga kelishi aniqlandi hamda o'rganildi.

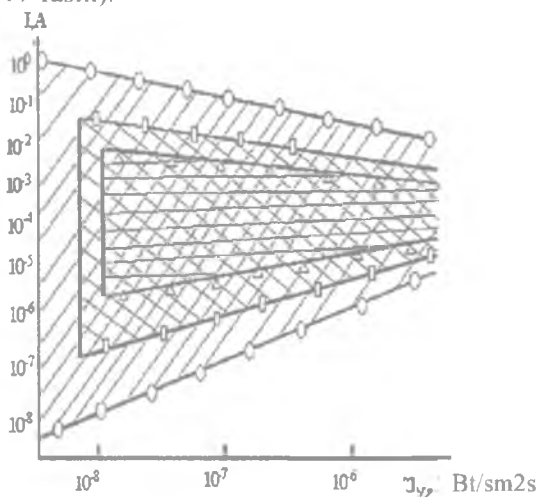
Marganets, rux, selen yoki oltingugurt kirishma atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniy namunalarining volt – amper tavsifini (VAT) manfiy differensial o'tkazuvchanlik kuzatilgan qismida ma'lum termodinamik shart-sharoitlarda tokning past chastotali ($f=10^{-3} \div 10\text{Gs}$) avtotebranishlari kuzatildi.



11.16-rasm. Kompensatsiyalangan kremniydagi past chastotali avtotebranishlar shakli

Bunday tebranishlar sinusoidal, cho'qqisimon, qo'shimcha garmonikali hamda stoxastik ko'rinishlarda namoyon bo'ldi (11.16-rasm). Tashqi ta'sirlarni (harorat, yoritilganlik, elektr va magnit maydon kuchlanganliklari, bir o'qli bosim) boshqarib sanab o'tilgan

avtotebranish shakllarini turg'un holatda vujudga keltirish va avtotebranish parametrlarini (E_b , I_f) oson boshqarish mumkinligi ko'rsatib berildi. Kuzatilgan past chastotali avtotebranishlarning ahamiyati shundaki, tebranish amplitudasining qiymati g'ayrioddiy katta bo'lib, modulyatsiya koeffitsiyenti $\sim 100\%$ ni tashkil etdi. Kremniyga kiritilgan kirishma atomlarini kristall panjaradagi holatiga va hosil qilingan klasterlarining zaryad qiymatiga qarab avtotebranishni kuzatilishi mumkin bo'lgan chegaraviy qiymatlar aniqlandi (11.17-rasm).



11.17-rasm. Marganets atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniydagi past chastotali avtotebranish amplitudasini monoxromatik yorug'lik quvvatiga bog'liqligi: $-N_{Mn}=2 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$, $N_{Mn}=2 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$, $\Delta N_{Mn}=2 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$, $T=80 \text{ K}$, $E=400 \text{ V/sm}$, $h\nu=1,12 \text{ eV}$

Past chastotali avtotebranishning parametrlarini kirishma atomlarining turiga bog'liqligi o'rganilganda parametrlarini qiymati va harorat hamda yorug'lik ta'sirida kuzatilishi marganets atomlari kiritilgan kremniyda, rux va oltingugurt atomlari kiritilgan kremniy namunalariga nisbatan keng sohada kuzatildi.

11.9. Kompensatsiyalangan kremniydagi avtotebranishlarning dinamik xaos va gisterezis holati

Hozirgi kunda yarimo'tkazgich materiallardagi avtotebranishlarda hosil bo'ladigan dinamik xaos va gisterezisni o'rganishga qiziqish kun sayin oshib bormoqda. Chunki nohiziq hisoblangan dinamik xaos tebranishlar fan va texnikaning ko'plab sohalarida kuzatilgan bo'lib, amaliyotda keng qo'llab kelinmoqda. Bu sohalarga gidrodinamika, radiotexnika, kvant radiofizikasi, plazma fizikasi, kimyoviy reaksiyalar tahlili, biologik jarayonlar, tibbiyot va boshqalarni misol qilib ko'rsatish mumkin.

Kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan avtotebranishlar ham materialning elektrofizik parametrlari nomuvozanat holatdan chiqarganda kuzatilgan bo'lib, ma'lum termodinamik shart-sharoitlarda avtotebranishlar dinamik xaos holatiga o'tdi. Kompensatsiyalangan kremniydagi avtotebranishlarda hosil bo'ladigan dinamik xaosni o'rganish chuqur energetik sath hosil qiladigan kirishma atomlar haqida qo'shimcha fundamental ma'lumotlarni olish bilan bir qatorda, amaliyotda avtotebranishlardan foydalanishda yangi funksional imkoniyatlarni ochib beradi. Bundan tashqari, kompensatsiyalangan kremniy materialini yangi material sifatida o'rganish hozirda noma'lum bo'lgan fizik hodisalar va effektlar ochilishiga ham sabab bo'lishi mumkin.

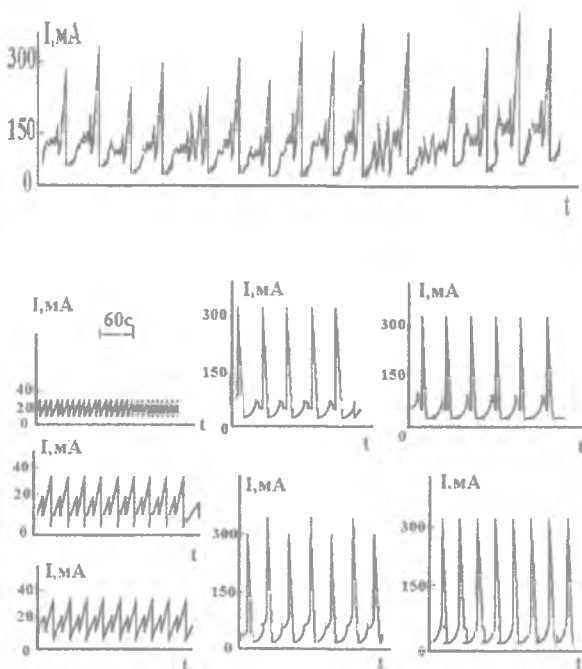
Kompensatsiyalangan kremniyda monoxromatik nur ta'sirida vujudga kelgan avtotebranishlarni dinamik xaosga o'tishi materialga qo'yilgan elektr maydon kuchlanganlikning qiymatini o'zgartirish bilan amalga oshirildi. Kompensatsiyalangan kremniyda davriy ravishda kuzatilayotgan avtotebranishni ta'minlab turgan elektr maydon kuchlanishining $\Delta E = 85 \text{ V/sm}$ oralig'ida o'zgarishi, avtotebranish shaklini keskin o'zgartirib yubordi, ya'ni oddiy kvazi sinusoidal ko'rinishidagi avtotebranish asta-sekinlik bilan murakkab ko'rinishidagi staxostik tebranishga o'tdi (11.18-rasm).

11.18-rasmdan ko'rinadiki, davriy avtotebranishlar ikki va undan ko'p garmonikali buferkatsiyalarga o'tib (11.8-rasm.b, j), so'ngra dinamik xaos ko'rinishidagi tebranishlarga o'tishi kuzatilar ekan (11.8-rasm, u). Dinamik xaos ko'rinishidagi avtotebranishlarning

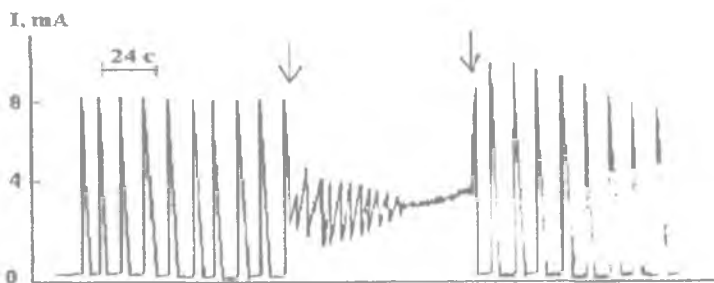
shakli uzoq vaqt oralig'ida tahlil qilinganda, tebranishlar o'rtasida qandaydir davriy takrorlanib turadigan avtotebranish shaklini uchratish mumkin bo'ldi.

Davriy avtotebranishlar boshlanishi yoki so'nishi chegarasi oldida dinamik xaos ko'rinishdagi avtotebranishlar kuzatildi. Avtotebranishlarning xuddi shunday holati tashqi harorat va yoritilganlikning quvvatini o'zgartirganda ham kuzatildi.

Kompensatsiyalangan kremniyda yorug'lik ta'sirida kuzatilgan avtotebranishga qo'shimcha yorug'lik ta'sir etilganda, avtotebranish so'nishi, yorug'lik o'chirilganda esa avtotebranish qayta tiklanishi, ya'ni gisterezis holati kuzatildi (11.19-rasm).



11.18-rasm. Kompensatsiyalangan kremniydagi davriy va stoxostik avtotebranishlar: $\lambda=1,48$ mkm; $E, V/\text{sm}$: a-540, b-545.4, v=555, g-565, d-575, e-600, j-610, z-625



11.19-rasm. Kompensatsiyalangan kremniyda yorug'lik ta'sirida kuzatilgan avtotebranishga qo'shimcha yorug'lik ta'sir etganda avtotebranish so'nishi, yorug'lik o'chirilganda esa avtotebranish qayta tiklanish gisterezis holati

Olingan natijalarning ilmiy tahlili shuni ko'rsatdiki, davriy avtotebranishlardan dinamik xaos ko'rinishidagi tebranishlarga o'tishiga asosiy sabab tok tashuvchilarning generatsiya jarayonining tashqi ta'sir natijasida o'zgarishi ekan. Haqiqatdan ham avtotebranishlar so'nishi yoki shaklining boshqa ko'rinishga o'tishi kompensatsiyalangan kremniy namunalarda tokning ortishi hisobiga Joule effektini vujudga kelishi va natijasida harorat ortishi sababli sodir bo'ladi.

11.10. Kompensatsiyalangan kremniydagi avtotebranishlarning tabiati va o'zaro bog'liqligi

Kirishma atomlar (marganets, rux, selen, oltingugurt) bilan kompen-satsiyalangan kremniyda vujudga keladigan tokni avtotebranishlarini har tomonlama va tizimli o'rganishlar natijasi shuni ko'rsatdiki, avtotebranishlarning termodinamik sharoitlarini boshqarib (elektr maydon kuchlanganligi, yoritilganlik, harorat va boshqalar), bitta namunada mexanizmi turli bo'lgan avtotebranishlarni vujudga keltirish mumkin bo'lar ekan. Ilmiy adabiyotlarning tahlili asosida, shu davrgacha birorta materialda tabiati turli xil bo'lgan hamda mexanizmlari, parametrlari va vujudga kelish shartlari ham

bir-biridan keskin farq qiladigan avtotebranishlar bir materialda kuzatilmagan. Shu sababli, kompensatsiyalangan kremniydagi turli xil avtotebranishlarni bir turdan boshqasiga o'tish jarayonlari va har bir turdagi avtotebranishlarning kuzatilishining chegaraviy qiymatlarini aniqlash fundamental va amaliy jihatdan katta qiziqish uyg'otadi. Nazariy jihatdan avtotebranish jarayonlarining mexa-nizmini tushuntirish yarimo'tkazgichlar fizikasida katta ahamiyatga ega bo'lsa, amaliy tarafdin kremniydagi avtotebranishlar asosida hozirda tubdan yangi bo'lgan qattiq jismli generatorlarni hamda amplituda – chastotali chiqish signaliga ega bo'lgan tashqi ta'sirni sezuvchi ko'p funksiyali datchiklarni yaratish imkonini beradi.

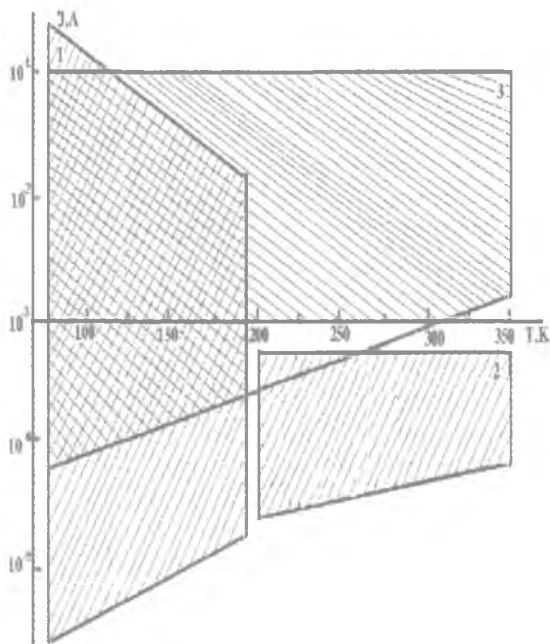
Kompensatsiyalangan kremniy materialidagi avtotebranishlar keng harorat oralig'ida kuzatilib, termodinamik shart-sharoitlari o'zgarishi bilan bir turdan ikkinchi turdagi avtotebranishga o'ta olar ekan. Ba'zi bir holatlarda avtotebranishlar harorat, tashqi elektr maydon kuchlanganligi, materiali solishtirma qarshiligining qiymatlari bo'yicha kuzatilishi mumkin bo'lgan chegaralari bir-birini qoplab oldi. 11.2-jadvalda marganets, rux va oltingugurt atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniydagi avtotebranishlarni kuzatilishi mumkin bo'lgan tashqi ta'sir kattaliklarining chegaraviy qiymatlari berildi.

11.2- jadval

№	Material	O'tkazuvchanlik turi	Solishtirma qarshilik $\rho, \text{Om}\cdot\text{sm}$	Yoritilganlik		Harorat T, K
				Monoxromtik $I_{\lambda}, \text{Vt}/\text{sm}^2\cdot\text{s}$	Spektral soha $\lambda, \text{m km}$	
1	Si <Mn>	n	$8 \cdot 10^4 \div 2 \cdot 10^5$	$10^{-7} \div 10^{-5}$	$10^{-3} \div 50$	80÷200
		p	$5 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^5$	$10^{-9} \div 10^{-5}$	$10^{-3} \div 50$	80÷200
2	Si <Zn>	n	$10^2 \div 2 \cdot 10^5$	$10^{-8} \div 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3} \div 50$	80÷180
3	Si <S>	p	$3 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^5$	$10^{-8} \div 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3} \div 10$	80÷160

Jadvaldan ko'rinadiki, marganets kirishma atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniyning elektrofizik parametrlari bir xil bo'lgan materialda uch turdagi avtotebranishlar kuzatilar ekan. Bu

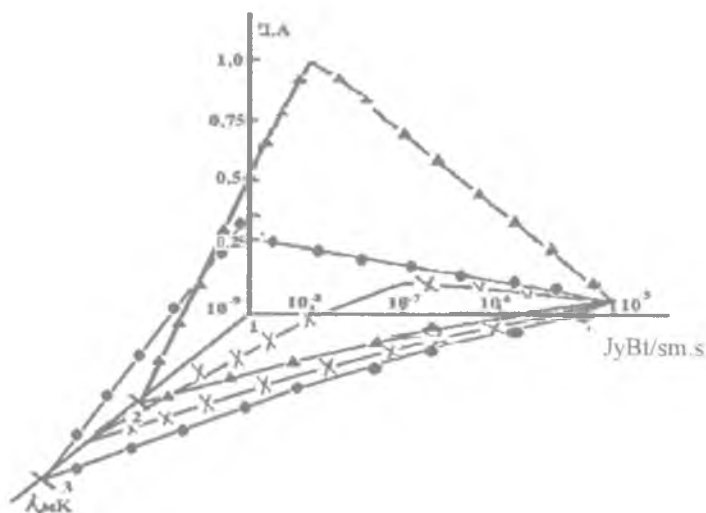
tajriba natijalari kompensatsiyalangan kremniy materiali asosida avtotebranish muhitini yaratish hamda avtotebranish parametrlari va shaklini keng spektr oralig'ida boshqarish imkoniyatini ochib berdi (11.20-rasm).



11.20-rasm. Kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan uch turdagi tebranishlarning amplitudasining maksimal va minimal qiymati harorat oralig'ida o'zgarishi: $\rho=5 \cdot 10^4 \text{ Om} \cdot \text{sm}$. 1 –HET; 2 – RT; 3 – IT

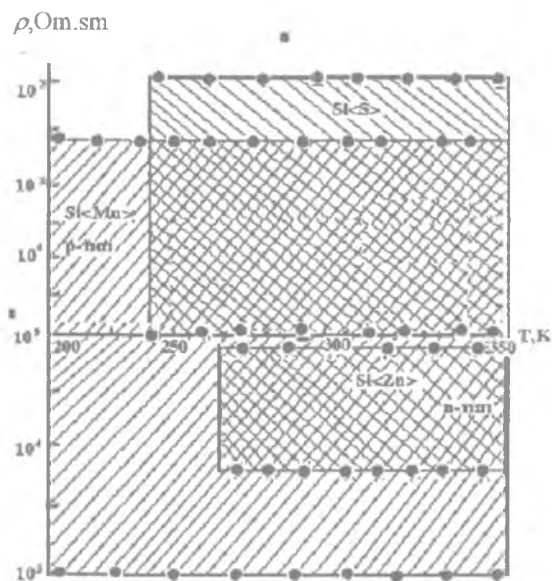
Marganets, rux yoki oltingugurt atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniydagi avtotebranishlar boshqa yarimo'tkazgich materiallar va strukturalarda kuzatilgan avtotebranishlarga nisbatan monoxromatik yoritilganlik quvvati va to'liq uzunliklarining qiymati keng oralig'ida kuzatildi.

11.21-rasmda kremniydagi past chastotali avtotebranishlarni amplitudasining qiymatini yoritilgan monoxromatik nurning to'liq uzunligi va quvvatiga bog'liqligini o'rganish natijalari berildi. Olingan natijalardan oltingugurt atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniydagi avtotebranishlarning amplitudasini qiymati eng katta bo'lishi, marganets atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniydagi past chastotali avtotebranishlar monoxromatik yorug'likning to'liq uzunligi va quvvati keng qiymatlari oralig'ida kuzatilishi aniqlandi. Bu natijalar kremniyda kuzatilgan past chastotali avtotebranishlar tushayotgan fotonlar energiyasining qiymati $h\nu > E_g$ bo'lganidagina emas, balki fotonlar energiyasining qiymati kremniy taqiqlangan sohasining energiya qiymatidan kichik bo'lgan holda ham kuzatilishi aniqlandi.



11.21-rasm. Marganets, rux va oltingugurt atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniydagi past chastotali avtotebranish amplitudasini monoxromatik yorug'likning to'liq uzunligi va quvvatiga bog'liqligi: $T=300K$, $\rho=5 \cdot 10^4 \text{ Om}\cdot\text{sm}$, $p - \text{Si}[B,Mn]$; $n - \text{Si}[P,Zn]$; $p - \text{Si}[B,S]$

Kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan uch turdagi avtotebranishlar ichida rekombinatsion to'liqlar xona harorati oralig'ida, elektr maydon kuchlanganligining kichik qiymatlarida kuzatilishi hamda qo'shimcha injeksion kontaktlarni hosil qilish zarurati bo'lmagani uchun amaliyotga tadbiiq etishda ustunlikka ega ekan.



11.22-rasm. Rekombinatsion to'liqlar avtotebranishlarni kirishma atomlarining turi va materialning solishtirma qarshiligiga bog'liq holda harorat oralig'ida kuzatilish chegarasi

Kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan avtotebranishlardan rekombinatsion to'liqlar materialning solishtirma qarshiligi va o'tkazuvchanlik turiga bog'liq kuzatilishining harorat oralig'i alohida o'rganildi (11.22-rasm). Kompensatsiyalangan kremniydagi rekombinatsion to'liqlarni kuzatilishining harorat oralig'ida o'rganish natijalari kirishma atomlarni kristall panjarada joylashgan tabiati, materialning solishtirma qarshiligi va o'tkazuvchanlik turiga bog'liq o'zgarish qonuniyatlari haqida fundamental ma'lumotlarni berdi.

12. KOMPENSATSIYALANGAN KREMNIY ASOSIDA FIZIK KATTALIKLARNI O'LCHOVCHI DATCHIKLAR

Fan va texnika rivojlanishi yangi zamonaviy ishlab chiqarish texnologiyalarni yaratish, texnologik tizimlarni avtomatlashtirish, kompyuterlarning yangi avlodini yaratish hamda ekologik muammolarning yechimini ijobiy hal qilishda yarimo'tkazgich materiallar asosida yaratilgan datchiklar va qurilmalaridan foydalanmasdan amalga oshirib bo'lmaydi. Yarimo'tkazgich materiallar asosidagi datchiklarni yaratishdagi texnologiya, datchiklarning tezkorligi va sezgirligi bo'yicha imkoniyatlarini kengaytirish chegaralari oxiriga yetdi. Shu sababli, yangi yarimo'tkazgich materiallarini olish yoki mavjud materiallar asosida tezkorligi yuqori bo'lgan ixcham datchiklar va qurilmalarni yaratish soha mutaxassislari va texnologlaridan yangi innovatsion yechimlarni hal qilishni talab qiladi. Yaratilgan past haroratda kirishma atomlar bilan kompensatsiyalangan kremniyni olish texnologiyasi hamda bu materiallarda kuzatilgan yangi fizik hodisa va effektlar kompensatsiyalangan kremniy asosida yaratiladigan datchik va qurilmalarni elektronkada qo'llash istiqbolli yo'nalish ekanligini ko'rsatadi. Chunki bu turdagi datchik va qurilmalar olish texnologiyasi kam energiya sarfi, materiallarning elektrofizik parametrlarini turg'unligi va ular asosida yaratilgan fizik kattaliklarni o'lchovchi datchiklarning o'ta sezgirligi hamda qurilmalar ixchamligi va tannarxining arzonligi bilan ajralib turadi.

Kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan fizik hodisa va effektlar o'zining g'ayri oddiyligi hamda bu materiallarning elektrofizik parametrlari tashqi ta'sirlarga (harorat, integral va monoxromatik yorug'lik, elektr va magnit maydon kuchlanganligi, bir o'qli va har tomonlama bosim, tushayotgan fotonlarning energiyasi va quvvati) o'ta sezgirligi bilan mavjud yarimo'tkazgich materiallardan farq qilishi, kelajakda elektronika sanoati uchun ularning asosiy materiallardan biri bo'lib qolishidan dalolat beradi. Yuqorida o'rganilgan fizik hodisa va effektlarning ko'pi bitta materialda kuzatilishi kompensatsiyalangan kremniy asosida ko'p funksiyali datchiklarning yangi avlodlarini yaratish imkonini beradi. Avto-

tebranishlar asosida yaratiladigan datchiklar nafaqat sezgirliги balki, amplituda-chastotali chiqish signali bilan hozirda mavjudlaridan tubdan farq qiladi.

12.1. Infraqizil va oq nurlarni sezuvchi fotopriyo'mniklar

Zamonaviy elektronika va optoelektronikada kichik quvvatli **infraqizil** nurlarni sezuvchi va qayd qiluvchi fotopriyo'mniklarni yaratish muammosining yechimini hal qilish dolzarb masalalardan hisoblanadi. Bunday fotopriyo'mniklarni texnikaning turli sohalarida keng qo'llash imkoniyatlari mavjud. **Infraqizil** nurlarni sezuvchi yaratiladigan fotopriyo'mniklarni masofadan boshqarish qurilmalarida, tibbiyotda haroratni o'lchash va kasallikni aniqlovchi tamograflarda, tungi ko'rish qurilmalarida Quyosh energiyasining tarkibini o'rganish va nazorat qilishda, turli obyektlarni qo'riqlashda hamda yong'in xavfsizligini nazorat qilishda samarali foydalanish mumkin. Ko'plab yarimo'tkazgich materiallar asosida yaratilgan, fotoqarshilik o'zgarishi hisobiga ishlaydigan **infraqizil** nur fotopriyo'mniklarning kichik quvvatdagi **infraqizil** nurlarni sezish imkoniyatlari cheklanganligi tufayli ulardan turli sohalarda keng foydalanib bo'lmaydi. Ayniqsa, integral yorug'lik mavjudligida **infraqizil** nurlarni seza oladigan fotopriyo'mniklar kam va ularning sezgirliги yaxshi emas. Kunduzi integral yorug'lik mavjudligida qo'shimcha kichik quvvatli **infraqizil** nurlarni seza oladigan fotopriyo'mniklarni yaratishda kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan fotoo'tkazuvchanlikning **infraqizil** nur ta'sirida so'nishi effektidan foydalanish mumkin.

Tajriba natijasida aniqlangan hamda ilmiy xulosalar asosida kompensatsiyalangan kremniy materialini nisbatan past haroratda ($T=77\div200K$) integral nur bilan yoritib, fotoo'tkazuvchanlikning ma'lum turg'un qiymatiga olib kelib, so'ngra qo'shimcha **infraqizil** nur ta'sir etilsa, tushayotgan fotonlar energiyasining $h\nu=0.4\div0.6eV$ oralig'ida fotoo'tkazuvchanlikning so'nishi kuzatildi. Fotonlar energiyasining ta'sirida fotoo'tkazuvchanlikni so'nishi
$$\frac{J_f}{J_f+h\nu}=10^4\div10^6$$
 ni tashkil etdi. Bunday sezgirlik hozirda mavjud bo'lgan yarimo'tkazgich materiallar asosida yaratilgan biron-bir fotopriyo'mnikda kuzatilmagan.

Taklif etilayotgan **infraqizil** nur fotopriyo`mnigi  $T=77-200$  K oralig`ida tashqi elektr maydon kuchlanganligi $E=10-50$ V/sm qiymatida ishlaydi. Fotopriyo`mniklarning fotonlar energiyasini sezishi  $h\nu=0,4-0,8$  eV oralig`ida bo`lib, nisbatan katta qiymatdan integral fon mavjudligida foton energiyasining quvvatini kichik  $I=10^{-9}-10^{-5}$  Vt/sm<sup>2</sup> s qiymatlari oralig`ida **infraqizil** nur energiyasining bunday kichik quvvatini seza oladigan o`ta sezgir fotopriyo`mniklar hozirda mavjud emas.

Kompensatsiyalangan kremniy materiali asosida taklif etilgan **infraqizil** nur fotopriyo`mniklarini yaratilish texnologiyasining soddaligi kam energiya talab qilishi, spektral sezgirligining kengligi va harorat qiymatining katta oralig`ida ishlay olishi tufayli hozirgi zamon elektronikasida ko`plab ishlab chiqarish mumkin.

12.2. Kompensatsiyalangan kremniy asosidagi magnit maydon kuchlanganligini sezuvchi datchiklar

Magnit sezgir datchiklar galvanomagnit effekti asosida ishlab, ko`plab mexanik qurilmalarni avtomatlashtirishda, doimiy tokni o`zgaruvchan tokga aylantirishda, magnit maydon induksiyasi va kuchlanishini o`lchashda, tokning qiymatini kontaktsiz o`lchashda, mikrofonlarda, magnit ta`sirida axborotlarni saqlash va yozishda keng qo`llaniladi.

Galvanomagnit qurilmalar va datchiklardan elektronika keng foydalanishdagi asosiy ustunliklarga quyidagilarni kiritish mumkin:

1. Galvanomagnit qurilmalarning kirish va chiqishi orasida o`zaro teskari elektr bog`lanishning yo`qligi.

2. Mexanik harakatni elektr signalga aylantirish va uni turg'un ushlab turish osonligi.

3. Galvanomagnit qurilmalar va datchiklarni yaratishdagi elektr sxema soddaligi.

4. Kichik o`lchamliligi va kam quvvat talab etishi.

5. Ishlatishda ishonchliligi va parametrlarining yuqori turg'unligi.

Hozirda mavjud bo`lgan, magnit maydon kuchlanganligini o`lchovchi datchik va qurilmalarning kamchiligi magnit maydon

kuchlanganligining qiymatini sezgirligining pastligi hamda chiqish signali kichikligidir. Shu sababli, bunday qurilma va datchiklarni fan va texnikada keng qo'llash imkoniyatlari cheklangan. Kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan magnit qarshilik effektlar musbat va manfiy magnit qarshilik, magnit maydon kuchlanganligi qiymatlariga o'ta sezgirliги va chiqish signali kattaligi bilan ajralib turishi, uning asosida magnit maydon kuchlanganligini o'lchovchi va nazorat qiluvchi galvanomagnit qurilmalar va datchiklarni yaratish hamda turli sohalarda qo'llashda katta imkoniyatlar ochib beradi. Bu qurilma va datchiklarni chiqish signalining qiymati katta bo'lishi qo'shimcha signal kuchaytirish moslamalaridan foydalanmaslik imkonini beradi. Bu o'z navbatida datchiklarning tannarxi arzonlashishiga olib keladi.

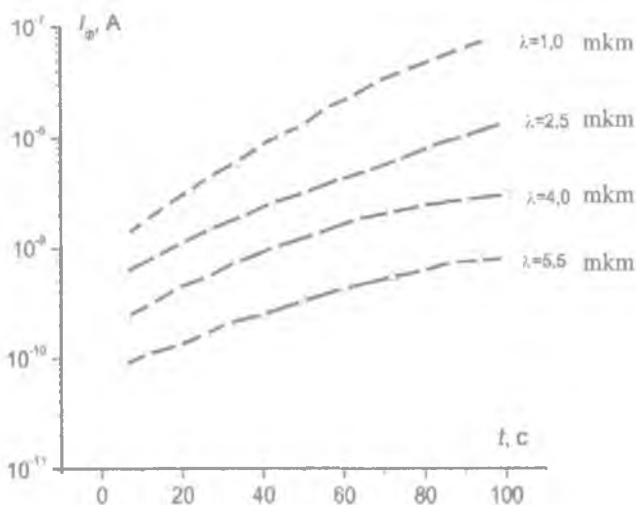
Magnit datchikning ishlash asosi magnit maydon ta'sirida materialning solishtirma qarshiligi oshishi yoki kamayishi natijasida elektr zanjirdan o'tayotgan tok qiymati o'zgarishidir. Magnit datchik ko'priksimon ulanish asosida tashqi elektr maydoniga ulanadi. Bu magnit datchikning sezgirligini yanada oshiradi. Magnit sezgir datchik qarshiligidan o'zgarishi chiqish signalining yig'indisini o'zgartiradi: $\Delta U = I \Delta R$ (bunda, I – zanjirdan o'tayotgan tokni qiymati, ΔR – magnit sezgir datchikni magnit maydon ta'sirida o'zgargan qarshiligi). Ko'priksimon sxemadagi o'zgaruvchan qarshilik yordamida chiqishdagi kuchlanishlar farqi yo'qotiladi. Bunda, R_{oz} – qarshilikni o'zgartirib, zanjirdagi tok qiymati boshqariladi. Kompensatsiyalangan kremniy asosida magnit maydon kuchlanganligini o'lchovchi datchiklar tashqi elektr kuchlanganligining qiymati standart 6V yoki 9V bo'lganda, harorat $T = -50^{\circ} + 70^{\circ}C$ gacha oralig'ida $I = 0 \div 15kEr$ magnit maydon kuchlanganligini $\alpha = 9,1mV/Er$ sezgirlik darajasida o'lchay oladi.

12.3. Kompensatsiyalangan kremniy asosida foton hisoblagich

Hozirda monokristall kremniy va birikmali yarimo'tkazgich materiallar (PbS , $PbSe$, $InSb$ va boshqa) asosida yaratilgan ko'chki diodlar ko'rinishidagi foton hisoblagichlar elektronkada keng foydalanib kelinmoqda. Bunday foton hisoblagichlarni yaratishda

murakkab texnologiyalardan foydalanib, faol element va kontakt sohani qatlamma-qatlam qilib olish talab etiladi. Boshqa turdagi foton hisoblagichlar yanada murakkab elektron tizim asosida ishlaydi. Sezgir foton hisoblagichga tushgan foton birlamchi signal amplitudasini hosil qiladi. Bu impuls qo'shimcha elektr tizimida seleksiyalanib va kuchaytirilib, so'ngra hisoblagich blokiga uzatiladi.

Kompensatsiyalangan kremniy asosida yaratiladigan foton hisoblagich infraqizil nurning to'liq uzunligining $\lambda=1,5\div8\text{mkm}$ qiymatlari va harorat $T=77\div250\text{K}$ oralig'ida o'tasezgirlik bilan fotonlar oqimini aniqlay oladi.



12.1 –rasm. Kompensatsiyalangan kremniyda fotonlar energiyasiga bog'liq fototokning qiymati vaqt oralig'ida o'sish kinetikasi

Tajriba natijalari shuni ko'rsatadiki, kompensatsiyalangan kremniy asosida yaratiladigan foton hisoblagichga $\lambda=1,5\div8\text{mkm}$ to'liq uzunlikdagi fotonlar kelib tushganda, fototokning qiymati o'sib borar ekan. Fototokning qiymati ma'lum vaqt oralig'ida o'sish kinetikasi 12.1-rasmda berildi. Rasmdan ko'rinadiki,

kompensatsiyalangan kremniy asosidagi foton hisoblagich yuzasiga tushayotgan fotonlarning to'liq uzunligiga qarab fototokning qiymati ikki marotabadan ellik marotabagacha ortib borar ekan. Foton hisoblagich yuzasi $S=0,05 \text{ sm}^2$ qalinligi $d=0,1 \text{ sm}$ da tayyorlab olindi. Uning ikki yoniga tok o'tkazuvchi elektrod simlar o'tkazilib, tashqi ta'sirlardan himoya qilish maqsadida metall korpusga joylashtirildi. Materialga fotonlar tushishi uchun korpusning tepa qismiga shaffof sapfir materiali o'rnatildi. Namunaga tashqi elektr manbadan $U=6\text{V}$ ulandi. Foton hisoblagichga ketma-ket qilib, mikroampermetr ulangan bo'lib, u boshlang'ich (qorong'u holatdagi) va fotonlar tushgandagi tokning qiymatini o'lchash imkoniyatini beradi.

Kompensatsiyalangan kremniy asosida yaratilishi taklif etilgan foton hisoblagichning asosiy parametrlari quyidagilardan iborat:

- spektrall sezgirli $\lambda=1,5\div 8 \text{ mkm}$ ($h\nu=0,2\div 1\text{eV}$);
- ishlash harorat oralig'i $T=77\div 250\text{K}$;
- tashqi elektr manba $U=6\text{V}$;
- o'lchami $5\times 1\times 1,5\text{mm}^3$;
- sezgirlik chegarasi $S=10^{-9}\text{Vt/sm}^2 \text{ sek}$;
- o'lchash uchun kerak bo'lgan minimal vaqt $\tau>10^{-2}\text{sek}$.

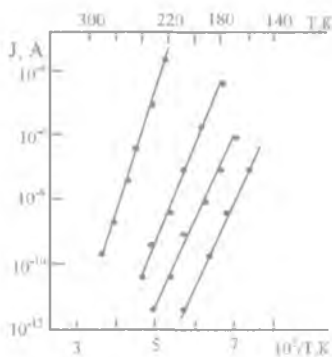
Taklif etilgan foton hisoblagich imkoniyatlari hozirda mavjudlari bilan solishtirilganda uning sezgirli yuqori ekanligi va keng harorat oralig'ida fotonlar oqimini o'ta aniqlik bilan hisoblay olishi mumkinligi aniqlandi. Bunday foton hisoblagichlar yaratilish texnologiyasi soddaligi, kam energiya talab qilishi bilan bir qatorda uzoq vaqt mobaynida amaliyotda foydalanish imkonini beradi.

12.4. Kompensatsiyalangan kremniy asosidagi harorat o'lchagichlar

Yarimo'tkazgich materiallarining elektrofizik parametrlari tashqi ta'sirlar, ayniqsa harorat o'zgarishi natijasida keskin o'zgaradi. Yarimo'tkazgich materiallarida kuzatilgan bu xususiyat haroratga turg'unlik tomonidan yaxshi hisoblanmasa-da, harorat ta'sirida materialning elektrofizik parametrlari o'zgarishi asosida haroratni sezuvchi, o'lchovchi va nazorat qiladigan termodatchiklar yaratishda katta imkoniyatlar beradi. Kompensatsiyalangan kremniy asosida

yaratilishi taklif etilgan termodatchik solishtirma qarshiligi katta bo'lgan harorat sezuvchi i – sohadan hamda uning ikki tomonida omik kontakt hosil qilingan solishtirma qarshiligi kichik bo'lgan metall qatlamdan iborat. Kompensatsiyalangan kremniy asosidagi bunday strukturaga tashqi elektr manbasi ulanganda undan mikroamper qiymatida tok o'ta boshlaydi. Agarda struktura joylashgan muhitning harorati o'zgarsa, uning bazasining qarshiligi qiymati ham o'zgaradi, natijada strukturadan o'tayotgan tokning ham qiymati o'zgaradi. Tokning o'zgargan qiymati mos ravishda muhitning haroratini $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ aniqlikda o'lchash mumkin bo'ladi. Harorat o'lchagich $T=250\div 350^{\circ}\text{C}$ oralig'ida turg'un ishlab tekshirilayotgan muhitning harorati haqida aniq ma'lumot beradi.

Kompensatsiyalangan kremniy asosida haroratni o'lchashda fotoo'tkazuvchanlik harorat ta'sirida so'nish effektidan ham foydalanish mumkin. Ma'lumki, nisbatan past $T=140\div 200\text{K}$ haroratlarda fotoo'tkazuvchanlikning harorat ta'sirida so'nish effekti kuzatilgan edi. Bunda fototokning qiymati juda kichik harorat oralig'ida $10^6\div 10^7$ darajada kamayib, termosezgirlik koeffitsiyenti $\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$ yoki $\alpha = \frac{V}{zT} 100\%$ ni qiymati (35÷40) % gradga teng bo'ldi (12.2-rasm). Bunda, V – koeffitsiyent materialning solishtirma qarshiligi haroratga bog'liq o'zgarishidan aniqlanadi.



12.2-rasm. Kompensatsiyalangan kremniy qarshiligining haroratga bog'liqligi

$$V = \frac{2,303}{\Delta \left(\frac{1}{T} \right)} \Delta l g, \quad R = \frac{2,303}{\Delta \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} \Delta l g R \quad (12.1)$$

Bunda, T_1 va T_2 – mos ravishda haroratni boshlang'ich va so'nggi qiymatlari. Bu kattaliklar kompensatsiyalangan kremniy uchun hisoblanganda $V=10^4 \div 1,2 \cdot 10^4$; $D=(35-40)$ % gradus qiymatlari aniqlandi. Haroratni o'lchashda termodatchikning har bir qiymatni o'lchash intervali $\tau=30-35$ soniyani tashkil etdi. Kompensatsiyalangan kremniyda fotoo'tkazuvchanlikning harorat ta'sirida so'nish effekti asosida past haroratlarni o'lchashga moslashtirilgan termodatchik yaratish mumkin ekan. Bunday termodatchiklar sezgirligi bo'yicha mavjud yarimo'tkazgich termodatchiklardan yuqori bo'lib, yaratilish texnologiyasi soddaligi va arzonligi bilan ajralib turadi.

12.5. Kompensatsiyalangan kremniy asosidagi tenzodatchiklar

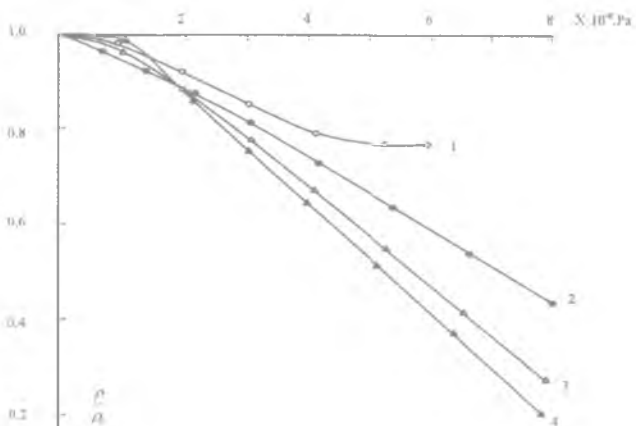
Mexanik kattaliklarni (bosim, siqilish, cho'zilish) elektr signaliga aylantirib beruvchi yarimo'tkazgich datchiklarni ishlashiga asos qilib tenzorezistorlar tanlab olindi. Bu yarimo'tkazgich datchiklar metall materiallardan yasalgan tenzorezistorlardan sezgirligi kattaligi bilan ajralib turadi. Yarimo'tkazgich tenzorezistorlarni turli shaklda va o'lchamda yaratish osonligi bu materiallar mexanik kattaliklarni o'lchashda keng foydalanish imkoniyatlari mavjudligini ko'rsatadi.

Adabiyotlardan ma'lumki, yarimo'tkazgich materialini kirishma atomlar bilan legirlab taqiqlangan sohada chuqur energetik sath hosil qilinsa. bu material tashqi mexanik bosimga o'tasezgir bo'lib qoladi. Kirishma atomlar (marganets, rux, oltingugurt, nikel, selen va boshqa) bilan kompensatsiyalangan kremniyning elektrofizik parametrlari tashqi mexanik kuchlanishning o'zgarishiga o'ta sezgir bo'lgani uchun ular asosida tenzoresiztor va tenzodatchiklarni yaratishda, mexanik kuchlanishlarni o'lchashda va o'rganishda juda katta imkoniyatlar mavjud ekan.

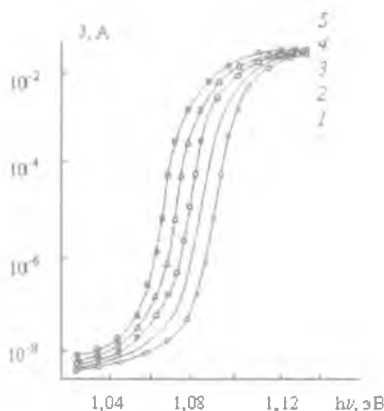
Mexanik kuchlanishni o'lchash uchun [100] kristallografik o'q asosida o'stirilgan va kirishma atomlar bilan kompensatsiyalangan kremniy tanlab olindi. Tenzodatchik uchun xona haroratida ($T=300K$)

solishtirma qarshiligi $\rho=10^3 \div 10^5$ Om·sm bo'lgan material olindi. Kompensatsiyalangan kremniy namunalari parallelepiped shakliga keltirilib, mexanik bosimni sezuvchi korpusga joylashtirildi. Bir o'qli bosim (BO'B) qiymatini $P=0 \div 8 \cdot 10^8$ Pa oralig'ida o'zgartirganda materialning solishtirma qarshiligi 10 marotabagacha kamayishi kuzatildi (12.3-rasm). Rasmdan ko'rinadiki, tenzorezistiv effekt kompensatsiyalangan kremniy materialining solishtirma qarshiligi ortishi bilan ortib borar ekan.

Bir o'qli bosim qiymatining $P=8 \cdot 10^8$ Pa gacha ortishida materialning solishtirma qarshiligi chiziqli kamayib bordi. Kompensatsiyalangan kremniydagi fotoo'tkazuvchanlik holatiga bir o'qli bosim ta'sir ettirilganda, fotoo'tkazuvchanlik qiymatining $K = \frac{\Delta f}{\Delta f_0} = 10^4 \div 10^{10}$ gacha o'zgarishi kuzatildi. Bunday sezgirlik hozirda mavjud bo'lgan biror-bir tenzodatchiklarda kuzatilmagan. Shu sababli, kompensatsiyalangan kremniyda bir o'qli bosim qiymatining $P=10^5 \div 8 \cdot 10^8$ Pa gacha o'zgartirib, fotoo'tkazuvchanlikning qizil chegarasini 0,72eV dan 0,42eV gacha siljitish mumkinligi ko'rsatib berildi (12.4-rasm).



12.3-rasm. Kompensatsiyalangan kremniyda tenzorezistiv effekt = 77
K. 1—KDB-4; 2— 10^3 Om·sm; 3— 10^4 Om·sm; 4— 10^5 Om·sm



**12.4-rasm. Kompensatsiyalangan kremniyda bir o‘qli bosim ta’sirida fotoo‘tkazuvchanlikni spektral bog‘lanishi $T=80K$. $\{J/X/[100]\}$:
 1- $X=10^5 Pa$, 2- $X=2 \cdot 10^8 Pa$, 3- $X=4 \cdot 10^8 Pa$, 4- $X=6 \cdot 10^8 Pa$, 5- $X=8 \cdot 10^8 Pa$**

Kompensatsiyalangan kremniyda fotoo‘tkazuvchanlik holatini yuzaga keltirib, so‘ngra bir o‘qli bosim ta’sir ettirilsa, tenzosezgirlik bir necha darajada oshib ketdi. Tenzodatchik sifatida [100] kristall o‘qi asosida o‘stirilgan kremniy materialni tanlashga asosiy sabab bu kristall o‘qi asosida o‘stirilgan va kirishma atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniyning tenzosezgirligi boshqa [111] va [110] kristall o‘q asosida o‘stirilgan va kompensatsiyalangan kremniy materialidan ancha kattaligidir. Kompensatsiyalangan kremniy asosida yaratilishi taklif etilgan tenzodatchiklarda bir o‘qli bosimning ta’sir etish yo‘nalishi namunaga qo‘yilgan tok yo‘nalishi bilan parallel holda amalga oshirildi (J/P).

12.6. Kompensatsiyalangan kremniy asosidagi qattiq jism generatorlari

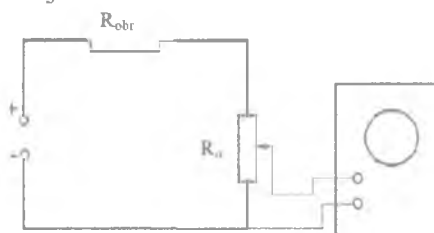
Yarimo‘tkazgich materiallari asosida qattiq jism generatorlarini yaratish ko‘plab olim va mutaxassislar tomonidan taklif qilingan bo‘lsa-da, hozirgacha keng harorat oralig‘ida parametrlari oson boshqariladigan generatorlar yarimo‘tkazgich materiallari asosida

yaratilmagan. Bunga asosiy sabab, yarimo^otkazgich materiallar va strukturalarda kuzatilgan avtotebranishlarning parametrlari turg'un bo'lmisligi hamda bunday materiallarni olish texnologiyasining murakkab va katta energiya talab qilishidir.

Elektronikada past va tovush chastotali avtotebranishlarni hosil qilishda RC – generatorlaridan keng foydalaniladi. Bunday generatorlarning o'lchami katta bo'lib, murakkab elektr tizimidan tashkil topadi hamda 10^{-2} Gs chastotadan kichik chastotalarni olishda imkoniyat cheklangan.

Kompensatsiyalangan kremniy asosidagi qattiq jism generatorlari yaratilish texnologiyasining sodda va arzonligi bilan ajralib turadi. Bu generatorlarda hosil qilingan avtotebranishlarning shakli va parametrlari (amplituda va chastota) oson boshqarilishi bilan mavjudlaridan ajralib turadi.

Kompensatsiyalangan kremniyda avtotebranishlar keng harorat oralig'ida $T=77\div350\text{K}$, chastotasi $f=10^{-3}\div10^5\text{Gs}$ qiymatida kuzatilgan bo'lib, bu birgina materialda termodinamik shart-sharoitlarni boshqarib (harorat, elektr va magnit maydon kuchlanganligi, yoritilganlik), turli tabiatdagi avtotebranishlarni olish imkoni mavjudligidir. Taklif etilgan qattiq jisimli generatorlarning chastotasini $f=10^{-3}\div10^5\text{Gs}$ oralig'ida oson boshqarib, amplituda qiymatini $I=10^{-5}\div1\text{ A}$ gacha olish mumkin. Bunda tebranishlar modulyasiyasining chuqurligi $\sim 100\%$ gi bilan ajralib turdi.



12.5-rasm. Kompensatsiyalangan kremniy asosidagi qattiq jism generatorining elektr sxemasi

12.5-rasmda kompensatsiyalangan kremniy asosida yaratilishi taklif etilgan qattiq jism generatorining elektr tizimi berildi. Rasmdan ko'rinadiki, qattiq jism generatori kompensatsiyalangan kremniy

materialiga ketma-ket ulangan R_{yul} – yuklama qarshiligi va tashqi elektr manbasidan iborat.

Kompensatsiyalangan kremniyga qo'yilgan tashqi elektr kuchlanish maydonini boshqarib, turli ko'rinishdagi garmonik, cho'qqisimon impulsli va murakkab shakldagi avtotebranishlarni hosil qilish mumkin. Taklif etilgan kompensatsiyalangan kremniy asosidagi qattiq jism generatorining geometrik o'lchami $2 \times 2 \times 0.5 \text{ mm}^3$ ni tashkil etdi. 11.2-jadvalda kompensatsiyalangan kremniy materiali asosida laboratoriya sharoitida yaratilgan qattiq jism generatorlari parametrlari haqidagi ma'lumotlar berildi.

Qattiq jism generatorlarining asosi bo'lgan kremniy materialini kirishma atomlar bilan kompensatsiyalash darajasini, kirishma atomning turini, materialning solishtirma qarshiligi va o'tkazuvchanlik turini boshqarib, amaliyotda qo'llash uchun eng qulay bo'lgan amplituda, chastota va avtotebranish shaklini hosil qilish va tanlash imkoniyatlari ekan.

Qattiq jisimli generatorlaridan texnikaning turli sohalarida, optoelektronikada, elektromagnit va radiosignallarni hosil qilishda keng foydalanish mumkin. Bunday generatorlar oson boshqarilishi, kam energiya talab qiluvchi yaratish texnologiyasi bilan mavjudlaridan keskin farq qiladi. Amaliyotda avtotebranishlarni hosil qilish uchun elektr tizimida, albatta, teskari bog'lanishning bo'lishi talab etiladi. Taklif etilgan qattiq jism generatorlarida teskari bog'lanish tizimi bo'lishining zaruriyati yo'q. Chunki bunday generatorlar yaxlit bir yarimo'tkazgich kremniy asosida yaratiladi. Kompensatsiyalangan kremniy asosida yaratiladigan qattiq jism generatori ixtirosiga bir necha mualliflik va patentlik guvohnomalari olingan.

12.7. Kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan avtotebranishlar asosida fizik kattaliklarni o'lchovchi tubdan yangi funksional datchiklar

Kompensatsiyalangan kremniy asosida kuzatilgan avtotebranishlarni har tomonlama o'rganish asosida nafaqat qattiq jism generatorlarini yaratish mumkinligi, balki tashqi fizik

kattaliklarning o'zgarishiga o'ta sezgir bo'lgan yangi turdagi funksional datchiklarni yaratish mumkinligi ko'rsatib berildi. 12.1-jadvalda kompensatsiyalangan kremniy materiali asosida yaratilgan amplituda va chastotali chiqishga ega bo'lgan harorat o'lchash datchigining ishlash parametrlari haqida ma'lumot berildi.

12.1-jadval

T, K	E, V/sm	f, Gs	I, A	T, K	E, V/sm	f, Gs	I, A
77	550	$2 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-1}$	250	80	600	$1 \cdot 10^{-3}$
130	350	$5 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$	270	70	1700	$6 \cdot 10^{-4}$
160	260	$2 \cdot 10^{-1}$	$7 \cdot 10^{-2}$	280	60	2600	$8 \cdot 10^{-5}$
180	150	20	$1 \cdot 10^{-2}$	300	50	3250	$1 \cdot 10^{-4}$
210	100	60	$4 \cdot 10^{-3}$	320	40	4200	$2 \cdot 10^{-4}$

Jadvaldan ko'rinadiki, harorat $T=77 \div 350\text{K}$ oralig'ida o'zgarishiga mos ravishda avtotebranishning chastotasi $f=2 \cdot 10^{-3}\text{Gs}$ dan $f=4,2 \cdot 10^3\text{Gs}$ gacha, amplituda qiymati $I=2,8 \cdot 10^{-1} \div 2 \cdot 10^{-4}\text{A}$ oralig'ida o'zgarar ekan. Bu degani, harorat $\Delta T=273\text{K}$ oraliqda o'zgarishi avtotebranish chastotasining qiymatini 10^6 , amplitudasini 10^4 o'zgarishiga olib keladi. Harorat o'zgarishiga bunday o'tasezgir yarimo'tkazgich datchiklar shu davrgacha mavjud bo'lmagan.

Xuddi shuningdek, oddiy yarimo'tkazgich magnit datchiklar ham materialning solishtirma qarshiligi magnit maydon ta'sirida o'zgarishiga asoslangan. Bunday magnit datchiklarda magnit maydon kuchlanganligining $H=0 \div 25\text{kEr}$ oralig'ida o'zgarishida magnit sezgirlik $1 \div 10\%$ ni tashkil etdi.

Kompensatsiyalangan kremniydagi avtotebranish parametrlariga (amplituda, chastota) magnit maydon kuchlanganligining ta'siri o'rganilganda, parametrlarning magnit maydon kuchlanganligi ta'siriga o'ta sezgirliги aniqlandi. Tajriba natijalari asosida magnit maydon kuchlanganligining qiymati $H=0 \div 25\text{kEr}$ oralig'ida o'zgarganida avtotebranish amplitudasi 18 marta, chastota 180% ga o'zgarishi aniqlandi. Bunda, magnit maydon kuchlanganligining yo'nalishi materialdan o'tayotgan tok oqimining yo'nalishiga parallel va perpendikulyar qilib olinganda ham avtotebranish parametrlarining magnit sezgirliги deyarli bir xil bo'ldi.

Avtotebranishlar asosida yaratilishi mumkin bo'lgan yana bir funksional datchik bir o'qli bosimni sezuvchi tenzodatchik bo'lib, bunda ham bir o'qli bosim qiymati o'zgarishi avtotebranish amplitudasi va chastotasining qiymatiga kuchli ta'sir etishi aniqlandi. Bunday tenzodatchiklarning yana bir ahamiyati shundaki, kompensatsiyalangan kremniy materialining o'stirilgan kristall o'qiga bog'liq tenzosezgirlik ham turlicha bo'lar ekan. Boshlang'ich kremniy materiali kristall o'q [111],[110],[100] yo'nalishlarda tanlab olindi va kirishma atomlar bilan kompensatsiyalanadi. Kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan avtotebranishlarni parametrlariga tashqi ta'sirlarni har tomonlama o'rganishlar asosida, fizik kattaliklarni o'lchashda ishlashi jihatidan tubdan yangi bo'lgan datchiklarni yaratish imkoniyatlari ochib berildi. Bunday datchiklarda ma'lumotlar amplituda – chastotali signal chiqishiga ega bo'lib, ulardan axborotlarni uzoq masofalarga uzatishda, xotira qurilmalarida saqlashda samarali foydalanish mumkin ekan.

12.2-jadvalda kompensatsiyalangan kremniy materialida kuzatilgan avtotebranishlar asosida yaratish taklif etiladigan datchiklar sezgirliги haqida ma'lumotlar keltirilgan. Bunday datchiklar o'tasezgirliги va tezkorliги bilan yarimo'tkazgich materiallar asosidagi mavjud datchiklardan ustunliги aniqlandi.

12.2-jadval

Qo'llanish sohasi	Parametrlarning sezgirlik darajasi			
	Chegaraviy elektr maydon bo'yicha	Chegaraviy chastota	Tebranish amplitudasi	Tebranish chastotasi
Termodatchik	$-(2\div5) \text{ V/sm K}$	$(2\div4) 10^2 \text{ Gs/K}$	$(2\div5) \cdot 10^{-6} \text{ A/K}$	$(2\div4) \cdot 10^2 \text{ Gs/K}$
Fotodatchik	$-(4\div6) \text{ V/sm} \cdot \text{lk}$	$(3\div5) 10^2 \text{ Gs/lk}$	$(3\div5) \cdot 10^{-6} \text{ A/lk}$	$(3\div5) \text{ Gs/lk}$
Tenzodatchik	$-(3\div5) \cdot 10^{-8} \text{ V/sm Pa}$	$(2\div5) 10^{-8} \text{ Gs/Pa}$	$(2\div5) \cdot 10^{-10} \text{ A/Pa}$	$(1\div3) \cdot 10^{-5} \text{ Gs/Pa}$
Magnitodatchik	$-(2\div5) \cdot 10^{-3} \text{ V/sm Er}$	$(5\div6) 10^{-3} \text{ Gs/Er}$	$(5\div7) \cdot 10^{-11} \text{ A/Er}$	$(3\div5) \cdot 10^{-2} \text{ Gs/Er}$

ILOVALAR

1-jadval

Mendeleyev davriy jadvalidagi asosiy yarimo'tkazgichli elementlar

Davrlar	Guruhlar						
	II	III	IV	V	VI	VII	
II	⁴ Be	⁵ B	⁶ C	⁷ N	⁸ O		
III		¹³ Al	¹⁴ Si	¹⁵ P	¹⁶ S	¹⁷ Cl	
IV		³¹ Ga	³² Ge	³³ As	³⁴ Se	³⁵ Br	
V		⁴⁹ In	⁵⁰ Sn	⁵¹ Sb	⁵² Te	⁵³ J	⁵⁴ Xe
VI			⁸² Pb	⁸³ Bi	⁸⁴ Po	⁸⁵ At	

2-jadval

Kremniyning asosiy parametrlari

Kattalik nomi	Qiymati	Kattalik nomi	Qiymati
Panjara doimiysi ($\text{\AA}=10^{-8} \text{ sm}$)	5,43095	Elektron holatlar zichligi (sm^{-3})	$2,8 \cdot 10^{10}$
Kimyoviy bog'lanish	Kovalent bog'lanish	Kovak holatlar zichligi (sm^{-3})	$1,02 \cdot 10^{16}$
Tuzilish sturukturasi	To'g'ri bog'lanmagan	T=300 K dagi xususiy o'tkazuvchanlik (sm^{-1})	$4,3 \cdot 10^{-8}$
Kristall panjarasi	Olmos kristall panjarasi	T=300 K dagi xususiy konsentratsiya (sm^{-3})	$1,5 \cdot 10^{10}$
Taqqiqlangan soha kengligi (eV)	1,12	Asosiy donorli kirishma N_d	P, As, Sb
E_g ni T ga bog'liqligi ($\alpha, 10^{-4} \text{ eV/grad}$)	-4	Asosiy akseptorli kirishma (N_a)	B, Al, Ga
T=300 K dagi elektronlarning harakatchanligi ($\text{sm}^2/\text{v}\cdot\text{s}$)	1500	Erish harorati ($^{\circ}\text{C}$)	1415
T=300 K dagi kovaklarning harakatchanligi ($\text{sm}^2/\text{v}\cdot\text{s}$)	450		

3-jadval

*Ge va Si ga kiritilgan kirishma elementlarining
hosil qilgan energetik sathlari*

Akseptorli kirishma					
Element	Kirishmalarning energetik sathi (eV)				
	<i>B</i>	<i>Al</i>	<i>Ga</i>	<i>In</i>	<i>Ti</i>
<i>Ge</i>	$E_v+0,0104$	$E_v+0,0102$	$E_v+0,0108$	$E_v+0,012$	$E_v+0,010$
<i>Si</i>	$E_v+0,044$	$E_v+0,069$	$E_v+0,079$	$E_v+0,155$	$E_v+0,26$
Donorli kirishma					
Element	Kirishmalarning energetik sathi (eV)				
	<i>P</i>	<i>As</i>	<i>Bi</i>	<i>Sb</i>	<i>Li</i>
<i>Ge</i>	$E_c-0,012$	$E_c-0,127$	$E_c-0,069$	$E_c-0,0066$	$E_c-0,0093$
<i>Si</i>	$E_c-0,044$	$E_c-0,049$	$E_c-0,069$	$E_c-0,039$	$E_c-0,033$

4-jadval

SiO₂ va Si₃N₄ ning T=300 K dagi xossalari

Dielektriklar	SiO ₂	Si ₃ N ₄
Strukturasi	Amorf holat	Amorf holat
Erish harorati ($^{\circ}\text{C}$)	1600	-
Zichligi (g/sm^3)	2,2	3,1
Yorug'lik singdiruvchanligi	1,46	2,05
Dielektrik doimiysi	3,9	7,5
Dielektrik mustahkamligi (V/sm)	10^7	10^7
IQ nurlanishning yutilish chegarasi (μm)	9,3	11,5-12,0
Taqiqlangan soha kengligi (eV)	9	5,0
Issiqlik kengayish koeffitsiyenti ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	$5 \cdot 10^{-7}$	-
Issiqliko'tkazuvchanligi ($\text{W}/\text{sm} \cdot \text{K}$)	0,014	-

Solishtirma qarshiligi (Ω sm):		
25 °C haroratda	10^{14} - 10^{16}	10^{14}
500 °C haroratda	-	$2 \cdot 10^{13}$
HF da yemirilish tezligi ($\text{\AA}/\text{min}$) °C	1000	5-10

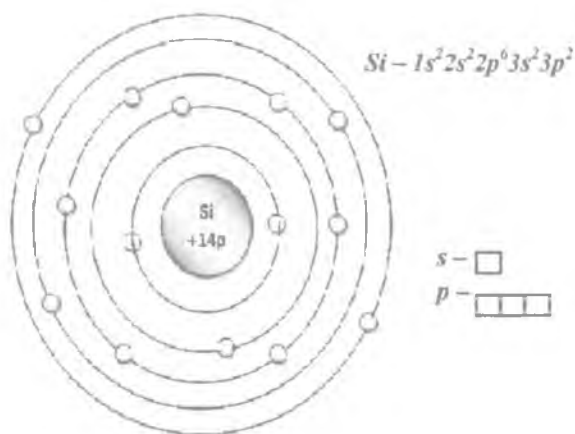
5-jadval

SiO₂ va Si₃N₄ qatlamlarining rangi qalinligiga bog'liqligi

Tartibi	Ranglar	SiO ₂ ning qalinlik oralig'i	Si ₃ N ₄ ning qalinlik oralig'i
i	Metall rang	0-0,027	0-0,020
	Jigarrang	0,027-0,053	0,020-0,040
	Zarg'aldoq	0,053-0,073	0,040-0,055
	Qizil	0,073-0,097	0,055-0,073
	Tim havorang	0,097-0,10	0,073-0,077
	Havorang	0,10-0,12	0,077-0,093
	Och havorang	0,12-0,13	0,093-0,10
	Juda och havorang	0,13-0,15	0,10-0,11
	Metall rang	0,15-0,16	0,11-0,12
	Ravshan sariq	0,16-0,17	0,12-0,13
	Sariq	0,17-0,20	0,13-0,15
	Och qizil	0,20-0,24	0,15-0,18
1	Qizil	0,24-0,25	0,18-0,19
	Tim qizil	0,25-0,28	0,19-0,21
2	Havorang	0,28-0,31	0,21-0,23
	Och havorang	0,31-0,33	0,23-0,25
	Juda och havorang	0,33-0,37	0,25-0,28
	Metall rang	0,37-0,40	0,28-0,30
2	Qizil	0,40-0,44	0,30-0,33

*Metall n – turdagi Si silidsidining potensial to'siq balandligi
va ularning termodinamik parametrlari*

Metall silidsidi	Φ_B , V	Silidsid strukturasi	Olish harorati (°C)	Erish harorati (°C)
CoSi	0,68	Kubik	400	1460
CoSi ₂	0,64	Kubik	450	1326
CrSi ₂	0,57	Geksoganal	450	1475
HfSi	0,53	Trigonal	550	2200
IrSi	0,93		300	-
MnSi	0,76	Kubik	400	1275
Mn ₁₁ Si ₁₉	0,72	Tetragonal	800a	1145
MoSi ₂	0,55	Tetragonal	1000a	1980
Ni ₂ Si	0,7-0,75	Trigonal	200	1318
NiSi	0,66-0,75	Trigonal	400	992
NiSi ₂	0,7	Kubik	800a	993
Pd ₂ Si	0,72-0,75	Geksoganal	200	1330
PtSi	0,84	Trigonal	300	1229
RhSi	0,69	Kubik	300	-
TaSi	0,59	Geksoganal	750a	2200
TiSi ₂	0,60	Trigonal	650	1540
WSi ₂	0,65	Tetragonal	650	2150
ZrSi ₂	0,55	Trigonal	600	1520



7-jadval

kT ning haroratga bog'liqligi

T, K	kT, eV	T, K	kT, eV	T, K	kT, eV	T, K	kT, eV
250	0,0215	600	0,0516	950	0,0817	1300	0,1118
300	0,0258	650	0,0559	1000	0,086	1350	0,1161
350	0,0301	700	0,0602	1050	0,0903	1400	0,1204
400	0,0344	750	0,0645	1100	0,0946	1450	0,1247
450	0,0387	800	0,0688	1150	0,0989	1500	0,1290
500	0,0430	850	0,0731	1200	0,1032	1550	0,1333
550	0,0473	900	0,0774	1250	0,1075	1600	0,1376

Fundamental fizik doimiylar

№	Kattaliklar nomi	Belgilanishi	Son qiymati	SGS	XBS
1	Yorug'likning vakuumdagi tezligi	c	2,997925	10^{10} sm/s	10^8 m/s
2	Elektronning zaryadi	e	1,60219	-	10^{-19} c
			4,803250	10^{-10} sgs	-
3	Elektronning tinchlikdagi massasi	m_0	9,10956	10^{-28} g	10^{-31} kg
4	Protonning tinchlikdagi massasi	m_p	1,67261	10^{-24} g	10^{-27} kg
5	Neytronning tinchlikdagi massasi	m_n	1,674920	10^{-24} g	10^{-27} kg
6	Plank doimiysi	h	6,62620	10^{-27} erg s	10^{-34} J sek
		$\hbar = h/2\pi$	1,05459	10^{-27} erg s	10^{-34} J-sek
7	Boltsman doimiysi	k_B	1,38062	10^{-16} erg/K	10^{-23} J/K
8	Bor radiusi [$h^2/(m_0e^2)$]	a_B	5,29177	10^{-9} sm	10^{-11} m
9	Ridberg doimiysi [$m_0e^4/(2h^2)$]	R_y	2,17991	10^{-11} erg	10^{-18} J
10	Elektronning radiusi	r_e	2,81794	10^{-13} sm	10^{-15} m
11	(hc/e^2)	$1/a$	137,036	-	-
12	Kvant magnit oqimi (hc/e)	F_0	4,135708	10^{-7} gs sm^2	10^{-15} Vb
Foton energiyasi					
1	1 elektron volt	eV	1,60219	10^{-12} erg	10^{-19} J
2	$eV \cdot h$		2,41797	10^{14} gs	10^{14} gs
3	$eV/(hc)$ (to'liqin xossasi)		8,06546	10^5 sm^{-1}	10^5 m^{-1}
4	$eV/(k_B)$		1,16048	10^4 K	10^4 K
5	Vakuumda dielektrik o'tkazuvchanlik	ϵ_0	8,854		10^{-12} m

Elektr birliklar

№	Nomi	Birligi	Son qiymati	Son qiymati	Birligi
1	Zaryad miqdori	Kulon (C)	$3 \cdot 10^9$	$1/3 \cdot 10^{-9}$	statkulon
2	Elektr toki	Amper (A)	$3 \cdot 10^9$	$1/3 \cdot 10^{-9}$	statamper
3	Elektr maydondagi nuqtaning potentsiali	Volt (V)	1/300	300	statvolt
4	Qutblanish	Kulon/metr ²	$3 \cdot 10^5$	$1/3 \cdot 10^{-5}$	statkulon/sm ²
5	O'tkazuvchanlik	Sim	$9 \cdot 10^{11}$	$1/9 \cdot 10^{-11}$	statsim
6	Qarshilik	Om (Ω)	$1/9 \cdot 10^{11}$	$1/9 \cdot 10^{11}$	statom
7	Sig'im	Farada (F)	$1/9 \cdot 10^{11}$	$1/9 \cdot 10^{-11}$	statfarada
Magnit birliklar					
1	Magnit oqimi	Veber (Vb)	10^8	10^{-8}	maksvel [gs sm ²]
2	Magnit induksiyasi	Tesla (Ts)	10^4	10^{-4}	gs

Fizikadagi asosiy birliklar

№	Kattaliklar nomi	XBS dagi asosiy birliklar	O'zgartirish		SGS
1	Uzunlik	Metr (m)	10^2	10^{-2}	santimetr (sm)
2	Og'irlik	Kilogramm (kg)	10^3	10^{-3}	gramm (g)
3	Vaqt	Sekund (sek)	1	1	sekund (sek)
4	Kuch	Nyuton (N)	10^5	10^{-5}	$\text{g sm}/(\text{sek})^2$
5	Energiya	Joul (J)	10^7	10^{-7}	erg
6	Quvvat	Vatt (Vt)	10^7	10^{-7}	erg/sek
7	Bosim	Paskal (Pa)	10	10^{-1}	
8	Chastota	Gers (gs)	1	1	

*Yarimo'tkazgich elementlarida tok tashuvchi zaryadlarning
 $T=300\text{ K}$ haroratdagi harakatchanlik qiymati ($\text{sm}^2/\text{v}\cdot\text{sek}$)*

Element	μ_n $\text{sm}^2/(\text{V}\cdot\text{sek})$	μ_p $\text{sm}^2/(\text{V}\cdot\text{sek})$	Element	μ_n $\text{sm}^2/(\text{V}\cdot\text{sek})$	μ_p $\text{sm}^2/(\text{V}\cdot\text{sek})$
<i>Olmos</i>	900-3900	1200-4800	<i>CdSb</i>	360-660	300-700
<i>Ge</i>	3600-3900	1700-1900	<i>CdS</i>	200	-

<i>Si</i>	1200-1900	350-500	<i>CdSe</i>	500	-
<i>Te</i>	910	570	<i>CdTe</i>	800	100
<i>NaCl</i>	250 (84 K)	-	<i>HgTe</i>	16000	16000
<i>KCl</i>	100 (90 K); 3	-	<i>AlSb</i>	50-200	100-200
<i>KBr</i>	110 (84 K); 12,5	-	<i>GaP</i>	-	17
<i>KJ</i>	155 (84 K)	2-6	<i>GaAs</i>	2000-6800	200-680
<i>AgCl</i>	300 (85 K); 50-70	40	<i>GaSb</i>	2500-5000	400-1000
<i>AgBr</i>	240	-	<i>InP</i>	3400-5000	50-700
<i>Cs₂Sb</i>	500	10	<i>InAs</i>	20000-30000	100-240
<i>MgO</i>	-	2	<i>InSb</i>	65000-80000	700-4000
<i>ZnO</i>	180	-	<i>InSe</i>	900	-
<i>BaO</i>	3-9	-	<i>In₂Se₃</i>	30	-
<i>Mg₂Ge</i>	500	100	<i>PbS</i>	600	250-800
<i>Mg₂Si</i>	400	70	<i>PbSe</i>	1200-1400	500-1400
<i>Mg₂Sn</i>	200-300	150-200	<i>PbTe</i>	1200-2100	750-870
<i>Mg₂Sb₂</i>	-	100	<i>AgFeSe₂</i>	>250	70
<i>ZnSb</i>	-	300	<i>AgFeTe₂</i>	>2000	150

Yarimo 'tkazgichlar fizikasidagi atamalar

O'zbekcha	Ruscha	Englizcha
Ajratmoq	Разделять	Uncouple
Alohida atom	Изолированный атом	Atom isolated
Amplituda	Амплитуда	Amplitude
Amplituda qiymati	Амплитудное значение	Value crest
Ampula	Ампула	Ampoule
Aralashma	Примесь	Admixture, Intermixture
Aralashma atomi	Атом примеси	Atom foreign
Aralashmali yutilish	Примесное поглощение	Impurity absorb
Aralashtirish, aralashma	Смешивание, смесь	Mix
Aralashtirmoq	Смешивать	Interfuse
Ariqcha	Канавка	Gash
Asbob	Инструмент	Tool
Asos	Основание	Infrastructure
Asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchi	Неосновной носитель заряда	Minority
Asosiy kattalik	Основная величина	Quantity fundamental
Atom nomeri	Атомный номер	Number atomic
Avtomatik	Автоматический	Unmanned
Aynamagan	Невырожденный	Nonsingular
Birjinsli	Однородный	Inndiscreate
Birjinsli bo'lmagan	Неоднородный	Inhomogeneous
Birjinsli maydon	Однородное поле	Field uniform
Bo'linish sirti	Поверхность раздела	Interface
Bog'lanish	Связь	Bond
Bog'lanish energiyasi	Энергия связи	Energy binding (bond)
Bog'liqlik	Зависимость	Dependence
Bosim datchigi	Датчик давления	Transducer pressure
Bug', bug'lar	Пар, пары	Vaper
Bug'lanish	Испарение	Evaporation, Transpiration
Chastotali tavsif	Частотная характеристика	Resistance band-pass
Chegara sirti	Поверхность раздела	Boundary
Chiqarmoq	Испускать	Emit

Chiqish ishi	Работа выхода	Function work
Cho'ktirilgan	Погруженный	Immersed
Diffuzion nasos	Диффузионный насос	Pump diffusion
Diffuziya uzunligi	Диффузионная длина	Length diffusion
Diffuziyalamoq	Диффундировать	Diffuse
Distillyator	Дистиллятор	Finestiller
Doimiy tok	Постоянный ток	Current direct
Don	Зерно	Granule
Donor sathi	Донорный уровень	Level donor
Dyuar idishi	Сосуд дьюара	Vessel dewar
Effektiv qiymat	Эффективное значение	Value effective
Ekstremum	Экстремум	Value extreme
Elektr maydon kuchlanganligi	Напряженность электрического поля	Intensity electric
Elektron (kovak)ning effektiv massasi	Эффективная масса электрона (дырки)	Mass effective electron (hole)
Elektron o'tkazuvchanlik	Электронная проводимость	Admittance electronic
Elektron sathi	Электронный уровень	Level electronic
Elektron-kovak jufti	Электронно-дырочная пара	Pair electron-hole
Element, bo'lak	Элемент	Cell
Epitaksial qatlam	Эпитаксиальная пленка	Film epitaxial
Erkin zaryad	Свободный заряд	Charge free
Fermi sathi	Уровень Ферми	Level fermi
Fotoelektrik yutilish	Фотоэлектрическое поглощение	Absorption photoelectric
Fotoo'tkazgich	Фотопроводник	Photoconductor
Fotoo'tkazuvchanlik	Фотопроводимость	Photoconduction
Fotoqarshilik	Фоторезистор	Cell photoconductive
Fototok	Фототок	Photocurrent
G'adir-budur, qo'pol	Шероховатый, грубый	Rugged
G'ovak	Пора	Pore
Gaz	Газ	Gas
Gelio qurilmasi	Гелиоустановка	Solar power plant
Generatsiya tezligi	Скорость генераций	Rate generation, Velocity generation
Grafik	График	Plot
Had, energiyaviy sath	Член, энергетический уровень	Term

Hajm	Объём	Volume
Hajm birligida	В единице объёма	Volume in unit
Harakat, amal, ish	Операция	Job
Harakat, ko'chish	Движение, перемещение	Movement
Harakatchanlik	Подвижность	Mobility
Xavfsiz	Безопасный	Safe
Hisob-kitob	Расчет	Estimation
Hodisa	Явление	Phenomenon
Idish	Сосуд	Vessel
Inert, sekin	Инертный	Passive
Infragizil yorug'lik	Инфракрасный свет	Light infrared
Ionlash	Ионизация	Ionization
Ishchi harorat	Рабочая температура	Temperature operating
Ishlash	Обработка	Treatment
Ishlov berilmagan	Необработанный	Uncured, Unprocessed
Isitgich	Подогреватель	Preheat
Issiqlikka chidamli	Теплостойкий	Heat-resistant
Izolyatsiya	Изоляция	Insulation
Jadval qiymat	Табличное значение	Value tabulated
Jilvirlash	Пшлифование	Abrade
Jo'mrak	Кран, вентиль	Faucet
Joy, kovak	Гнездо	Jack
Juft son	Четное число	Number even
Kam legirlangan	Малолегированный	Low-alloy
Kambag'allashgan qatlam	Обедненный слой	Layer depletion
Kambag'allashgan soha	Обедненная область	Reflection depletion
Kamera, xona	Камера	Chamber
Kezish, ko'chish	Миграция, перенос	Migration
Kimyoviy yedirgich	Травитель	Etchant
Kimyoviy yedirish	Химическое травление	Etching chemical
Kimyoviy yuvish	Травить, химическая травления	Etch
Kirishma sathi	Примесный уровень	Level impurity
Kirishma zonasi	Примесная зона	Zone extrinsic, Zone impurity
Kirishmali markaz	Примесный центр	Center impurity
Kirishmasiz	Беспримесный	Uncontaminated
Kiritmoq	Внедрять	Implant

Ko'chirish hodisasi	Явления переноса	Phenomena transport
Ko'paytirish, kuchaytirish	Умножение, увеличение, усилитель	Multiplication
Ko'rinuvchi yorug'lik	Видимый свет	Light visible
Ko'rsatish	Показание	Score
Konsentratsiya	Концентрация	Concentration
Kontakt (ulanish) joyi	Контактное гнездо	Jack pin
Kontakt potensial farqi	Контактная разница потенциалов	Difference contact
Kovak	Дырка	Hole
Kavshar, kavsharlamog	Припой, запаивать	Solder
Kavsharlagich	Паяльник	Tool soldering
Kremniy	Кремний	Silicium
Kuchaytirgich	Усилитель	Intensifier
Kuchaytirish	Усиление	Amplification, Enhancement
Kuchlanish	Напряжение	Voltage
Kukun, chang	Порошок, пыль	Dust
Kuydirish yoki quritish pechi	Печь для обжига или сушки	Kiln
Kuydirish, qizdirish	Обжиг	Kilning
Kuydirmog	Отжигать	Anneal
Kuzatish	Наблюдение	Observation
Lyuksmetr	Люксметр	Illuminometer
Magnit maydon kuchlanganligi	Напряженность магнитного поля	Intensity magnetic
Massa soni	Массовое число	Number nucleon
Misol, namuna	Пример, образец	Example
Mm. Simob ustuni	Миллиметр ртутного столба	Millimeter of mercury
Model, shakl, nazariya	Модель, теория	Model
Monokristall	Монокристалл	Crystal single
Moydan tozalamoq	Обезжиривать	Degrease
Muntazam emas	Нерегулярный	Nonregular
n - n turdagi o'tish	Переход типа $n^+ - n$	Junction $n^+ - n$
Namlik	Влажность	Humidify
Namuna, sinash	Образец, проба	Sample
Namuna, tur	Образец, тип	Exponent
Nazoratdagi namuna	Контрольный образец	Sample check
Nodir element	Редкоземельный элемент	Rare-earth element

Nomonoton	Немонотонный	Nonmonotonic
<i>n-p-n</i> (<i>p-n-p</i>) turdagi tranzistor	Транзистор типа <i>n-p-n</i> (<i>p-n-p</i>)	Transistor <i>n-p-n</i> (<i>p-n-p</i>)
Nur chiqarish, nurlantirish	Лучеиспускание, облучение	Irradiation
Nurlanish	Излучение	Emittance, Radiation
Nurlantirishsiz	Безызлучательный	Nonradiative
O'rtacha yashash vaqti	Среднее время жизни	Life average
O'sish	Рост	Growth
O'sish markazi (kristallning)	Затравка	Etch flat
O'sish markazi	Затравка (центр роста)	Crystal seed, Seed
O'sish markazi	Затравка	Nucleator
O'stirish	Выращивание	Growing
O'ta yuqori vakuum	Сверхвысоковакуум	Ultra-vacuum
O'tkazuvchanlik elektroni	Электрон проводимости	Electron conduction
O'tkazuvchanlik sohasi	Зона проводимости	Band conduction
O'tkazuvchanlik sohasining tubi	Дно зоны проводимости	Bottom of conduction band
O'zaro ta'sirlashmoq	Взаимодействовать	Interact
O'zgaruvchan tok	Переменный ток	Current alternating
O'zi yozgich	Самописец	Self-recorder
O'zi yozuvchi asbob	Самопишущий прибор	Apparatus registering, Instrument recording
Oksidlanmaslik	Неокисляемость	Unoxidizability
Olmoq, hosil qilmoq	Получать	Obtain
Oniy qiymat	Мгновенное значение	Value instantaneus
Oqim	Струя	Jet
Oqish, oqim	Течение, поток	Flow
Oraliq, tirgish	Зазор, промежуток	Gap
Oraliq qatlam	Промежуточный слой	Layer interfacial
Orqaga urish	Отдача	Kickback
Ortiqcha	Избыток	Overbalance
Ortiqcha qizish	Перегрев	Overheat
Panjara	Решетка	Grate
Pasayish vaqti, o'sish vaqti	Время спада, время затухания	Time decay
Past haroratli	Низкотемпературный	Low-temperature
Pastki qatlam	Нижний слой	Underlayer

Paydo qilmoq, o'sish markazlari hosil qilmoq	Зарождать, образовывать зародыш	Nucleate
Payvandlangan	Запаянный	Sealed
p - n o'tish	p - n переход	Boundary p - n , Junction electron-hole
Probirka	Пробирка	Glass test
Qarshilik	Сопротивление	Resistance
Qatlamli	Слоистый	Schistose
Qatlamli, plastinkasimon	Слоистый, пластинчатый	Lamellar
Qattiq jism	Твердое тело	Solid state
Qayta kompensatsiyalash	Перекомпенсировать	Overcompensate
Qayta ulash	Переключение	Keying
Qaytarish, qaytish	Отражение	Reflection
Qisqa tutashuv	Короткое замыкание	Circuit short
Qisqich, qistirish	Зажим, скреплять	Clip
Qiyshayuvchilar oilasi	Семейство кривых	Family of curves
Qizdirgich	Печь	Oven, Furnace
Qizdirish toki	Ток накала	Current filament
Qorishma	Смесь	Interfusion
Qorong'ulik qarshiligi	Темновое сопротивление	Resistance dark
Qorong'ulikdagi tok	Темновой ток	Current dark
Qurilma	Установка	Erection
Qurish kamerasi	Сушильная камера	Baker
Quritish	Высушивать	Desiccate, exiccate
Quritmoq	Сушить	Bake
Quyma blok, chorqirrali bo'lak	Слиток, брусок	Pig
Rezina, kauchuk	Резина, каучук	Rubber
Ruhsat etilgan	Разрешенный	Permitted
Ruhsat etilgan energiyaviy sath	Разрешенный энергетический уровень	Level permitted energy
Ruhsat etilgan soha	Разрешенная зона	Allowed band
Sakrash	Скачок	Jerk
Saqlagich	Предохранитель	Safeguard
Saqlovchi xalqa	Охранное кольцо	Ring guard
Sath	Уровень	Level
Sayqallash	Полирование	Polish

Sayqallash qurilmasi	Полировальный станок	Machine buffing
Selsiy shkalasi	Шкала Цельсия	Scale Celsius
Shaffof	Прозрачный	Translucent
Shar, bosh, kalla	Шар, головка	Knob
Shkala, masshtab	Шкала, масштаб	Scale
Shovqinlar	Шумы	Hash
Shtrix	Штрих	Hatch
Shunt	Шунт	Resistance shunt
Sig'im	Емкость	Capacitance
Siljish	Смещение	Bias
Siljish, qo'zg'ash	Перемещение, смещение	Displacement
Silliqlash dastgohi	Шлифовальный станок	Machine grinding
Singdiruvchanlik	Проницаемость	Penetrability
So'rib olish	Откачка	Pumping-out
So'ruvchi nasos	Откачивающий насос	Pump dump
Soha	Зона	Band
Soha modeli	Зонная модель	Model band
Sozlash dastasi	Ручка настройки	Knob tuning
Spektrning ko'rinuvchi qismidagi to'lqinlar	Волны видимой части спектра	Optical waves
Ta'minlovchi tok	Ток питания	Current feed
Ta'minot bloki	Блок питания	Unit supply
Ta'sir etmoq	Воздействовать, влиять	Affect
Taglik	Подложка	Back, Undercoat
Taqiqlangan energetik soha	Запрещенная энергетическая зона	Forbidden band
Taqiqlangan soha	Запрещенная область	Forbidden region
Taqiqlangan soha kengligi	Ширина запрещенной зоны	Band gap
Taqiqlangan zona	Запрещенная зона	Forbidden zone
Taqsimlanish ko'effitsiyenti	Коэффициент распределения	Number distribution
Tashlama, tashlash	Сброс	Jettison
Tashuvchi	Носитель	Carrier
Tasma, nafis qatlam	Пленка	Film
Tebranish konturi	Колебательный контур	Circuit oscillating
Tebratmoq	Колебаться	Vacillate
Tekshirilmaydigan	Неконтролируемый	Uncontrolled
Temperatura datchigi	Температурный датчик	Unit transducer temperature-sensing

Termoelement	Термоэлемент	Thermal
Termojuft	Термопара	Pyod, Thermocouple
Tigel qizdirgich	Тигельная печь	Oven crucible
Tigelli eritish	Тигельная плавка	Melting crucibly
To'g'rilagich, ventil	Выпрямитель, вентиль	Rectifier
To'la o'tkazuvchanlik	Полная проводимость	Admittance
To'ldirilgan soha	Заполненная зона	Band filled
Toblash	Закалка	Hardening
Tok kuchi	Сила тока	Intensity current
Tok qoldig'i	Остаточный ток	Aftercurrent
Tok, oqim	Ток, поток	Current
Toluol	Толуол	Toluene
Tozalamoq	Очищать	Refine
Tozalash	Очистка	Fining, Sanding
Tugun, joy	Узел, место	Knot, Site
Tugunlararo diffuziya	Диффузия по междоузлиям	Diffusion interstitial
Tugunlararo joylashgan atom	Внедренный атом по узлам	Atom interstitial
Tutashgan joy, ulangan	Соединение	Join
Tutib olish	Захватывать	Entrap
Uchib o'tish vaqti	Время пролета	Time transit
Ulanish joyi	Спай	Weld
Ulash, payvandlash	Пайка	Soldering
Ushlab olish	Захват	Grip
Ushlab olishni ko'ndalang kesim yuzi	Сечение захвата	Cross-section capture
Ustki qatlamni olib tashlash	Удаление поверхностного слоя	Desurfacing
Uzoq infraqizil soha	Дальняя инфракрасная область	Region far infrared
Uzuq-uzuq	Прерывистость	Jerkiness
Vakuum jo'mrangi	Вакуумный кран	Tap vacuum
Vakuumning buzilishi	Ухудшение вакуума	Loss of vacuum
Valentlik	Валентность	Valency
Volt-amper tavsifi (VAT)	Вольт-амперная характеристика (BAX)	Characteristic current voltage
Xalqa	Кольцо	Ring
Xarakteristika, tavsif	Характеристика	Characteristic
Xoll effekti	Эффект холла	Effect hall

Xoll harakatchanligi	Холловская подвижность	Mobility hall
Xoll potentsiallar farqi	Холловская разность потенциалов	Voltage hall
Xususiy o'tkazuvchanlik	Собственная электропроводность	Conductivity intrinsic
Xususiy yutilish	Собственное поглощение	Intrinsic absorb
Yarimto'liqin	Полуволна	Wave half
Yashash vaqti	Время жизни	Lifetime
Yo'qotishsiz	Без потерь	Zero-loss
Yoritilganlik	Освещенность	Intensity illumination
Yorug'likka sezgirlik	Светочувствительность	Light sensitivity
Yorug'likka sezgir	Светочувствительный	Photosensitive
Yoyilish vaqti	Длительность развертки	Length sweep
Yoyma, yoyilma	Сканирование, развертка	Scan
Yuqori vacuum	Высокий вакуум	Microvac
Yutmoq	Поглощать	Absorb
Yuvib tozalash	Промывание	Wash
Zaryadli holat	Зарядовое состояние	State charge
Zonali eritish	Зонная плавка	Melting zone
П-simon impuls	П-образный импульс	Wave flat-toppede
(potensial) o'ra	(потенциальная) яма	Well

13-jadval

№	10 ning darajasini belgilovchi qo'shimchalar	Belgisi	Son
1.	giga	g	10^9
2.	mega	m	10^6
3.	kilo	k	10^3
4.	santi	s	10^{-2}
5.	milli	m	10^{-3}
6.	mikro	mk	10^{-6}
7.	nano	n	10^{-9}
8.	piko	p	10^{-12}
9.	femto	f	10^{-15}

14-jadval

Ayrim masofalarning qiymatlari

Yerdan Sentavr Proksimasigacha (eng yaqin yo'lduz) bo'lgan masofa	$4,04 \cdot 10^{18} \text{ sm} = 1,31 \text{ parseka (ps)}$
bir parsek	$3,086 \cdot 10^{18} \text{ sm} = 3,26 \text{ yorug'lik yili}$
bir yorug'lik yili	$9,460 \cdot 10^{17} = 0,306 \text{ ps}$
bir astronomik birlik (Yerdan quyoshgacha bo'lgan masofa)	$1,496 \cdot 10^{13} \text{ sm}$
Quyosh radiusi	$6,960 \cdot 10^{10} \text{ sm}$
Yerdan Oygacha bo'lgan masofa	$3,844 \cdot 10^{10} \text{ sm}$
Yer radiusi	$6,378 \cdot 10^8 \text{ sm}$
Natriy sariq chizig'ining to'lqin uzunligi	$5,89 \cdot 10^{-5} \text{ sm}$
bir angstrom (A)	10^{-8} sm
Vodorod atomining radiusi	$5,292 \cdot 10^{-9} \text{ sm}$
Proton radiusi	$1,2 \cdot 10^{-13} \text{ sm}$

15-jadval

Ayrim uzunlik birliklarining metrik sistemadan britaniya sistemasiga o'tish koeffitsiyentlari

1 sm = 0,3937 dyo'm	1 dyo'm = 2,54 sm
1 m = 3,281 fut	1 fut = 30,48 sm
1 km = 0,6214 mil = 3281 fut	1 yard = 5280 fut = 1,609 km

16-jadval

Turli xildagi soatlarning nisbiy aniqligi

No	Soat turlari	1 sekundga xato qilish vaqti	Nisbiy xatoligi
1.	Qum soatlar	1,5 min	10^{-2}
2.	Mayatnikli soat	3 soat	10^{-4}
3.	Kamerton	1 sutkada	10^{-5}
4.	Kvars generatori	3 yilda	10^{-8}
5.	Ammiyakli kvars generatori	30 yilda	10^{-9}
6.	TSeziyli kvars generatori	3 10^4 yilda	10^{-12}
7.	Vodorodli kvars generatori	3 10^6 yilda	10^{-14}

17-jadval

Ayrim muhim obyektlar massalari

№	Obyekt	Massa, g.
1.	Quyosh	$1,991 \cdot 10^{33}$
2.	Yer	$5,977 \cdot 10^{27}$
3.	Oy	$7,35 \cdot 10^{25}$
4.	Protom	$1,672 \cdot 10^{-24}$
5.	Elektron	$9,108 \cdot 10^{-28}$

18-jadval

Ayrim o'ziga xos zichliklar

№	Modda turi	Zichligi, g/ sm ³ .
1.	Yadro moddasi	10^{14}
2.	Quyoshning markazidagi moda	10^2
3.	Qo'rg'oshin	11,3
4.	Alyuminiy	2,7
5.	Suv	1
6.	Havo	10^{-3}
7.	Yuqori (laboratoriya sharoitidagi) vakumdagi modda	10^{-18}
8.	Yulduzlararo fazodagi modda	10^{-24}
9.	Galaktikalararo fazodagi modda	10^{-30}

Radioaktiv yadrolarning yarim yemirilish davri

№	Yadro	Yemirilish turi	Yarim yemirilish davri
1.	Toriy (Th^{232})	α	$1,4 \cdot 10^{10}$ yil
2.	Plutoniý (Pu^{239})	α	100 yil
3.	Uran(U^{229})	α	58 min.
4.	Uglerod (C^{14})	β	5568 yil
5.	Kobalt (Co^{60})	β	5,3 yil
6.	Mis (Cu^{66})	β	5 min.
7.	Kripton (Kr^{94})	β	1,4 sek.

Infraqizil oraliqdagi kvantlar energiyasi

λ , mkm	Kvant energiyasi		
	erg	dj	ev
1	$1.87 \cdot 10^{-12}$	$1.87 \cdot 10^{-19}$	$1.17 \cdot 10^0$
2	$9.35 \cdot 10^{-13}$	$9.35 \cdot 10^{-20}$	$5.87 \cdot 10^{-1}$
3	$6.23 \cdot 10^{-13}$	$6.23 \cdot 10^{-20}$	$3.90 \cdot 10^{-1}$
4	$4.69 \cdot 10^{-13}$	$4.69 \cdot 10^{-20}$	$2.92 \cdot 10^{-1}$

5	$3.74 \cdot 10^{-13}$	$3.74 \cdot 10^{-20}$	$2.34 \cdot 10^{-1}$
6	$3.12 \cdot 10^{-13}$	$3.17 \cdot 10^{-20}$	$1.95 \cdot 10^{-1}$
7	$2.67 \cdot 10^{-13}$	$2.67 \cdot 10^{-20}$	$1.67 \cdot 10^{-1}$
8	$2.34 \cdot 10^{-13}$	$2.34 \cdot 10^{-20}$	$1.46 \cdot 10^{-1}$
9	$2.08 \cdot 10^{-13}$	$2.08 \cdot 10^{-20}$	$1.30 \cdot 10^{-1}$
10	$1.87 \cdot 10^{-13}$	$1.87 \cdot 10^{-20}$	$1.17 \cdot 10^{-1}$
11	$1.70 \cdot 10^{-13}$	$1.70 \cdot 10^{-20}$	$1.06 \cdot 10^{-1}$
12	$1.56 \cdot 10^{-13}$	$1.56 \cdot 10^{-20}$	$9.85 \cdot 10^{-2}$
13	$1.44 \cdot 10^{-13}$	$1.44 \cdot 10^{-20}$	$9.00 \cdot 10^{-2}$
14	$9.35 \cdot 10^{-13}$	$1.33 \cdot 10^{-20}$	$8.35 \cdot 10^{-2}$

Izoh: $1\text{ev} = 1.59 \cdot 10^{-12}$ erg = $1.59 \cdot 10^{-19}$ dj; $1\text{dj} = 6.29 \cdot 10^{18}$ ev.
 Infraqizil oraliqdagi kvantlar energiyasi.

Birlamchi harorat o'zgarma nuqtalari

№ t/r	Muvozanat holatdagi harorat nuqtasi	t, °C(xalqaro standart 1948-y.)	T, °K
1	Kislorodning qaynash nuqtasi	-182.97	90.18
2	Suvning uchta holatlari orasidagi nuqta (yog' bilan suv, suv bilan bug')	+0.01	273.16
3	Suvning qaynash nuqtasi	100	373.15
4	Ruhning qotish nuqtasi*	419.505	692.655
5	Oltingugurtning qotish nuqtasi	444.6	717.75
6	Kumushning qotish nuqtasi	960.8	1233.95
7	Oltinning qotish nuqtasi	1063	1336.15

*Rossiyada Oltingugurtning qotish nuqtasi o'rniga foydalanish tavsiya qilinadi, chunki oltingugurtning qotish nuqtasini aniqlash qiyin.

Qo'shimcha harorat nuqtalari

№ t/r	Muvozanat holati	t, °C (halqaro standart 1948 y.)	T, °K
1	Suyuq geliy va uning bug'i o'rtasidagi muvozanat (geliyning qaynash nuqtasi)	-268.6	4.55
2	Suyuq vodorod va uning bug'i o'rtasidagi muvozanat (vodorodning qaynash nuqtasi)	-252.5	20.65
3	Suyuq neon va uning bug'i o'rtasidagi muvozanat (neonning qaynash harorati)	-246.0	27.15
4	Suyuq azot va uning bug'i o'rtasidagi muvozanat (azotning qaynash nuqtasi)	-195.8	77.35
5	Suyuq havo va uning bug'i o'rtasidagi muvozanat (havoning qaynash nuqtasi)	-193.0	80.15
6	Suyuq argon va uning bug'i o'rtasidagi muvozanat (argonning qaynash nuqtasi)	-185.6	87.55
7	Suyuq kripton va uning bug'i o'rtasidagi muvozanat (kriptonning qaynash nuqtasi)	-152.0	121.15
8	Suyuq ozon va uning bug'i o'rtasidagi muvozanat (ozonning qaynash nuqtasi)	-111.1	162.05
9	Suyuq ksenon va uning bug'i o'rtasidagi muvozanat (ksenonning qaynash nuqtasi)	-108.6	164.55
10	Suyuq radon va uning bug'i o'rtasidagi muvozanat (radonning qaynash nuqtasi)	-62.0	211.15
11	Suyuq efir va uning bug'i o'rtasidagi muvozanat (efirning qaynash	34.6	307.75

12	nuqtasi)Suyuq uglerod disulfidi va uning bug'i o'rtasidagi muvozanat (uglerod disulfidi ning qaynash nuqtasi)	46.2	319.35
13	Suyuq atsiton va uning bug'i o'rtasidagi muvozanat (atsitonning qaynash nuqtasi)	56.7	329.85
14	Qattiq va suyuq parafin o'rtasidagi muvozanat (parafinning qotish nuqtasi)	58	331.15
15	Xloroform va uning bug'i o'rtasidagi muvozanat(xloroformning qaynash nuqtasi)	61.2	334.35
16	Metil spirti va uning bug'i o'rtasidagi muvozanat(metil spirtining qaynash nuqtasi)	64.7	337.85
17	To'rtxlorli uglerod va uning bug'i o'rtasidagi muvozanat (to'rtxlorli uglerodning qaynash nuqtasi)	76.7	349.85
18	Etil spirti va uning bug'i o'rtasidagi muvozanat (etil spertining qaynash nuqtasi)	78.3	351.45
19	Suyuq va qattiq naftalin o'rtasidagi muvozanat (naftalinning qotish nuqtasi)	80	353.15
20	Benzin va uning bug'i o'rtasidagi muvozanat (benzinning qaynash nuqtasi)	80.2	353.35
21	Qattiq va suyuq natriy o'rtasidagi muvozanat (natriyning qotish nuqtasi)	97.5	370.65
22	Skipidar va uning bug'i o'rtasidagi muvozanat (skipidarning qaynash nuqtasi)	161	434.15

23	Qattiq anilin va uning bug'i o'rtasidagi muvozanat (anilinning qotish nuqtasi)	184.2	457.35
24	Qattiq va suyuq vismut o'rtasidagi muvozanat (vismutning qotish nuqtasi)	271	544.15
25	Qattiq va suyuq selen o'rtasidagi muvozanat (selenning qotish nuqtasi)	220	493.15
26	Glitserin va uning bug'i o'rtasidagi muvozanat (glitserinng qaynash nuqtasi)	290	563.15
27	Qattiq va suyuq kaliy nitrat o'rtasidagi muvozanat (kaliy nitrat qotish nuqtasi)	335	608.15
28	Qattiq va suyuq tellur o'rtasidagi muvozanat (tellurning qotish nuqtasi)	452	725.15
29	Qattiq va suyuq surma o'rtasidagi muvozanat (surmaning qotish nuqtasi)	630.5	903.65
30	Qattiq va suyuq magniy o'rtasidagi muvozanat (magniyning qotish nuqtasi)	651	924.15
31	Qattiq va suyuq osh tuzi o'rtasidagi muvozanat (osh tuziqotish nuqtasi)	801	1074.15
32	Qattiq va suyuq germaniy o'rtasidagi muvozanat (germaniyning qotish nuqtasi)	958	1231.15
33	Qattiq va suyuq konstantan o'rtasidagi muvozanat (konstantan qotish nuqtasi)	1290	1563.15
34	Qattiq va suyuq xrom o'rtasidagi muvozanat (xromningqotish nuqtasi)	1350	1623.15
35	Qattiq va suyuq po'lat o'rtasidagi muvozanat (po'latningqotish nuqtasi)	1400	1673.15
36	Qattiq va suyuq kremniy o'rtasidagi	1440	1713.15

37	muvozanat (kremniyning qotish nuqtasi) Qattiq va suyuq nikelli po'lat (invar) o'rtasidagi muvozanat (nikelli po'latning qotish nuqtasi)	1500	1773.15
38	Qattiq va suyuq temir o'rtasidagi muvozanat (temirning qotish nuqtasi)	1535	1808.15
39	Qattiq va suyuq titan o'rtasidagi muvozanat (titanning qotish nuqtasi)	1660	1933.15
40	Qattiq va suyuq kvars o'rtasidagi muvozanat (kvarsning qotish nuqtasi)	1860	1973.15
41	Qattiq va suyuq xrom o'rtasidagi muvozanat (xromning qotish nuqtasi)	1800	2073.15
42	Qattiq va suyuq seriy o'rtasidagi muvozanat (seriyning qotish nuqtasi)	1860	2133.15
43	Qattiq va suyuq molibden o'rtasidagi muvozanat (molibdenning qotish nuqtasi)	2625	2898.15
44	Qattiq va suyuq tantal o'rtasidagi muvozanat (tantalning qotish nuqtasi)	2850	3123.15

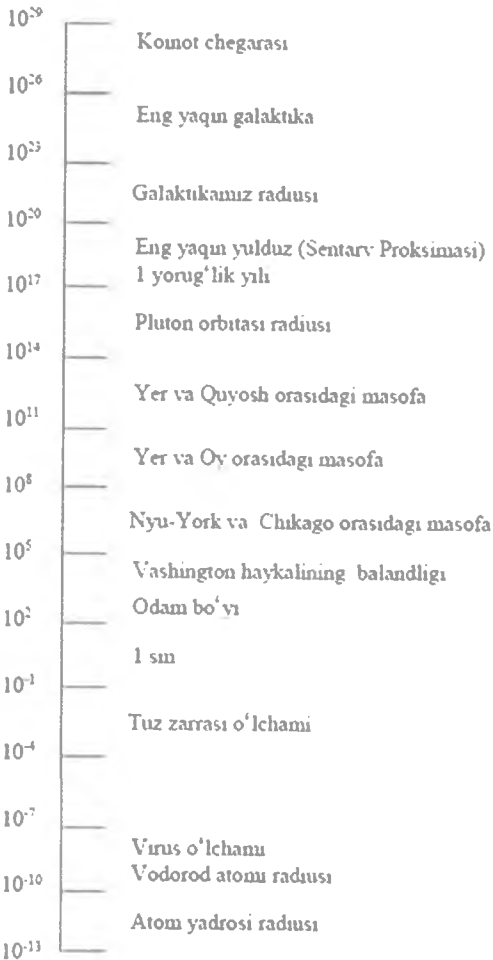
Global nurlanish zichligining spectral intensivligi

λ , mk	$\frac{v\lambda}{r_{\lambda}}, \frac{\text{sm}^2 \cdot \text{mk}}{\text{sm}^2 \cdot \text{mk}}$	λ , mk	$\frac{v\lambda}{r_{\lambda}}, \frac{\text{sm}^2 \cdot \text{mk}}{\text{sm}^2 \cdot \text{mk}}$
0.5	$1.47 \cdot 10^{-3}$	7.7	$4.94 \cdot 10^{-1}$
0.6	$1.81 \cdot 10^{-2}$	7.8	$4.74 \cdot 10^{-1}$
0.7	$9.64 \cdot 10^{-2}$	7.9	$4.55 \cdot 10^{-1}$
0.8	$3.08 \cdot 10^{-1}$	8.0	$4.37 \cdot 10^{-1}$
0.9	$7.10 \cdot 10^{-1}$	8.1	$4.20 \cdot 10^{-1}$
1.0	$1.31 \cdot 10^0$	8.2	$4.04 \cdot 10^{-1}$
1.1	$2.07 \cdot 10^0$	8.3	$3.88 \cdot 10^{-1}$
1.2	$2.91 \cdot 10^0$	8.4	$3.73 \cdot 10^{-1}$
1.3	$3.76 \cdot 10^0$	8.5	$3.59 \cdot 10^{-1}$
1.4	$4.56 \cdot 10^0$	8.6	$3.46 \cdot 10^{-1}$
1.5	$5.27 \cdot 10^0$	8.7	$3.33 \cdot 10^{-1}$
1.6	$5.85 \cdot 10^0$	8.8	$3.20 \cdot 10^{-1}$
1.7	$6.30 \cdot 10^0$	8.9	$3.09 \cdot 10^{-1}$
1.8	$6.64 \cdot 10^0$	9.0	$2.97 \cdot 10^{-1}$
1.9	$6.85 \cdot 10^0$	9.1	$2.87 \cdot 10^{-1}$
2.0	$6.95 \cdot 10^0$	9.2	$2.76 \cdot 10^{-1}$
2.1	$6.96 \cdot 10^0$	9.3	$2.66 \cdot 10^{-1}$
2.2	$6.90 \cdot 10^0$	9.4	$2.57 \cdot 10^{-1}$
2.3	$6.79 \cdot 10^0$	9.5	$2.48 \cdot 10^{-1}$
2.4	$6.62 \cdot 10^0$	9.6	$2.40 \cdot 10^{-1}$
2.5	$6.42 \cdot 10^0$	9.7	$2.31 \cdot 10^{-1}$
2.6	$6.20 \cdot 10^0$	9.8	$2.23 \cdot 10^{-1}$
2.7	$5.96 \cdot 10^0$	9.9	$2.16 \cdot 10^{-1}$
2.8	$5.71 \cdot 10^0$	10.0	$2.09 \cdot 10^{-1}$
2.9	$5.45 \cdot 10^0$	10.1	$2.02 \cdot 10^{-1}$
3.0	$5.20 \cdot 10^0$	10.2	$1.95 \cdot 10^{-1}$
3.1	$4.95 \cdot 10^0$	10.3	$1.89 \cdot 10^{-1}$
3.2	$4.70 \cdot 10^0$	10.4	$1.82 \cdot 10^{-1}$
3.3	$4.46 \cdot 10^0$	10.5	$1.77 \cdot 10^{-1}$
3.4	$4.23 \cdot 10^0$	10.6	$1.71 \cdot 10^{-1}$
3.5	$4.01 \cdot 10^0$	10.7	$1.65 \cdot 10^{-1}$
3.6	$3.79 \cdot 10^0$	10.8	$1.60 \cdot 10^{-1}$
3.7	$3.59 \cdot 10^0$	10.9	$1.55 \cdot 10^{-1}$
3.8	$3.40 \cdot 10^0$	11.0	$1.50 \cdot 10^{-1}$

3.9	$3.21 \cdot 10^0$	11.1	$1.46 \cdot 10^{-1}$
4.0	$3.04 \cdot 10^0$	11.2	$1.41 \cdot 10^{-1}$
4.1	$2.88 \cdot 10^0$	11.3	$1.37 \cdot 10^{-1}$
4.2	$2.72 \cdot 10^0$	11.4	$1.33 \cdot 10^{-1}$
4.3	$2.57 \cdot 10^0$	11.5	$1.29 \cdot 10^{-1}$
4.4	$2.44 \cdot 10^0$	11.6	$1.25 \cdot 10^{-1}$
4.5	$2.31 \cdot 10^0$	11.7	$1.21 \cdot 10^{-1}$
4.6	$2.18 \cdot 10^0$	11.8	$1.18 \cdot 10^{-1}$
4.7	$2.07 \cdot 10^0$	11.9	$1.14 \cdot 10^{-1}$
4.8	$1.96 \cdot 10^0$	12.0	$1.11 \cdot 10^{-1}$
4.9	$1.86 \cdot 10^0$	12.1	$1.08 \cdot 10^{-1}$
5.0	$1.76 \cdot 10^0$	12.2	$1.05 \cdot 10^{-1}$
5.1	$1.67 \cdot 10^0$	12.3	$1.02 \cdot 10^{-1}$
5.2	$1.59 \cdot 10^0$	12.4	$9.89 \cdot 10^{-2}$
5.3	$1.51 \cdot 10^0$	12.5	$9.62 \cdot 10^{-2}$
5.4	$1.43 \cdot 10^0$	12.6	$9.35 \cdot 10^{-2}$
5.5	$1.36 \cdot 10^0$	12.7	$9.09 \cdot 10^{-2}$
5.6	$1.29 \cdot 10^0$	12.8	$8.84 \cdot 10^{-2}$
5.7	$1.23 \cdot 10^0$	12.9	$8.60 \cdot 10^{-2}$
5.8	$1.17 \cdot 10^0$	13.0	$8.37 \cdot 10^{-2}$
5.9	$1.11 \cdot 10^0$	13.1	$8.14 \cdot 10^{-2}$
6.0	$1.06 \cdot 10^0$	13.2	$7.93 \cdot 10^{-2}$
6.1	$1.01 \cdot 10^0$	13.3	$7.71 \cdot 10^{-2}$
6.2	$9.63 \cdot 10^{-1}$	13.4	$7.51 \cdot 10^{-2}$
6.3	$9.18 \cdot 10^{-1}$	13.5	$7.31 \cdot 10^{-2}$
6.4	$8.76 \cdot 10^{-1}$	13.6	$7.12 \cdot 10^{-2}$
6.5	$8.36 \cdot 10^{-1}$	13.7	$6.94 \cdot 10^{-2}$
6.6	$7.99 \cdot 10^{-1}$	13.8	$6.79 \cdot 10^{-2}$
6.7	$7.63 \cdot 10^{-1}$	13.9	$6.59 \cdot 10^{-2}$
6.8	$7.29 \cdot 10^{-1}$	14.0	$6.42 \cdot 10^{-2}$
6.9	$6.97 \cdot 10^{-1}$	14.1	$6.26 \cdot 10^{-2}$
7.0	$6.67 \cdot 10^{-1}$	14.2	$6.10 \cdot 10^{-2}$
7.1	$6.38 \cdot 10^{-1}$	14.3	$5.95 \cdot 10^{-2}$
7.2	$6.11 \cdot 10^{-1}$	14.4	$5.80 \cdot 10^{-2}$
7.3	$5.85 \cdot 10^{-1}$	14.5	$5.66 \cdot 10^{-2}$
7.4	$5.61 \cdot 10^{-1}$	14.6	$5.52 \cdot 10^{-2}$
7.5	$5.37 \cdot 10^{-1}$	14.7	$5.37 \cdot 10^{-2}$
7.6	$5.15 \cdot 10^{-1}$	14.8	$5.23 \cdot 10^{-2}$

Koinotdagi masofalar ko'lamı

santimetr lar



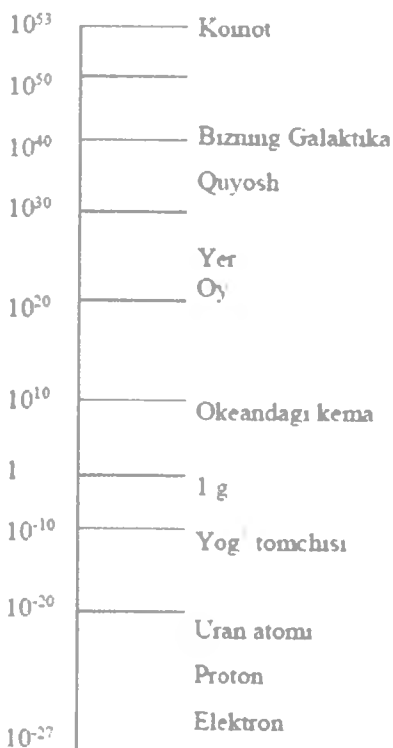
Koinotdagi vaqt

sekundlar

10^{18}	Koinot yoshi
10^{15}	Yerning yoshi
10^{12}	Birinchii inson paydo bo'lgani Misr ehronlarining yoshi
10^9	Insonning o'rtacha yashash vaqti
10^6	1yil = $3.156 \cdot 10^7$ s 1kun = $8.64 \cdot 10^4$ s
10^3	Yorug'likning quyoshdan yergacha yetib kelish vaqti
1	Yurak urish oralig'i
10^{-3}	Tovush to'lqinining tebranish davri
10^{-6}	Radio to'lqinning tebranish davri
10^{-9}	Yorug'lik 30sm masofani bosib o'tadi
10^{-12}	Molekulaning tebranish davri
10^{-15}	Atomning tebranish davri
10^{-18}	Yorug'lik atom o'lchamiga teng masofani bosib o'tadi
10^{-21}	Yadroning tebranish davri
10^{-24}	Yorug'lik atom yadrosi o'lchamiga teng masofani bosib o'tadi

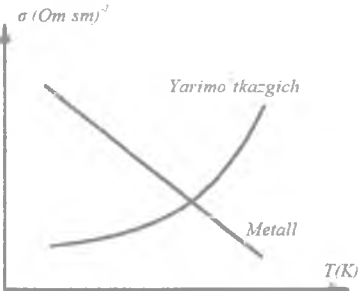
Koinotdagi massalar

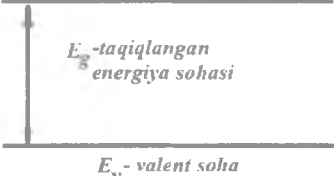
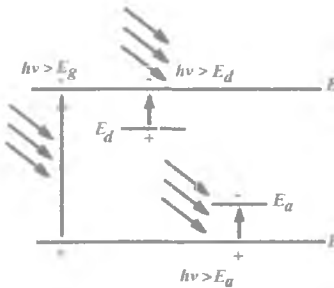
grammlar



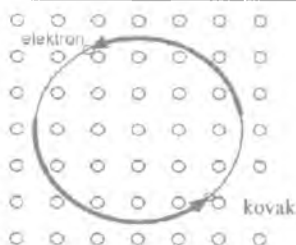
Yarimo'tkazgich materiallarning metallardan fundamental farqlari

1.Yarim o'tkazgichlarda 2 xil zaryad tashuvchilar mavjud. Elektronlar(n) va Kovaklar(p). Metallarda zaryad tashuvchilar faqat elektronlardir. (Kovak – yarimo'tkazgich material asosiy atomlarining kovalent bog'lanishga qatnashayotgan valent elektronlarini yo'qotib, musbat zaryadga aylangan bo'sh o'rni).	
2.Yarimo'tkazgich materiallar 2 xil n va p-tip o'tkazuvchanlikka ega bo'ladi.(n-turdagi yarim o'tkazgichlarda elektronlar konsentratsiyasi, kovaklar konsentratsiyasidan juda ko'p bo'ladi $n \gg p$, bunday materiallar ularga donor kirishma atomlarini kiritish yo'li bilan olinadi. p-tipli materiallarda esa $p \gg n$ (ular akseptor kirishma atomlarni kiritish yo'li bilan olinadi).	
3.Yarimo'tkazgich materiallarning solishtirma o'tkazuvchanligi kirishma atomlarining miqdoriga o'ta bog'liqdir. (Asosiy atomlar konsentratsiyasining 10^{-9} qismi (yoki 1 tonna kremniyga 1mg B,Al,P) miqdoridagi kirishma atomlar kiritilganda ularning o'tkazuvchanligi 1000 marta oshishi mumkin) metallarda bunday holat mavjud emas.	

4. Yarimo'tkazgich materiallar: - xususiy (tarkibida begona atomlar konsentratsiyasi $N < 10^{10} \text{ sm}^{-3}$), - legirlangan (kirishma atomlar konsentratsiyasi $N = 10^{11} \div 10^{17} \text{ sm}^{-3}$) - o'talegirlangan ($N = 10^{18} \div 10^{20} \text{ sm}^{-3}$) bo'ladi.	
5. Yarimo'tkazgich materiallarda elektronlar va kovaklar effektiv massaga (m_n^*, m_p^*) ega bo'ladi. Effektiv massa – bu kristall panjara davriy potensialining elektronlar harakatiga ta'sirini ko'rsatuvchi kattalik bo'lib, haqiqiy massaga ega emas.	$m_n^*, m_p^* = \frac{\partial^2 E(k)}{\partial k^2}$
6. Yarimo'tkazgich materiallarda elektronning harakatchanligi (μ_n) metallarga nisbatdan 100 yoki 1000 marta katta bo'lishi mumkin. Harakatchanlik – bu bir birlik elektr maydonining ta'sirida elektronlarning dreyf tezligi o'zgarishidir ($\mu_n = \frac{v}{E}$; birligi [$\text{sm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$])	$\mu_n = \frac{e}{m_n^*} \tau;$ $\mu_p = \frac{e}{m_p^*} \tau.$
7. Yarimo'tkazgich materiallarning solishtirma o'tkazuvchanligi harorat oshishi bilan eksponensial qonun bo'yicha oshadi: $\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{E_g}{2kT}}, \quad (\text{Om} \cdot \text{sm})^{-1}.$ Metallarda esa harorat oshishi bilan solishtirma o'tkazuvchanlik chiziqli qonuniyat asosida kamayadi: $\sigma = \sigma_0 (1 - \alpha T), \quad (\text{Om} \cdot \text{sm})^{-1}$	
8. $T = 300^\circ\text{K}$ da metallarning solishtirma o'tkazuvchanligi $\sigma = 10^4 \div 10^6 (\text{Om} \cdot \text{sm})^{-1}$, yarimo'tkazgichlarda esa $\sigma = 10^3 \div 10^{-10} (\text{Om} \cdot \text{sm})^{-1}$, ya'ni juda katta oraliqda o'zgarishi mumkin.	

9.Yarimoʻtkazgich materiallarda taqiqlangan soha mavjud boʻlib, ularning miqdori $E_g=0,17\div3,5$ eV gacha oʻzgarishi mumkin. (Taqiqlangan soha kattaligi eV bilan oʻlchanadi va u kovalent bogʻlanishga qatnashayotgan valent elektronlarni ozod qilish uchun kerak boʻlgan energiyaga teng).	<i>E_c-oʻtkazuvchanlik sohasi</i>  <i>E_g-taqiqlangan energiya sohasi</i> <i>E_v- valent soha</i>
10.Yarimoʻtkazgich materialarning oʻtkazuvchanligini yorugʻlik taʼsirida juda katta oraliqda boshqarish mumkin (yaʼni fotooʻtkazuvchanlik hodisasi mavjud). Metallarning oʻtkazuvchanligi yorugʻlik taʼsirida umuman oʻzgarmaydi. (Bu ichki fotoeffekt hodisasi bilan tushuntiriladi, metallarda ichki fotoeffekt hodisasi mavjud emas).	
11 Yarimoʻtkazgich materiallarning fizik xossalari tashqi taʼsirlarga (harorat, yorugʻlik, bosim, magnit maydon, radiatsiya...) oʻta sezgirdir. Ularning sezgirligi metallarnikidan koʻp marta ortiqdir.	
12.Yarimoʻtkazgich materiallarda zaryad tashuvchi kovak va elektronlarning yashash vaqti mavjud. Ularning qiymati $\tau_n \sim \tau_p = 10^{-10} \div 10^{-11}$ sekund oraligʻida oʻzgarishi mumkin. Metallarda zaryad tashuvchilarning yashash vaqti degan tushuncha mavjud emas. (Elektronlarning yashash vaqti elektronning oʻtkazuvchanlik sohasida boʻlish vaqtidir, kovaklarning yashash vaqti ularning valent sohada boʻlish vaqtidir).	

13. Yarimo'tkazgich materiallarda eksiton – (elektron va kovak juftligi) mavjud. (Ular o'tkazuvchanlikda qatnashmagan holda juft bo'lib harakatlanadi).

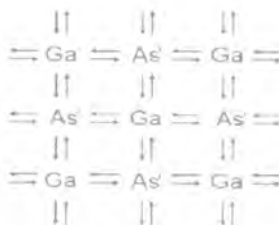


14. Yarimo'tkazgich materiallar o'ziga xos kimyoviy bog'lanishga ega bo'lib, bunday bog'lanishlar sp^3 - tetradrik kovalent bog'lanish deyiladi (1-rasm).



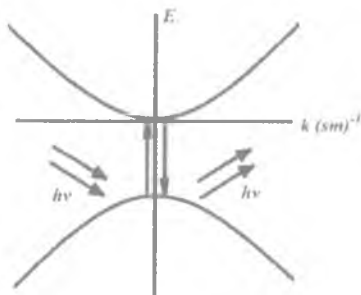
1-rasm

yoki qisman ion - kovalent bog'lanishga ega bo'ladi (2-rasm).



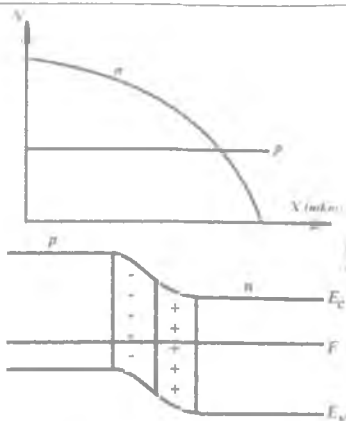
2-rasm

15. Yarimo'tkazgich materiallarda ma'lum sharoitda aniq to'liq uzunligiga ega bo'lgan yorug'lik chiqishi mumkin. (fotolyuminisensiya va elektrolyuminisensiya, lazerlar).



16. Yarimo'tkazgich materiallarda relaksatsiya vaqti (τ) metallarga qaraganda o'ta o'zgaruvchan va katta bo'ladi. (Metallarda $\tau \sim 10^{-13}$ s). **Relaksatsiya vaqti** - bu tashqi ta'sir olingandan keyin tizimi nomuvozanat holatidan muvozanat holatiga tiklanish uchun kerak bo'ladigan vaqtdir.

17. Yarimo'tkazgich materialning sirti yoki hajmida zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining gradientini xohlagancha hosil qilish mumkin.



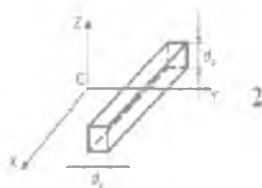
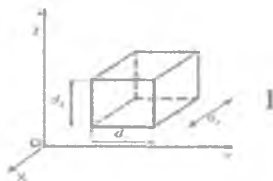
18. Yarimo'tkazgich materiallarda nano o'lchamlik strukturalar (kvant nuqtasi, kvant ipi, kvant chuqurligi) hosil qilish bilan ularning fundamental parametrlarini o'zgartirish va boshqarish mumkin. Metallarda esa erkin elektronlar energiyasi katta bo'lganligi ($E=5 \cdot 10$ eV) va elektron o'z massasiga (m) ega bo'lganligi uchun:

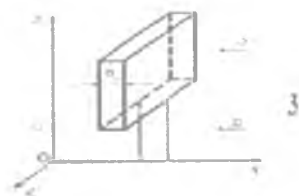
De Broyl to'liq uzunligi $\left[\lambda = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{h}{\sqrt{2mE}} \right]$

juda kichik bo'ladi. **1-kvant nuqta:** $a_x, a_y, a_z \sim \lambda_d$;

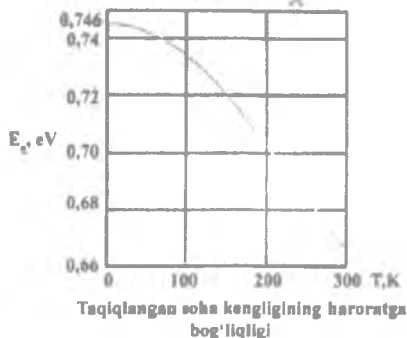
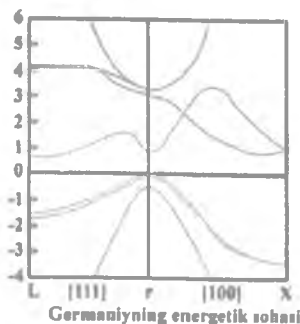
2-kvant ip: $a_y \gg \lambda_d; a_x, a_z \sim \lambda_d$

3-kvant chuqurligi: $a_z \sim \lambda_d; a_x, a_y \gg \lambda_d$





Ge GERMANIY ГЕРМАНИЙ GERMANIUM



ATOM XUSUSIYATI

ATOM MASSASI	72,61 m. a. b. (g/mol)
(MOLYAR MASSA)	
ATOM RADIUSI	137 pm

KIMYOVIY XUSUSIYATI

KOVALENT RADIUS	122 pm
ION RADIUSI	(+4e) 53 (+2e) 73 pm

KRISTALL PANJARA

PANJARASTRIKTURASI	olmos
PANJARA PARAMETRI	5,660 Å

TERMODINAMIK XUSUSIYATI

ZICHLIK	5,323 g/cm ³
MOLYAR ISSIQLIK SIG'IMI	23,32 J/(K·mol)
ISSIQLIK O'TKAZUVCHANLIK	60,2 W/(m·K)
ERISH HARORATI	1210,6 K

ELEKTROFIZIK XUSUSIYATI

1. TAQIQLANGAN SOHA KENGLIGI (E_g) - 0,66 eV;
2. E_g NI T GA BOG'LIQLIGI. (α , 10⁻⁴ eV/GRAD) - -4,5;
3. T = 300 K DAGI ELEKTRONLARNING HARAKATCHANLIGI (μ_n) - 3900 sm²/V·s;
4. T = 300 K DAGI KOVAKLARNING HARAKATCHANLIGI (μ_p) - 1900 sm²/V·s;
5. ELEKTRONLAR HOLATINING SAMARALI ZICHLIK (N_C) - 1,04·10¹⁹ sm⁻³;
6. KOVAKLAR HOLATINING SAMARALI ZICHLIK (N_V) - 6,1·10¹⁸ sm⁻³;
7. T = 300 K DAGI XUSUSIY O'TKAZUVCHANLIK - 2,2·10⁻¹ I/Osm·sm;
8. T = 300 K DAGI XUSUSIY KONSENTRASIYA (n_i) - 2,1·10¹³ sm⁻³;
9. ASOSIY DONORLI KIRISHMA N_A - P, As, Sb;

ASOSIY FORMULARLAR

TAQIQLANGAN SOHA KENGLIGINING HARORATGA BOG'LIQLIGI

$$E_g = E_{g0} - \alpha T$$

HARAKATCHANLIK IFODASI

$$\mu_n = \frac{e}{m_n} \left(\frac{h}{2\pi} \right)^{-1} \quad \mu_p = \frac{e}{m_p} \left(\frac{h}{2\pi} \right)^{-1}$$

bu yerda m_n va m_p mos ravishda elektron va kovaklarning samarali massasi, e esa elektronning raqmi.

SOLIN TIRMA O'TKAZUVCHANLIK IFODASI

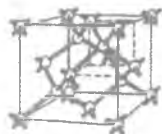
$$(0 - \text{sm}) \quad \sigma = e n \mu_n \quad (\text{qatarr}) \quad \sigma = e p \mu_p$$

ELEKTRON VA KOVAKLARNING MOBILINIDA O'TKAZUVCHANLIK VA VALENT KIMYADAGI KONSENTRATSIYASI

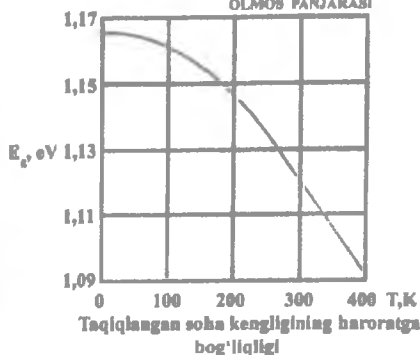
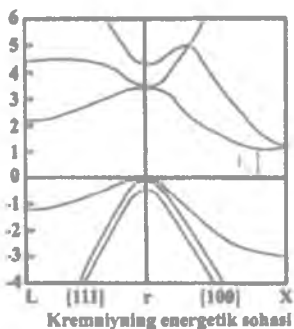
$$n = N_C \exp\left(\frac{E_F - E_C}{kT}\right) \quad p = N_V \exp\left(\frac{E_V - E_F}{kT}\right)$$

Si

KREMNIY КРЕМНИЙ SILICON



OLMOS PANJARASI



ATOM XUSUSIYATI

ATOM MASSASI (MO'LYAR MASSA)	28,0855 m. a. b. (g/mol)
ATOM RADIUSI	1,32 Å

KIMYOVIIY XUSUSIYATI

KOVALENT RADIUS	1,11 Å
ION RADIUSI	(+4e) 0,42 (-4e) 2,71 Å

KRISTALL PANJARA

PANJARA STRUKTURA SI	olmo
PANJARA PARAMETRI	5,43095 Å

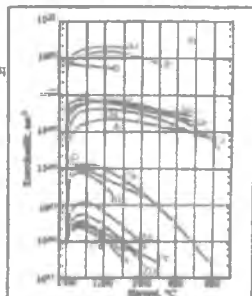
TERMODINAMIK XUSUSIYATI

ZICHLIK	2,33 g/cm ³
MO'LYAR ISSIQLIKSIZIMI	20,16 J/(K·mol)
ISSIQLIK O'TKAZUVCHANLIK	149 W/(m·K)
ERISH HARORATI	1415 °C

ELEKTRO FIZIK XUSUSIYATI

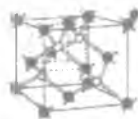
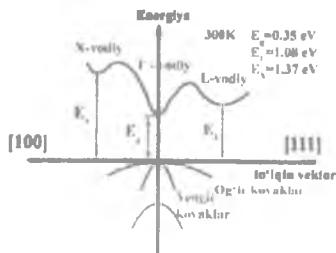
1. TAQLANGAN SOHA KENGLIGI (E_g) - 1,12 eV;
2. HARORAT KOEFFITSIENTI (α , 10⁻⁴ eV/GRAD) - -4;
3. T = 300 K DAGI ELEKTRONLARNING HARAKATCHANLIGI (μ_n) - 1500 cm²/V·s;
4. T = 300 K DAGI KOVAKLARNING HARAKATCHANLIGI (μ_p) - 450 cm²/V·s;
5. O'TKAZUVCHANLIK SOHASIDA ELEKTRONLAR
HOLATINING ZICHLIGI (N_c) - 2,5·10¹⁷ cm⁻³;
6. VALENT SOHASIDA KOVAKLAR HOLATINING ZICHLIGI (N_v) - 1,82·10¹⁷ cm⁻³;
7. T = 300 K DAGI XUSUSIY O'TKAZUVCHANLIK - 4,3·10⁻⁴ 1/Ω·cm;

KREMIY QAT'ISINING KRISTALL DASTURI

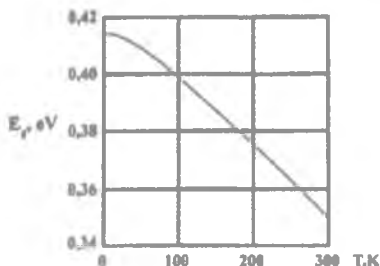


InAs

INDIY ARSENIDI АРСЕНИД ИНДИЯ INDIUM ARSENIDE

RUH OBMARKA
PANJARASI

Indiy arsenidining energetik sohasi

Taqlangan soha kengligining haroratga
bog'liqligi

ATOM XUSUSIYATI

ATOM MASSASI	- m. a. b. (g/mol)
(MOJAR MASSA)	
ATOM RADIUSI	

KIMYOVIIY XUSUSIYATI

KOVALENT RADIUSI
ION RADIUSI

KRISTALL PANJARA

PANJARA STRUKTURASI	ruh obmarka
PANJARA PARAMETRI	6,0584 Å

TERMODINAMIK XUSUSIYATI

ZICHLIK	5,667 g/cm ³
MOLYAR ISSIQLIK SIG'IMI	- J/(K·mol)
ISSIQLIK O'TKAZUVCHANLIK	- W/(m·K)
ERISH HARORATI	942 °C

ELEKTRO FIZIK XUSUSIYATI

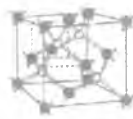
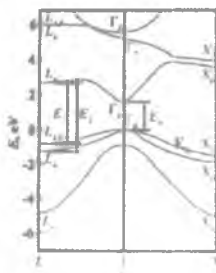
1. TAQIQLANGAN SOHA KENGLIGI (E_g) - 0,354 eV;
2. HARORAT KOFFITSIENTI (α , 10⁻⁴ eV/GRAD) - -3,54;
3. T = 300 K DAGI ELEKTRONLARNING HARAKATCHANLIGI (μ_n) - 3,000 cm²/V·s;
4. T = 300 K DAGI KOVAKLARNING HARAKATCHANLIGI (μ_p) - 460 cm²/V·s;
5. O'TKAZUVCHANLIK SOHASIDA ELEKTRONLAR HOLATINING ZICHLIGI (N_c) - 8·10¹⁸ cm⁻³;
6. VALENT SOHASIDA KOVAKLAR HOLATINING ZICHLIGI (N_v) - 6·3·10¹⁸ cm⁻³;
7. T = 300 K DAGI XUSUSIY O'TKAZUVCHANLIK - 0,9 1/Ω·cm·s;
8. T = 300 K DAGI XUSUSIY KONSENTRASIYA (n_i) - 7·10¹⁴ cm⁻³;
9. ASOSIY DONORLI KIRISHMA N_D - Sb, Se, Te;

ASOSIY FORMULALAR

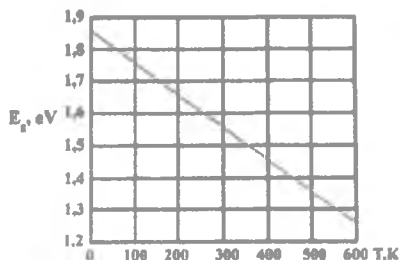
Amal qiluvchi mosmalar qonuni
$n p = n_i^2$
Funktsiya shakli:
$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{e}$
Yarimo'tkazgichda elektronlarning diffuziya koeffitsienti
$D = \left(\frac{kT}{e} \right) \mu_n$
Yarimo'tkazgichda kovaklarning diffuziya koeffitsienti
$D = \left(\frac{kT}{e} \right) \mu_p$
Yarimo'tkazgichda elektron va kovaklarning diffuzion uzunligi
$L = \sqrt{D \tau}$ $L = \sqrt{D_p \tau_p}$

CdTe

KADMIY TELLURIDI ТЕЛЛУРИД КАДМИЯ CADMIUM TELLURIDE

RUHI OBMAKKA
PANJARASI

Kadmiy telluridining energetik sohasi



Taqiqlangan soha kengligining haroratga bog'liqligi

ATOM XUSUSIYATI

ATOM MASSASI - m. a. b. (g/mol)
 (MOLYAR MASSA)
 ATOM RADII SI -

KIMYOVIY XUSUSIYATI

KOVALENT RADII S -
 ION RADII SI -

KRISTALL PANJARA

PANJARA STRUKTURASI ruh obmaka
 PANJARA PARAMETRI 6482 Å

TERMODINAMIK XUSUSIYATI

ZICHLIK 5,86 g/sm³
 MOLYAR ISSIQLIK SIG'IMI - J/ (K·mol)
 ISSIQLIK O'TKAZUVCHANLIK - W/(m·K)
 ERISH HARORATI 1041 °C

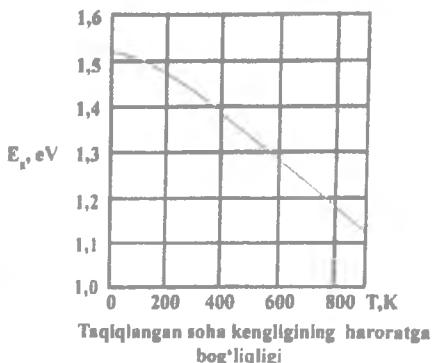
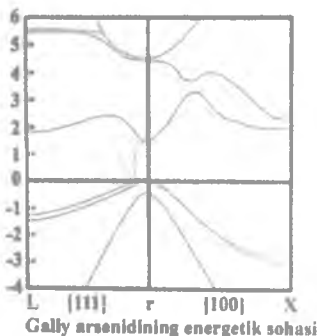
ELEKTRO FIZIK XUSUSIYATI

1. TAQIQLANGAN SOHA KENGLIGI (E_g) - 1,56 eV;
2. HARORAT KOFFITSIENTI (α , 10⁻⁴ eV/GRAD) - 5,4;
3. T = 300 K DAGI ELEKTRONLARNING HARAKATCHANLIGI (μ_n) - 1700 sm²/V·s;
4. T = 300 K DAGI KOVAKLARNING HARAKATCHANLIGI (μ_p) - 60 sm²/V·s;
5. O'TKAZUVCHANLIK SOHASIDA ELEKTRONLAR HOLATINING ZICHLIGI (N_c) - 2,3·10¹⁷ sm⁻³;
6. VALENT SOHASIDA KOVAKLAR HOLATINING ZICHLIGI (N_v) - 9,6·10¹⁶ sm⁻³;
7. T = 300 K DAGI XUSUSIY O'TKAZUVCHANLIK - 1,1·10⁻³ 1/Om·sm;
8. T = 300 K DAGI XUSUSIY KONSENTRASIVA (n) - 1,2·10¹⁷ sm⁻³;
9. ASOSIY DONORLI KIRISHMA N_D - J;

METAL SILLINIDIRINISH BIRIKMASI				
Material nomi	ρ_n , T	Longitudinal conductivity, Ω^{-1}	Transverse conductivity, Ω^{-1}	Longitudinal conductivity, Ω^{-1}
Cu ₂ S	0,08	400	1000	1000
Cu ₂ Se	0,04	400	1000	1000
Cu ₂ Te	0,57	400	1000	1000
LiNbO ₃	0,53	550	1000	1000
LiNbO ₃	0,53	550	1000	1000
Mg ₂ Si	0,72	1000	1000	1000
LiNbO ₃	0,55	1000	1000	1000
Nb ₂ O ₅	0,74-75	200	1000	1000
Nb ₂ O ₅	0,66-0,75	400	1000	1000
Nb ₂ O ₅	0,7	3000	1000	1000
Pb ₂ Se	0,54-0,75	200	1000	1000
Pb ₂ Se	0,64	300	1000	1000
Pb ₂ Se	0,50	500	1000	1000

GaAs

GALLIY ARSENIDI АРСЕНИД ГАЛЛИЯ GALLIUM ARSENIDE



ATOM XUSUSIYATI

ATOM MASSASI 144.64 m.u. (g/mol)
(MOLYAR MASSA)
ATOM RADIUSI

KIMYOVIY XUSUSIYATI

KOVALENT RADIUS
ION RADIUSI

KRISTALL PANJARA

PANJARA STRUKTURA SI ruh obmanka
PANJARA PARAMETRI 5,6533 Å

TERMODINAMIK XUSUSIYATI

ZICHLIK 5,3161 g/cm³
MOLYAR ISSIQLIK SIG'IMI - J/(K·mol)
ISSIQLIK O'TKAZUVCHANLIK - W/(m·K)
ERISH HARORATI 1238 K

ELEKTRO FIZIK XUSUSIYATI

1. TAQIQLANGAN SOHA KENGLIGI (E_g) - 1,43 eV;
2. E_g NI T GA BOG'LIKLIGI. ($\alpha \cdot 10^{-4}$ eV/GRAD) - -5;
3. T = 300 K DAGI ELEKTRONLARNING HARAKATCHANLIGI (μ_n) - 8500 cm²/Vs;
4. T = 300 K DAGI KOYAKLARNING HARAKATCHANLIGI (μ_p) - 450 cm²/Vs;
5. ELEKTRONLAR HOLATINING SAMARALI ZICHLIGI (N_c) - $4,7 \cdot 10^{17}$ cm⁻³;
6. KOYAKLAR HOLATINING SAMARALI ZICHLIGI (N_v) - $7 \cdot 10^{16}$ cm⁻³;
7. T = 300 K DAGI XUSUSIY O'TKAZUVCHANLIK - $2,5 \cdot 10^{-4}$ I/Om·cm;
8. T = 300 K DAGI XUSUSIY KONSENTRASIYA (n) - $2 \cdot 10^{10}$ cm⁻³;
9. ASOSIY DONORLI KIRISHMA N. - S, Se, Te;

ASOSIY FORMULALAR

TAQIQLANGAN SOHA KENGLIGINING
HARORATGA BOG'LIKLIGI

$$E_g = E_{g0} - \alpha T$$

HARAKATCHANLIK IFODASI

$$\mu = \frac{e \hbar^2}{4 \pi^2 m^*} \left(\frac{1}{N_c} + \frac{1}{N_v} \right)$$

Bu yerda m va n mos ravishda elektron va
kovaklarning samarali massasi, T esa reink-
santning vaqti.

SOLISH ILMMA O'TKAZUVCHANLIK
IFODASI

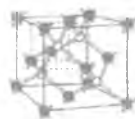
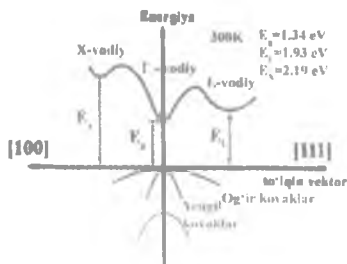
$$(n-p) \approx \frac{e \hbar^2}{4 \pi^2 m^*} \left(\frac{1}{N_c} - \frac{1}{N_v} \right) \approx \frac{e \hbar^2}{4 \pi^2 m^*} \left(\frac{1}{N_c} \right)$$

ELEKTRON VA KOYAKLARNING MOS
RAVISHIDA O'TKAZUVCHANLIK VA VALENT
HOLATDAGI KONSENTRASIYASI

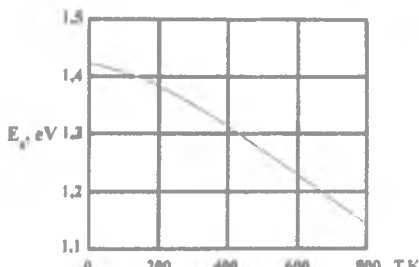
$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad p = N_v \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

InP

INDIY FOSFIDI ФОСФИД ИНДИЯ INDIUM PHOSPHIDE

RUHORMANKA
PANJARANI

Indiy fosfidining energetik sohasi

Taqiqlangan soha kengligining haroratga
bog'liqligi

ATOM XUSUSIYATI

ATOM MASSASI	m. a. b. (g/mol)
(MOLYAR MASSA)	
ATOM RADIISI	

KIMYOVIY XUSUSIYATI

KOVALENT RADIUS	
ION RADIISI	

KRISTALL PANJARA

PANJARASTRIKTURASI	ruh ormanka
PANJARAPARAMETRI	5.8696 Å

TERMODINAMIK XUSUSIYATI

ZICHLIK	4.787 g/sm ³
MOLYAR ISSIQLIK SIG'ISHI	- J/(K·mol)
ISSIQLIK O'TKAZUVCHANLIK	- W/(m·K)
ERISH HARORATI	1070 °C

ELEKTROFIZIK XUSUSIYATI

1. TAQIQLANGAN SOHA KENGLIGI (E_g) - 1.35 eV;
2. HARORAT KOFFITSIENTI (α , 10^{-4} eV/GRAD) - 4.71
3. $T = 300$ K DAGI ELEKTRONLARNING HARAKATCHANLIGI (μ_n) - 1000 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sm}$;
4. $T = 300$ K DAGI KOVAKLARNING HARAKATCHANLIGI (μ_p) - 150 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sm}$;
5. O'TKAZUVCHANLIK SOHASIDA ELEKTRONLAR HOLATINING ZICHLIGI (N_D) - $5.34 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$;
6. VALENT SOHASIDA KOVAKLAR HOLATINING ZICHLIGI (N_A) - $1.28 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$;
7. $T = 300$ K DAGI XUSUSIY O'TKAZUVCHANLIK - $3.5 \cdot 10^{-1} \text{ I/Om}\cdot\text{sm}$;
8. $T = 300$ K DAGI XUSUSIY KONSENTRASIYA (n) - $4 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3}$;
9. ASOSIY DONORLI KIRISHMA $N_D - \text{S}$;

ASOSIY FORMULARLAR

TAQIQLANGAN SOHA KENGLIGINING
HARORATGA BANG'LI BOLLIGI

$$E_g = E_{g0} - \alpha T$$

HARAKATCHANLIK IFODASI

$$\mu_n = \frac{e}{m} \tau_n \quad \mu_p = \frac{e}{m_p} \tau_p$$

Bu yerda m va m_p mos ravishda elektron va
kovaklarning massasi; τ_n va τ_p mos ravishda
elektron va kovaklarning o'tkazuvchanlik
vaqti.NOLINHTIRMA O'TKAZUVCHANLIK
IFODASI

$$(n\text{-tur}) \quad \sigma = e n \mu_n \quad (p\text{-tur}) \quad \sigma = e n \mu_p$$

ELEKTRON VA KOVAKLARNING MOS
RAVISHDA O'TKAZUVCHANLIK VA VALENT
NOLINHTIRMA KOMPONENT RAVISHYAM

$$\sigma = e n \exp\left(\frac{E - E_g}{kT}\right) \quad \sigma = e n_p \exp\left(\frac{E - E_g}{kT}\right)$$

GLOSSARIY

Relaksatsiya vaqti – termodinamik tizimning muvozanat holatiga kelishini tavsiflaydigan vaqt.

Zaryad tashuvchilar generatsiyasi – tashqi ta'sir natijasida erkin elektronlar va kovaklarni hosil qiladigan jarayon.

Diffuziya toki – zaryad tashuvchilarning gradienti mavjud bo'lgandagi ko'chish natijasida hosil bo'ladigan tok.

To'lqin uzunligi – bir fazoda tebranayotgan bir-biriga eng yaqin ikki nuqta orasidagi masofa.

Erkin yugurish yo'li uzunligi – zarrachalarning ikki to'qnashuv orasida bosib o'tgan yo'li.

Donorli kirishma – ionlashganda valent elektronlarini o'tkazuvchan energetik sohaga o'tuvchi, yarimo'tkazgich materialiga kiritilgan kirishma modda atomlari.

Zaryad tashuvchilarning dreyfi – tashqi elektr maydon ta'sirida qattiq jismlarda zaryad tashuvchilarning yo'naltirilgan tezlanishsiz harakati.

Taqiqlangan energiyalar sohasi – valent va o'tkazuvchanlik sohalari o'rtasidagi energetik soha.

Kontakt potentsiallar farqi – turli xil o'tkazuvchanlikka ega kristallar tutashtirilganda chiqish ishlari farqi hisobiga hosil bo'ladigan potentsiallar farqi.

Koordinatsion son – kristall panjarada belgilangan atomni o'rab turuvchi bir turdagi atomlar soni.

Kristall – atomlari davriy va tartibli joylashgan qattiq jism.

Kristall panjara – atomlarning davriy va tartibli joylashuvidan hosil bo'lgan panjara.

Kristallografik tekislik – kristall panjara tugunlaridan o'tkazilgan va indekslar bilan tavsiflangan tekislik.

Legirlash – qattiq jismlarga boshqa modda atomlarini kiritish.

Chiziqli nuqson – ikki o'lchovga ega bo'lgan kristall panjara nuqsoni.

Nuqtaviy nuqson – atom o'lchamiga ega bo'lgan kristall panjara nuqsoni.

Diffuziyaning tugunlararo mexanizmi – kristall panjara atomlariga nisbatan kichik o'lchamga ega bo'lgan begona modda atomlarining qattiq jismni panjara tugunlari o'rtasida harakatlanishi.

Monokristall – uzluksiz kristall panjaraga ega bo'lgan yaxlit kristall.

Hajmiy nuqson – kristalldagi uch yo'nalishiga nisbatan katta o'lchamga ega bo'lgan nuqson.

Yoritilganlik – yorug'lik oqimining tushayotgan yuzaga nisbati.

Shottki o'tishi – metall bilan yarimo'tkazgich tutashuvi.

Nuqsonlar zichligi – materialning hajm birligidagi nuqsonlar miqdori.

Dreyf harakatchanlik – tashqi elektr maydonining birlik kuchlanganligi ta'sirida zaryad tashuvchilar olgan tezligi.

Kompensirlangan yarimo'tkazgich – donor va akseptorli kirishma atomlari mavjud bo'lgan yarimo'tkazgich.

Kirishmali yarimo'tkazgich – tarkibida donor yoki akseptor kirishma atomlari bo'lgan yarimo'tkazgich.

Donor kirishma atomlari – yarimo'tkazgichda erkin elektronlar hosil qiluvchi kirishma atomlari.

Akseptor kirishma atomlari – yarimo'tkazgichda kovaklar hosil qiluvchi kirishma atomlari.

Xususiy elektr o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan yarimo'tkazgich – elektr faol kirishma atomlari mavjud bo'lmagan yarimo'tkazgich.

p – turdagi yarimo'tkazgich – zaryad tashuvchilar faqat kovaklardan iborat bo'lgan yarimo'tkazgich.

n – turdagi yarimo'tkazgich – zaryad tashuvchilar faqat erkin elektronlardan iborat bo'lgan yarimo'tkazgich.

Yarimo'tkazgich materialidagi kirishma atomlar – yarimo'tkazgich materialidagi begona atomlar.

Chiqish ishi – qattiq jism hajmida erkin harakat qilayotgan elektron uni tark etib, fazoga chiqishi uchun jism sirtidagi ma'lum potensial to'siqni yengishi.

Ishchi fotoshablon – yarimo'tkazgich integral sxemani ishlab chiqarishda qo'llaniladigan fotoshablon.

Radiatsion buzilish – qattiq jismni katta tezlikdagi ionlar bilan bombardimon qilinganda kristall tuzilishda vujudga keladigan buzilishlar.

Kirishma atomlarini yarimo'tkazgich ichida tarqatish – yarimo'tkazgichning yupqa qatlamiga kiritilgan kirishma atomlarini yuqori haroratda qizdirish orqali kristall ichiga tarqatish.

Rekombinatsiya – yarimo'tkazgich materialidagi erkin elektron bilan kovakning birlashishi natijasida elektron-kovak juftining yo'q bo'lishi.

Silitsid – kremniyning metallar bilan hosil qilgan kimyoviy birikmasi.

Sovutish tezligi – qattiq jism sovutilayotganda vaqt birligi ichida uning haroratining o'zgarishiga teng kattalik.

Inversiya qatlami – teskari elektr oʻtkazuvchanligiga ega boʻlgan qatlam.

Spin – elektronning oʻz oʻqi atrofida aylanishi natijasida vujudga keladigan harakat miqdori.

Spin-orbital oʻzaro taʼsir – elektronning orbita boʻylab harakati natijasida vujudga kelgan magnit maydoni bilan elektron spini hosil qilgan magnit maydonining oʻzaro taʼsiri. U qattiq jismlarda ham, yakkalangan atomlarda ham mavjud.

Erkin yugurish yoʻlining oʻrtacha uzunligi – zarrachalarning bir toʻqnashuvdan ikkinchi toʻqnashuvgacha bosib oʻtgan yoʻlining oʻrtacha uzunligi.

Elektronga moyillik – neytral atomlar, molekularlar va erkin radikallarning oʻzlariga qoʻshimcha elektron biriktirib olib, manfiy holatga aylanish xususiyati.

Almashgan qattiq qorishma – kristall panjara tugunlarida asosiy atomlar oʻrniga kirishma atomlarining joylashishi.

Qarshilikning harorat koeffitsiyenti – harorati bir gradusga oʻzgarganda solishtirma qarshilikning oʻzgarishini uning boshlangʻich qiymatiga nisbati.

Termoishlov – yarimoʻtkazgich materialining xossalari oʻzgartirish uchun yuqori haroratda ishlov berish.

Fonon – kristall panjara issiqlik tebranish energiyasining ortishi yoki kamayishi kvazizarrachalar koʻrinishidagi kvantlarning yutilishi yoki chiqishi bilan ifodalanadi.

Foton – elektromagnit maydon kvanti boʻlib. zaryadga ega boʻlmagan elementar zarracha.

Fotooʻtkazuvchanlik – yorugʻlik oqimi taʼsirida yarimoʻtkazgichlarda elektr oʻtkazuvchanligining oʻsishi.

Fotoelement – yorugʻlik energiyasini toʻgʻridan-toʻgʻri elektr energiyasiga aylantiruvchi yarimoʻtkazgichli qurilma.

Ekvipotensial sirt – maydonning hamma nuqtalaridagi potentsiallari bir xil boʻlgan sirt.

Elektron-kovakli oʻtish – ikki xil oʻtkazuvchanlikka ega boʻlgan yarimoʻtkazgichlar orasida boʻlgan oʻtish.

Kristall panjaraning elementar yacheykasi – kristall panjara tuzilishidagi eng kichik boʻlakcha boʻlib, shu boʻlakchani oʻz-oʻziga parallel holda uch oʻlchamli koordinatalar tizimida koʻchirilganda kristallning toʻliq shaklini hosil qiladi.

Emitter – tranzistor bazasiga zaryad tashuvchilarni injeksiyalab beruvchi.

Epitaksiya – monokristall sirtiga monokristall qatlam oʻstirish.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI:

1. Старосельский В.И. «Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники». Учебное пособие. – Москва: Издательство Юрайт, 2017. – 463 с.
2. Marius Grundmann. «The Physics of Semiconductors». Switzerland: Springer International Publishing. 3rd ed. 2016. P. 989.
3. Teshaboyev A. T., Zaynobidinov C.Z., Ismoilov K.A., Ermatov Sh.A., Abduazimov V.A. «Nanozarralar fizikasi, kimyosi va texnologiyalari». O'quv qo'llanma. – T.: Kamalak pres. 2014. – 368 b.
4. Peter YU Manuel Cardona. «Fundamentals of Semiconductors, Physics and Materials Properties». Spring-Verlag Berlin Heidelberg. 4th ed. 2010. P. 778.
5. Chihiro Hamaguchi. «Basic Semiconductor Physics». Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2nd ed. 2010. P. 570.
6. Carlo Jacoboni. «Theory of Electron Transport in Semiconductors». Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 1st ed. 2010. P. 590.
7. Пул-мл.Ч., Оуэнс Ф. «Нанотехнологии». Учебное пособие. –М.: Техносфера, 2010. – 336 с.
- 8 Bahodirxonov M.K., Qurbonova O'. H, Isayev F.M., Muradagayeva M.V. «Nanoelektronikaning fizik tushunchalari bo'yicha izohli lug'at». –T.: Meriyus, 2010. – 136 b.
9. Лебедев А.И. «Физика полупроводниковых приборов». – М.: Физматлит, 2008. – 488 с.

10. Бахадирханов М.К., Кобылин Г.О., Тачилин С.А. «Физика и технология солнечных элементов». Учебное пособие 1 и 2 часть. –Т.:NISIM, 2007. – 149 с.

11. Мартинес-Дуарт Дж.М., Мартин-Палма Р.Дж., Фчулло-Рueda Ф. «Нанотехнологии для микро и оптоэлектроники». Учебное пособие. – М.: Техносфера, 2007. – 368 с.

12. Simon M.Sze, Kwok K.Ng «Physics of Semiconductor Devices». John Wiley and Sons Ltd, United Kingdom. 3rd ed. 2006. P. 832.

13. Teshaboyev A., Zaynobidinov S., Musayev E.A. «Yarim o'tkazgichlar va yarim o'tkazgichli asboblarni texnologiyasi». O'quv qo'llanma. – T.: Talqin – Qaldirg'och, 2006. – 336 b.

14. Parmonqulov I.P., Umirzoqov B.Y. «Elektron texnika mahsulotlarini yig'ish texnologiyasi». O'quv qo'llanma. – T.: Voris-nashriyot, 2006. – 272 b.

15. Поклонский Н. А., Вырко С. А., Поденок С. Л. «Статистическая физика полупроводников». Курс лекций. – М.: ДомКнига, 2005. – 264 с.

16. Нормуродов М.Т., Умирзоқов Б.Е., Пармонкулов И.П. «Электрон техника материаллари ва қурилмалари технологияси». Дарслик. -Т.: Мехнат, 2004. – 362 б.

17. Мамадалимов А.Т., Турсунов М.Н. «Яримўтказгичли Қуёш элементлари физикаси ва технологияси». Ўқув қўлланма. –Т.: ЎЗМУ, 2003. – 104 б.

18. Пармонкулов И.П., Умирзоқов Б.Е., Шаҳобиддинов З.Н., Рисбаев А.С. «Электрон асбоблар ва қурилмалар ишлаб чиқариш технологияси». Ўқув қўлланма. – Т.: ТДТУ, 2002. – 136 б.

19. Тешабоев А.Т., Зайнабиддинов С.З., Эрматов Ш. «Қаттиқ жисм физикаси». Дарслик. –Т.: Молия, 2001. – 164 б.

20. Акрамов Х., Зайнабиддинов С., Тешабоев А. «Яримўтказ-гичларда фотоэлектрик ҳодисалар». Ўқув қўлланма. –Т.: Ўзбекистон, 1994. – 134 б.

Foydalanilgan internet saytlar ro'yxati:

1. <http://avnsite.narod.ru/physic/pp/index.htm>
2. <http://elanina.narod.ru/lanina/index.files/student/tehnology/text/gaas.htm>
3. <http://www.ad.ugatu.ac.ru/knbase/conten.htm>
4. <http://elanina.narod.ru/lnina/index/files/student/tehnologu/text/gaas/htm>
5. <http://solbaat.narod.ru/index.htm>
6. <http://www.ioffe.rssi.ru/journals/ftp/>
7. <http://www.intersolar.ru>
8. <http://www.courier.com.ru/energy>
9. <http://solarenergy.iatp.org.ua/index.htm>
- http://esco-escosys.narod.ru/2003_5/index.htm

MUNDARIJA

KIRISH.....	4
1. QATTIQ JISMLAR.....	5
1.1. Qattiq jismlar fizikasining asosiy tushunchalari	5
1.2. Qattiq jismlarning kristall panjaralari	15
1.3. Miller indekslari.....	24
1.4. Teskari elementar panjara	28
1.5. Qattiq jismlarda kimyoviy bogʻlanish	29
1.6. Kristall panjara nuqsonlari.....	33
2. QATTIQ JISMLARDA ELEKTRONLARNING ENERGETIK HOLATLARI.....	41
2.1. Elektronlarning atomlardagi energetik holatlari	41
2.2. Qattiq jismlarda elektronlarning energetik holati	45
2.3. Elektronning effektiv massasi.....	56
3. YARIMOʻTKAZGICH MATERIALLAR	64
3.1. Yarimoʻtkazgichlarning noyob xossalari	64
3.2. Yarimoʻtkazgich materiallarda kimyoviy bogʻlanish	72
3.3. Yarimoʻtkazgich materiallarida kristall panjara tuzilishi	76
3.4. Uch va toʻrt xil atomlardan tashkil topgan yarimoʻtkazgich materiallar	78

3.5. Yarimoʻtkazgich materiallaridagi nuqsonlar	81
3.6. Yarimoʻtkazgich materiallariga kirishma atomlarni kiritish usullari	85
3.7. Kirishma atomlar diffuziyasi	88
3.8. Kirishma atomlarning eruvchanligi	95
3.9. Binar yarimoʻtkazgich materiallarida kirishma atomlarning eruvchanligi.....	98

4. YARIMOʻTKAZGICHLARDA ZARYAD

TASHUVCHILAR STATISTIKASI.....	104
4.1. Yarimoʻtkazgichlarda tok oʻtkazish mexanizmi	104
4.2. Yarimoʻtkazgichlarda tok tashuvchilar tabiati	105
4.3. Fermi–Dirak taqsimoti.....	112
4.4. Elektr neytrallik tenglamasi	116
4.5. Xususiy yarimoʻtkazgichlar	119
4.6. Xoll effekti	122
4.7. Kirishma atomli yarimoʻtkazgichlarda Fermi sathi	125
4.8. Donor hamda akseptorli kirishma atomlari mavjud boʻlgan yari- moʻtkazgichlar	130
4.9. Birdan koʻp energetik sath hosil qiluvchi kirishma atomlari mavjud boʻlgan yarimoʻtkazgichlar	132

5. YARIMOʻTKAZGICHLARDA FOTOELEKTRIK

HODISALAR	139
5.1. Fotooʻtkazuvchanlik	139

5.2. Zaryad tashuvchilarning yashash vaqti	142
5.3. Nuqsonlarning zaryad tashuvchilarni yutish yuzasi	144
5.4. Rekombinatsion va fotosezgirlikni oshiruvchi nuqsonlar.....	147
5.5. Rekombinatsiya turlari	151
5.6. Yorug'likning yarimo'tkazgichlarda yutilishi yoki optik hodisalari	152
5.7. Yorug'likning yarimo'tkazgichlarda yutilish tabiati haqida qisqacha ma'lumot	156
5.8. Xususiy yutilishlar	157
 6. YARIM O'TKAZGICHLARDA KINETIK HODISALAR	162
6.1. Yarimo'tkazgichlarda kinetik hodisalar	162
6.2. Yarimo'tkazgichlarda zaryad tashuvchilarning harakatchanligi.....	164
6.3. Boltsman tenglamasi.....	167
6.4. Elektronlarning kristall panjara nuqsonlarida sochilishi.....	170
 7. METALL – YARIMO'TKAZGICH KONTAKTI VA $p-n$ O'TISII FIZIKASI.....	177
7.1. Qattiq jismlarda chiqish ishi	177
7.2. Metall – yarimo'tkazgich kontakti.....	179
7.3. Omik kontakt	184
7.4. Shottki diodi.....	185
7.5. Yarimo'tkazgichlarda $p-n$ o'tish.....	189
7.6. $p-n$ o'tish fizikasi.....	192
7.7. $p-n$ o'tishga tashqi manba ulangandagi holat.....	196

7.8. Geteroo`tishlar	200
7.9. Quyosh elementi	204
8. TRANZISTORLAR.....	216
8.1. Bipolyar tranzistorning tuzilishi	216
8.2. Tranzistorning dinamik holatda ishlashi	225
8.3. Maydonli tranzistorlari.....	227
8.4. Maydonli tranzistorlarning asosiy parametrlari.....	231
9. MIKROELEKTRONIKANING RIVOJLANISHIDA	
TEXNOLOGIYANING O`RNI	233
9.1. Kremniyli taglikka mexanik ishlov berish	235
9.2. Kremniy sirtini tozalash.....	236
9.3. Abraziv materiallar.....	238
9.4. Yarimo`tkazgich plastinkani jilvirlash	242
9.5. Fizikaviy va kimyoviy yog`sizlantirish usullari	249
9.6. Yemirilish tezligi	251
9.7. Implantatsiyaning amaliy uslublari	260
9.8. Fotolitografiya.....	263
9.9. Fotolitografiya jarayoni	267
9.10. Proyeksiyali eksponerlash	271
9.11. Nam kislorodli muhitda kremniyni qizdirib oksidlash	275
9.12. Tetraetaksisilan $Si(OC_2H_5)_4$ ning termik parchalanishidan oksid qatlam o`stirish.....	277
9.13. Bipolyar integral sxemalarni tayyorlash texnologiyasi.....	278

9.14. Metall – Oksid – Yarimo‘tkazgich (MOYa) - struktura asosidagi integral sxemalar texnologiyasi	283
9.15. Komplementar MOYa – KNS – integral sxema	286
9.16. Gibrid integral sxemalar tayyorlashning texnologik jarayonlari	292

10. NANO O‘LCHAMLI YARIMO‘TKAZGICHLAR

FIZIKASI.....	320
10.1. Nano fan yo‘nalishlari va qo‘llanilish sohalari.....	322
10.2. Mikrozarralarning to‘lqin xossalari	324
10.3. To‘g‘ri burchakli potensial to‘siqlarda elektronlar energiyasi	326
10.4. Nanoo‘lchamli moddalarning turlari.....	328
10.5. Nanoo‘lchamli kristallarda elektronlarning energetik sathlari va kvant holatlar zichligi.....	331
10.6. Yarimo‘tkazgichli o‘ta panjaralar.....	335
10.7. Nanoo‘lchamli strukturalarni hosil qilish usullari	337
10.8. Nanoo‘lchamli yarimo‘tkazgichlar asosidagi yangi elektron qurilmalar.....	342
10.9. Nanoklasterli kremniyning magnit xossalari	346

11.KREMNIYDA CHUQUR ENERGETIK SATH HOSIL

QILUVCHI KIRISIIMALAR ASOSIDA KUZATILADIGAN

FIZIK HODISALAR.....	364
11.1 Kompensatsiyalangan kremniyda fotoo‘tkazuvchanlikning infraqizil nur ta’sirida so‘nishi	364

11.2. Kompensatsiyalangan kremniyda fotoo'tkazuvchanlikning harorat ta'sirida so'nishi	367
11.3. Kompensatsiyalangan kremniyda fotoo'tkazuvchanlikning uzoq muddatli relaksatsiyasi va qoldiq o'tkazuvchanlik	369
11.4. Kompensatsiyalangan kremniyda manfiy magnit qarshilik	371
11.5. Kirishma atomlar bilan kompensatsiyalangan kremniyning tenzo xususiyatlari	372
11.6. Bir o'qli bosimning kompensatsiyalangan kremniydagi fotoo'tkazuvchanlik hodisasiga ta'siri	377
11.7. Har tomonlama gidrostatik bosimning kompensatsiyalangan kremniydagi kirishma atomlarining holatiga ta'siri	379
11.8. Kompensatsiyalangan kremniydagi past chastotali avtotebranishlar	384
11.9. Kompensatsiyalangan kremniydagi avtotebranishlarning dinamik xaos va gisterezis holati	386
11.10. Kompensatsiyalangan kremniydagi avtotebranishlarning tabiati va o'zaro bog'liqligi	388

12. KOMPENSATSIYALANGAN KREMNIY ASOSIDA

FIZIK KATTALIKLARNI O'LCHOVCHI DATCHIKLAR393

12.1. Infraqizil va oq nurlarni sezuvchi fotopriyo'mniklar.....	394
12.2. Kompensatsiyalangan kremniy asosidagi magnit maydon kuchlanganligini sezuvchi datchiklar	395
12.3. Kompensatsiyalangan kremniy asosida foton hisoblagich	396
12.4. Kompensatsiyalangan kremniy asosidagi harorat o'lchagich.....	398

12.5. Kompensatsiyalangan kremniy asosidagi tenzodatchiklar	400
12.6. Kompensatsiyalangan kremniy asosidagi qattiq jism generatorlari	402
12.7. Kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan avtotebranishlar asosida fizik kattaliklarni o'lovchi tubdan yangi funksional datchiklar	404
ILOVALAR	407
GLOSSARIY	452
FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI	457

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ТВЁРДЫЕ ТЕЛА	5
1.1. Основные понятия физики твердого тела.....	5
1.2. Кристаллические решетки твердых тел.....	15
1.3. Индексы Миллера	24
1.4. Обратная решетка	28
1.5. Химические связи в твердых телах.....	29
1.6. Дефекты кристаллической решетки	33
2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ	41
2.1. Энергетические состояния электронов в атомах	41
2.2. Энергетические состояния электронов в твердых телах.....	45
2.3. Эффективная масса электрона.....	56
3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ	64
3.1. Уникальные свойства полупроводников.....	64
3.2. Химические связи в полупроводниковых материалах	72
3.3. Строение кристаллической решетки в полупроводниковых материалах	76

3.4. Многоатомные полупроводниковые материалы	78
3.5. Дефекты в полупроводниковых материалах	81
3.6. Способы внедрения примесных атомов в полупроводниковые материалы	85
3.7. Диффузия примесных атомов	88
3.8. Растворимость примесных атомов	95
3.9. Растворимость примесных атомов в бинарных полупроводниковых материалах	98

4. СТАТИСТИКА НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА

В ПОЛУПРОВОДНИКАХ	104
4.1. Механизм переноса тока в полупроводниках	104
4.2. Природа носителей тока в полупроводниках	105
4.3. Распределение Ферми-Дирак	112
4.4. Уравнение электронейтральности	116
4.5. Собственные полупроводники	119
4.6. Эффект Холла	122
4.7. Уровень Ферми в примесных полупроводниках	125
4.8. Полупроводники с донорными и акцепторными атомами	130
4.9. Полупроводники с примесными атомами, создающими более чем один энергетический уровень	132

5. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

В ПОЛУПРОВОДНИКАХ	139
5.1. Фотопроводимость	139

5.2. Время жизни носителей заряда	142
5.3. Поверхностные поглощения	144
5.4. Центры рекомбинации и увеличения фотопроводимости	147
5.5. Типы рекомбинации	151
5.6. Поглощение света в полупроводниках или оптические явления	152
5.7. Поглощение света в полупроводниках	156
5.8. Собственные поглощения	157
 6. КИНЕТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ....	162
6.1. Кинетические явления в полупроводниках	162
6.2. Подвижность носителей заряда в полупроводниках	164
6.3. Уравнение Больцмана	167
6.4. Рассеяние электронов на дефектах кристаллической решетки	170
 7. КОНТАКТ «МЕТАЛЛ – ПОЛУПРОВОДНИК» И ФИЗИКА $p-n$ ПЕРЕХОДА	177
7.1. Работа выхода в твердых телах	177
7.2. Контакт «металл – полупроводник»	179
7.3. Омический контакт	184
7.4. Диод Шоттки	185
7.5. Технология получения $p-n$ перехода	189
7.6. Физика $p-n$ перехода	192
7.7. Состояние $p-n$ перехода при подключении внешнего источника	196

7.8. Гетеропереходы	200
7.9. Солнечный элемент	204
8. ТРАНЗИСТОРЫ.....	216
8.1. Структура биполярных транзисторов	216
8.2. Работа транзистора в динамическом режиме	225
8.3. Полевые транзисторы	227
8.4. Основные параметры полевых транзисторов	231
9. РОЛЬ ТЕХНОЛОГИИ В РАЗВИТИИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ.....	233
9.1. Механическая обработка кремниевых подложек	235
9.2. Очистка поверхности кремния	236
9.3. Абразивные материалы	238
9.4. Шлифовка полупроводниковой пластины	242
9.5. Физические и химические методы обезжиривания	249
9.6. Скорость травления	251
9.7. Практические способы имплантации	260
9.8. Фотолитография	263
9.9. Процесс фотолитографии	267
9.10. Проекционное экспонирование	271
9.11. Термическое окисление кремния в атмосфере влажного кислорода	275
9.12. Выращивание оксидных слоев термическим разложением тетраэтаксисилана $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$	277
9.13. Технология разработки ИС на биполярных транзисторах	278

9.14. Технология разработки ИС на основе структур металл – оксид – полупроводник (МОП).....	283
9.15. Комплементарные ИС на МОП – КНС	286
9.16. Технологические процессы разработки гибридных ИС	292

10. ФИЗИКА НАНОРАЗМЕРНЫХ

ПОЛУПРОВОДНИКОВ.....320

10.1. Направления и области применения нанoeлектроники.....	322
10.2. Волновые свойства микрочастиц	324
10.3. Энергетический спектр электронов в прямоугольной потенциальной яме	326
10.4. Наноразмерные материалы	328
10.5. Энергетический спектр электронов и плотность квантовых состояний в наноразмерных кристаллах	331
10.6. Полупроводниковые сверхрешетки.....	335
10.7. Способы создания наноразмерных структур	337
10.8. Новейшие электронные приборы на основе наноразмерных полупроводников.....	342
10.9. Магнитные свойства нанокластеров в кремнии	346

11. ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, НАБЛЮДАЕМЫЕ В КРЕМНИИ С ГЛУБОКИМИ ПРИМЕСНЫМИ УРОВНЯМИ.....364

11.1. ИК гашение фотопроводимости в компенсированном кремнии	364
--	-----

11.2. Температурное гашение фотопроводимости в компенсированном кремнии	367
11.3. Долговременная релаксация фотопроводимости и остаточная проводимость в компенсированном кремнии	369
11.4. Отрицательное магнитоспоротивление в компенсированном кремнии	371
11.5. Тензо свойства кремния, компенсированного примесными атомами	372
11.6. Влияние одноосного сжатия на фотопроводимость в компенсированном кремнии	377
11.7. Влияние всестороннего гидростатического сжатия на состояние примесных атомов в компенсированном кремнии	379
11.8. Автоколебания инфранизких частот в компенсированном кремнии	384
11.9. Динамический хаос и гистерезис автоколебания в компенсированном кремнии	386
11.10. Природа автоколебания в компенсированном кремнии	388
12. ДАТЧИКИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН НА ОСНОВЕ КОМПЕНСИРОВАННОГО КРЕМНИЯ	393
12.1. Фотоприемники ИК и интегрального излучения	394
12.2. Датчики магнитного поля на основе компенсированного кремния	395
12.3. Счетчики фотонов на основе компенсированного кремния ...	396

12.4. Температурные датчики на основе компенсированного кремния	398
12.5. Тензодатчики на основе компенсированного кремния.....	400
12.6. Твердотельные генераторы на основе компенсированного кремния	402
12.7. Новейшие функциональные датчик на основе автоколебаний в компенсированном кремнии	404
ПРИЛОЖЕНИЯ	407
ГЛОССАРИЙ	452
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	457

CONTENT

INTRODUCTION.....	4
1. SOLIDSTATES	5
1.1. Concepts of Solid State Physics.....	5
1.2. The crystal lattice of solids	15
1.3. Miller indices	24
1.4. Reverse lattice.....	28
1.5. Chemical bonds in solids	29
1.6. Defects in the crystal lattice.....	33
2. ENERGY STATES OF ELECTRONS IN SEMICONDUCTOR.....	41
2.1. The energy states of electrons in atoms	41
2.2. The energy states of electrons in solids	45
2.3. The effective mass of the electron	56
3. SEMICONDUCTOR MATERIALS	64
3.1. The unique properties of semiconductors	64
3.2. Chemical bonds in semiconductor materials	72
3.3. The structure of the crystal lattice in semiconductor materials	76
3.4. Polyatomic semiconductor materials	78
3.5. Defects in semiconductor materials	81

3.6. Methods for doping of impurity atoms in semiconductor materials ...	85
3.7. Diffusion of impurity atoms.....	88
3.8. The solubility of impurity atoms	95
3.9. The solubility of impurity atoms in the binary semiconductor materials	98
 4. STATISTICS OF CHARGE CARRIERS IN SEMICONDUCTORS.....	 104
4.1. The mechanism of current transport in semiconductors	104
4.2. The nature of the current carriers in semiconductors.....	105
4.3. Fermi Dirac distribution.....	112
4.4. The equation of electrical neutrality	116
4.5. Intrinsic semiconductor.....	119
4.6. Hall effect	122
4.7. The Fermi level in doped semiconductors	125
4.8. Semiconductors with donor and acceptor atoms	130
4.9. Semiconductors with impurity atoms, creating more than one energy level	132
 5. PHOTOELECTRIC PHENOMENA IN SEMICONDUCTORS	 139
5.1. Photoconduction	139
5.2. The lifetime of the charge carriers	142
5.3. Surface absorption	144
5.4. Recombination centers and increasing the photoconductivity.....	147
5.5. Types of recombination.....	151

5.6. The absorption of light in semiconductors and optical phenomena	152
5.7. Absorption of light in semiconductors	156
5.8. Intrinsic absorption	157

6. KINETIC PHENOMENA IN

SEMICONDUCTORS..... 162

6.1. Kinetic phenomena in semiconductors	162
6.2. Mobility of charge carriers in semiconductors	164
6.3. The Boltzmann equation	167
6.4. Scattering of electrons on the crystal lattice defects	170

7. CONTACT «METAL – SEMICONDUCTOR»

AND PHYSICS OF $p - n$ JUNCTION..... 177

7.1. The work function in solids	177
7.2. Contact «metal semiconductor»	179
7.3. Ohmic contact	184
7.4. Schottky Diode	185
7.5. Technology for producing $p - n$ transition	189
7.6. Physics of $p - n$ transition	192
7.7. Status of $p - n$ transition when connecting an external source	196
7.8. Heterojunctions	200
7.9. The solar cell	204

8. TRANSISTORS 216

8.1. Structure bipolar transistors	216
8.2. The transistor in dynamic mode	225
8.3. FETs	227

8.4. Basic parameters of FETs	231
-------------------------------------	-----

9. ROLE OF TECHNOLOGY IN THE DEVELOPMENT

OF MICROELECTRONICS.....233

9.1. Machining silicon wafers	235
9.2. Cleaning the surface of the silicon	236
9.3. Abrasives.....	238
9.4. Grinding wafer	242
9.5. Physical and chemical methods of degreasing.....	249
9.6. Etching rate	251
9.7. Practical ways of implantation.....	260
9.8 Photolithography.....	263
9.9. Photolithography process.....	267
9.10. Projection exposure.....	271
9.11. Thermal oxidation of silicon in an atmosphere of wet oxygen.....	275
9.12. Growing oxide layers by thermal decomposition tetraethoxysilane $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$	277
9.13. Development of IP technology bipolar transistors.....	278
9.14. Technology development of IP based structures of metal – oxide – semiconductor (MOS).....	283
9.15. Complementary MOS ICs KNS.....	286
9.16. Processes development of hybrid ICs	292

10. NANOSCALE SEMICONDUCTOR PHYSICS

INTRODUCTION320

10.1. Directions and applications of nanoelectronics	322
10.2. Wave properties of microparticles	324

10.3. Energy spectrum of electrons in a rectangular potential well	326
10.4. Nanoscale materials	328
10.5. Electron energy spectrum and the density of quantum states in nanoscale crystals	331
10.6. Semiconductor superlattices	335
10.7. How to create nanoscale structures.....	337
10.8. Novel electronic devices based on nanoscale semiconductors	342
10.9. Magnetic properties of nanoclusters in silicon	346

11. PHYSICAL PHENOMENA OBSERVED IN SILICON WITH DEEP IMPURITY LEVELS.....364

11.1. IR quenching of photoconductivity in compensated silicon.....	364
11.2. Thermal quenching of photoconductivity in compensated silicon.....	367
11.3. Long term relaxation of the photoconductivity and residual conductivity in compensated silicon.....	369
11.4. Negative magneto resistance in compensated silicon.....	371
11.5. Tenzo properties of silicon compensated impurity atoms.....	372
11.6. Influence of uniaxial compression on the photoconductivity in Compensatedsilicon.....	377
11.7. Influence comprehensive hydrostatic compression on the state of impurity atoms in silicon compensated	379
11.8. Self oscillations in the infra low frequency compensated silicon. .	384

11.9. Dynamic chaos and hysteresis oscillations in compensated silicon	386
11.10 Nature oscillations in compensated silicon	388
12. SENSORS OF PHYSICAL VALUES ON THE BASIS OF COMPENSATED SILICON	393
12.1. IR photodetectors and integral radiation	394
12.2. Magnetic field sensors based on compensated silicon	395
12.3. Photon counter based on compensated silicon	396
12.4. Temperature sensors based on compensated silicon	398
12.5. Load cells based on compensated silicon	400
12.6. Solid state oscillators based on compensated silicon	402
12.7. Latest functional sensor on the basis of self oscillations in compensated silicon	404
APPLICATIONS.....	407
GLOSSARY	452
LIST OF USED LITERATURE	467

M. K. BAXODIRXONOV, N. F. ZIKRILLAYEV, X. M. ILIYEV

YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI

Muharrir O.Jumaboyev
Dizayner A.Farmonov
Musahhih V.Ibragimova
Sahifalovchi H.Safaraliyev

Nashriyot litsenziyasi AI №
Bosishga 26.08.2020-yilda berildi. Qog‘oz bichimi 60x84 1/16
“Times New Roman” garniturasida ofset usulida bosildi.
Nashr bosma tabog‘i 30,0. Adadi 500.

“Tafakkur” nashriyotida nashrga tayyorlandi.
“Adad plyus” MChJ bosmaxonasida chop etildi.