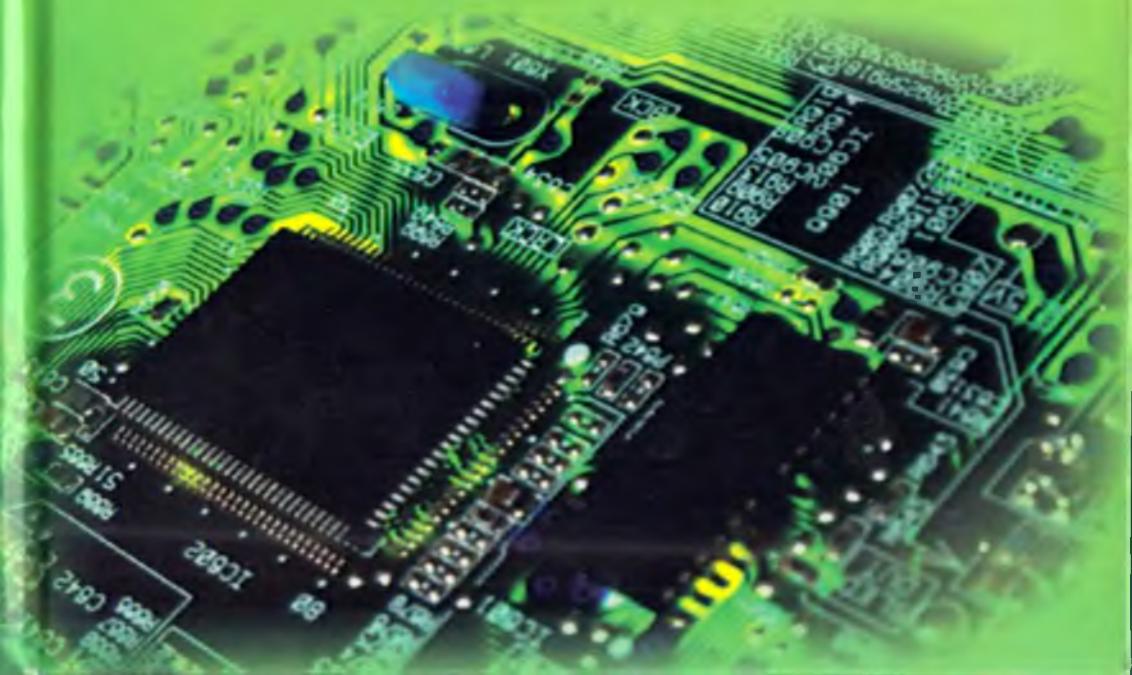


M. K. Baxodirxonov, N. F. Zikirillayev,  
X. M. Iliyev

# YARIM O'TKAZGICHLAR FIZIKASI



**O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI OLIY VA O'RTA MAXSUS  
TA'LIM VAZIRLIGI**

**TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA  
UNIVERSITETI**

**"ELEKTONIKA VA MIKROELEKTRONIKA"  
KAFEDRASI**

**M. K. Baxodirxonov, N. F. Zikirillayev,  
X. M. Iliyev**

# **YARIM O'TKAZGICHALAR FIZIKASI**

*(Darslik elektronika sohasiga qiziquvchilar, talabalar, magistlar,  
mustaqil tadqiqotchilar, o'qituvchilar va mustaqil o'rganiuvchilar uchun  
tavsiya etiladi)*

“Yarim o’tkazgichlar fizikasi” M. K. Baxodirxonov, N. F. Zikirillayev, X. M. Iliyev; – Toshkent 2016. 312 bet

Darslik fanning asosiy bo’limlarini aks ettirgan holda, XII bobdan tashkil topgan. Birinchi bobda yarim o’tkazgich materiallariga mansub bo’lgan qattiq jismlar kristall tuzulishi haqida asosiy tushunchalar berilgan. Ikkinci bobda yarim o’tkazgich materiallarida kristall panjara nuqsonlari, yarim o’tkazgichli materiallariga kirishma atomlari diffuzsiyasi va ularning eruvchanligi ko’rib chiqilgan. Uchinchi bobda yarim o’tkazgich materiallarida elektr o’tkazuvchanlik mexanizmi, xususiy va kirishmali yarim o’tkazgichlarda zaryad tashuvchilar statistikasi keltirilgan. To’rtinchi bobda yarim o’tkazgich materiallarining fotoelektrik xossalari ko’rib chiqilgan. Besinchi bobda elektronlarning energetik holatlari berilgan. Oltinchi - sakkizinchi boblarda yarim o’tkazgichlarda kinetik hodisalar metal - yarim o’tkazgich kontakt sohasi va p-n o’tish sohasidagi fizik jarayonlar, tranzistorlar tuzilishi va ishlashi yoritib berilgan. To’qqizinchi - o’n ikkinchi boblarda mikroelektronikaning rivojlanishida texnologiyaning o’rni, nano elektronika fizikasi va ular asosida fizik texnologiyaning o’rni, nano elektronika fizikasi va ular asosida fizik kattaliklarnin o’lchovchi dachiklar yaratish imkoniyatlari ko’rib chiqilgan. Yarim o’tkazgichlar fizikasi chuqur bilimga ega bo’lishi mikro- va nanoelektronika sohasi bo'yicha yetuk muhandis texnologlar, ilmiy tadqiqotchilar hamda pedagog kadrlar tayyorlashdagい muxim bosqichdir. Darslik texnika oily o’quv yurtlari talabalari, katta ilmiy xodim - izlanuvchilari va pedagoglarga mo’ljallangan.

### **Tuzuvchilar:**

**M.K. Boxodirxonov, N.F. Zikrillayev, X.M. Iliyev**

### **Taqrizchilar:**

**Nazirov D.E** – f-m.f.n., dotsent. O’zMU “Yarim o’tkazgichlar va polimerlar fizikasi” kafedrasи mudiri.

**Yusupov D.B.**- f.-m.f.d., professor. TDTU “Umumiy fizika” kafedrasи mudiri.

## Kirish

Butun dunyo fan va texnikaning rivojlanishida ayniqsa, hozirgi nanotexnologiya va nanoelektronika asarida yoshlар orasida elektronika faniga bo'lgan qiziqish tobora ortmoqda. Shuning uchun elektronika fanining asosi bo'lgan "Yarim o'tkazgichlar fizikasi" fanini qiziqarli, tushunarli va sodda tilda yozilgan adabiyotlarga talab kuchayib bormoqda. Ushbu o'quv qo'llanma oliy o'quv yurtlarida Fizika, Elektronika sohasi bo'yicha ta'lim olayotgan bakalavr va magistrlerga mo'ljallangan. O'quv qo'llanmada Elektronika va mikroelektronika asosi bo'lgan yarim o'tkazgichlar fizikasining Qattiq jismlar, Yarim o'tkazgich materiallari, Yarim o'tkazgichlarda tok o'tkazish mexanizmi, Yarim o'tkazgichlarda fotoelektrik hodisalar, Qattiq jismlarda elektronlarning energetik holatlari, Metall-yarim o'tkazgich kontakti va p-n o'tish fizikasi, yarim o'tkazgichlarda kinetik hodisalar boblari nazariyi va ko'proq fizikaviy tushunchalari yoritilgan. Har bir bobning so'ngida mavzularni chuqurroq o'zlashtirish maqsadida nazariy savollar berilgan hamda nazariy bilimlarni amaliy qo'llash uchun masalalar taqdim etilib, ularni yechish namunalari ham keltirilgan. O'quv qo'llanma o'zbek tili lotin grafikasida sodda va tushunarli qilib yozilganligi va ushbu shaklda chop etilgan darsliklarning deyarli mavjud emasligi o'quv qo'llanmaga bo'lgan talabni oshiradi.

# 1-BOB. QATTIQ JISMLAR

## 1.1 Qattiq jismlarning fizikasida asosiy tushunchalar

**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 aytildi.

Qattiq jismlar atom tuzulishiga 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 tuzulishga ega bo‘ladi. Tabiatda monokristallar (olmos, kvars) kam uchraydi. Odatda ular su’niy usulda olinadi.

**2. Polikristallar** – o‘lchovlari  $1\div100$  mkm li monokristall donachalardan tashkil topgan qattiq jismdir. Bunda monokristall atomlarning tartibli va davriy tuzulishi buzulishdan 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 o‘zlarining 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 ( $t = 0,1\div23$  K) o‘ta o‘tkazuvchanlik xossasiga ega bo‘ladi.

**Yarim o‘tkazgichlar** – elektr o‘tkazuvchanligi metallarnikidan ancha kam ( $\sigma = 10^3\div10^{10}$  ( $\text{Om/sm})^{-1}$ ), kirishma atomlar konsentratsiyasiga o‘ta sezgir, harorat pasayishi bilan elektr o‘tkazuvchanligi eksponensial qonuniyat bilan kamayadigan, past haroratlarda ( $t = 1\div2$  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 dielektrik bo‘lib, ma’lum harorat oraliq‘ida o‘z - o‘zidan poliyarizatsiyalanadigan - tashqi ta’sirga o‘ta sezgir qattiq jismlardir.

**Ferromagnit qattiq jismlar** - Kyuri haroratidan past haroratlarda ion yoki atomlar magnit momentlarining (metall bo'lmagan qattiq jismlarda) yoki jamlangan elektronlar magnit momentlarining (metallarda) ferromagnetik tartibi

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

**Quyidagi jadvallarda ba'zi o'tkazgichlarning ayrim xossalari keltirilgan:**

1.1 – jadval. O'tkazgichlarning solishtirma qarshiligi

№	O'tkazgichlar	$\rho$ -solishirma qarshilik xona haroratida $T=300\text{ K}$	
		$\text{Om} \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	$\text{Om} \cdot \text{m}$
		0.027	$2.7 \cdot 10^{-8}$
2	Volfram	0.055	$5.5 \cdot 10^{-8}$
3	Grafit	8.0	$8.0 \cdot 10^{-6}$
4	Temir	0.1	$1.0 \cdot 10^{-7}$
5	Oltin	0.022	$2.2 \cdot 10^{-8}$
6	Iridiy	0.0474	$4.74 \cdot 10^{-8}$
7	Konstantan	0.50	$5.0 \cdot 10^{-7}$
8	Litiyli po'lat	0.13	$1.3 \cdot 10^{-7}$
9	Magniy	0.044	$4.4 \cdot 10^{-8}$
10	Magnin	0.43	$4.3 \cdot 10^{-7}$
11	Mis	0.0172	$1.72 \cdot 10^{-8}$
12	Molibden	0.054	$5.4 \cdot 10^{-8}$
13	Neyzilber	0.33	$3.3 \cdot 10^{-8}$
14	Nikel	0.087	$8.7 \cdot 10^{-8}$
15	Nixrom	0.092	$1.12 \cdot 10^{-6}$
16	Qalay	0.12	$1.2 \cdot 10^{-7}$
17	Platina	0.107	$1.07 \cdot 10^{-7}$
18	Simob	0.96	$9.6 \cdot 10^{-7}$
19	Qo'rg'oshin	0.208	$2.08 \cdot 10^{-7}$
20	Kumush	0.016	$1.6 \cdot 10^{-8}$
21	Chuyan	1.0	$1.0 \cdot 10^{-6}$
22	Rux	0.059	$5.9 \cdot 10^{-8}$

1.2 – jadval. Moddalani o‘ta o‘tkazuvchanlik holatiga o‘tish harorati  
va kirishma atomlari

Element	Kritik harorat $T_c$ K	$H_c$ Gs
Al	1,196	99
Cd	0,56	30
Ga	1,091	51
Hf	0,09	—
Hg		
$\alpha$ (romboedr)	4,15	411
In	3,4	293
Ir	0,14	19
La $\alpha$	4,9	798
Mo	0,92	98
Nb	9,26	1980
Os	0,655	65
Pa	1,4	—
Pb	7,19	803
Re	1,698	198
Ru	0,49	66
Sn	3,72	305
Ta	4,48	830
Tc	7,77	1410
Th	1,368	162
Ti	0,39	100
Tl	2,39	171
U $\alpha$	0,68	—
U $\gamma$	1,8	—
V	5,3	1020
W	0,012	1
Zn	0,875	53
Zr	0,65	47

1.3 - jadval. Eng asosiy yarimo tkazzich materiallarning parametrlari

	Ge	Si	GaAs	Gap	CdS	CdTe	ZnS	ZnS
Atomlar soni ( $\text{sm}^{-3}$ )	$4,42 \cdot 10^2$ $0^{22}_2$	$5,0 \cdot 10^2$ $2^{22}_2$	$4,42 \cdot 10^2$ $2^{22}_2$	$5,02 \cdot 10^{22}$ $4 \cdot 10^{22}$	$1,46 \cdot 10_{22}$	$1,46 \cdot 10_{22}$	$5 \cdot 10^{22}$	
Atom massasi g/mol	72,6	28,09	144,63	100,7	144,46	240	97,45	
Teshilish kuchlanishi V/sm	$\sim 10$	$\sim 3 \cdot 10$	$\sim 4 \cdot 10$					
Kristall strukturası								
Zichligi g/sm <sup>3</sup>	5,3267	2,328	5,32	4,07	4,82	5,86	4,09	4,1
Solishtirma dielektrik singdiiruvchanlik	16	11,9	13,1	11,1	5,4	10,2	5,2	
O'tkazuvchanlik sohasida effektiv holatla rzichligi $N_c \text{ sm}^{-3}$	$1,04 \cdot 10_0^{19}$	$2,8 \cdot 10_9^1$	$4,7 \cdot 10^{17}$	$8,6 \cdot 10^{19}$	$1,04 \cdot 10_0^{19}$	$2,1 \cdot 10^{19}$	$2,9 \cdot 10^{19}$	$2,9 \cdot 10_9^{10}$
Valent sohasida effektiv zichligi $N_{V_c}$ sm <sup>-3</sup>	$6,0 \cdot 10_8^1$	$1,04 \cdot 10_0^{19}$	$7,0 \cdot 10^{18}$	$5,2 \cdot 10^{19}$	$8,32 \cdot 10_0^{19}$	$9,6 \cdot 10^{19}$	$1,42 \cdot 10_{19}^{10}$	$1,42 \cdot 10_{19}^{10}$
Xususiy yarim o'tkazgichni solishtirma qarshiligi $\Omega \cdot \text{sm}$	47	$2,3 \cdot 10^5$	10	$4,16 \cdot 10^{10}$	$5,26 \cdot 10_0^{10}$	$1,4 \cdot 10_0^{10}$	$1,8 \cdot 10^{10}$	

1.4 – jadval. Yarimo'tkazgich materiallar

Material	Element yoki birikmalar	Nomlanishi	Kristal strukturasi	Panjara doimiysi ( $\text{\AA}^3$ ) 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	Karbít Kremniy	W	a=3,086; c=15,117
III-V	AlAs	Arsined Alyuminiy	Z	5,6605
	AlP	Alyuminiy Fosfid	Z	5,451
	AlSb	Alyuminiy Antimonidi	Z	6,1355
	BN	Bor Nitrit	Z	3,615
	BP	Bor Fosfid	Z	4,538
	GaAs	Galiy Arsinet	Z	5,6533
	GaN	Galiy Nitrit	W	a=3,189; c=5,185
	GaP	Galiy Fosfid	Z	5,4512
III-V	GaSb	Galiy Antimonidi	Z	6,0959
	InAs	Indiy Arsenit	Z	6,0584
	InP	Indiy Fosfid	Z	5,8686
	InSb	Indiy Antimonidi	Z	6,4794
II-VI	CdS	Kadmiy Sulfid	Z	5,832
	CdS	Kadmiy Sulfid	W	a=4,16; 6,756
	CdSe	Kadmiy	Z	6,05

		Selenid		
IV-VI	CdTe	Kadmiy Tellurid	Z	6,482
	ZnO	Rux Oksid	R	4,58
	ZnS	Rux Sulfid	Z	5,42
	ZnS	Rux Sulfid	W	a=3,82; c=6,26
	PbS	Qo'rg'oshin sulfid	R	5,9362
	PbTe	Qo'rg'oshin tellurid	R	6,462
	PbSe	Qo'rg'oshin selenid	R	6,12

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

### 1.5 – jadval. Dielektriklar

Dielektriklar	Solishtirma elektr qarshiligi $\rho$ (Om·m) (T=300K)	Dielektriklar	Solishtirma elektr qarshiligi $\rho$ (Om·m) (T=300K)
Bakelit	$10^{16}$	Pleksiglas	$10^{13}$
Benzol	$10^{15} \dots 10^{16}$	Polistirol	$10^{16}$
Qog'oz	$10^{15}$	Polixlorvinil	$10^{13}$
Distrangan 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	$10^{11}$
Ho'l yer	$10^2$	Shisha	$10^{10} \dots 10^{13}$
Kvars shisha	$10^{16}$	Transformator	$10^{14}$
Kerosin	$10^{10} \dots 10^{12}$	yog'i	$10^5$
Mramor	$10^8$	Farfor	$10^{16} \dots 10^{18}$
Parafin	$10^{14} \dots 10^{16}$	Shifer	
Parafin yog'	$10^{14}$		

1.6 – jadval. Ba’zi kimyoviy moddalarning fazaviy o’tish harorati

Moddalar	Kimiyoiy Formulası	Faza-viy o’tish haro-rati T °C.	Maksimal spontan qutblanish P(mkKl·s m <sup>-2</sup> )	Simmetriyalarning nuqtaviy guruhlari	
				Qutbsiz faza	Qutbli faza
Bariy titanati	BaTiO <sub>3</sub>	133	25	m3m	4mm
Tuz segneti	KNaC <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>6</sub> ·4H <sub>2</sub> O	-18-24	0,25	222	2
Triglitsinsulfat	(NH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> C(OOH) <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	49	2,8	2/m	2
Kaliy Digidrofosfati	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	-150	5,1	m	2
Kaliy Dideytero-fosfati	KD <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	-51	6,1	m	2
Lity niobati	LiNbO <sub>3</sub>	1210	50	m	3m
Ammoniy ftorberrilati	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> BeF <sub>4</sub>	-97	0,15	mmm	2
Godolin molibdati	Gd <sub>2</sub> (MoO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	159	0,18	m	2
Vismut titanat	BiTi <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	675	–	4mmm	M

1.7 – jadval. Ferromagnetiklar uchun ferromagnit Kyuri haroratining qiymatlari

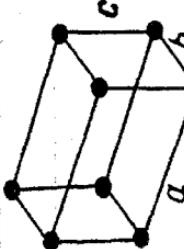
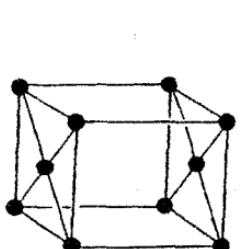
Modda	Kyuri haroratida $T_c$ , °C	Modda	Kyuri haroratida $T_c$ , °C
RbNiF <sub>3</sub>	139	GdFe <sub>2</sub>	789
CsNiF <sub>3</sub>	150	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	858
Gd <sub>3</sub> Fe <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	564	SmCO <sub>2</sub>	1020
MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	713		

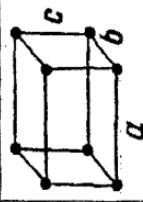
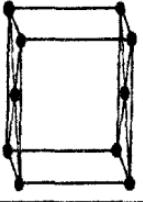
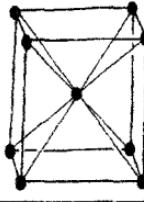
## 1.2. Qattiq jismalarning kristall panjaralari

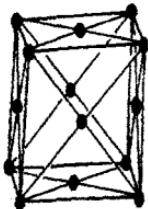
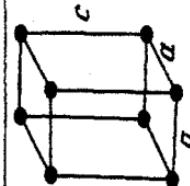
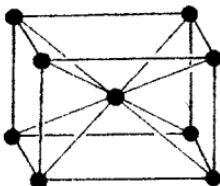
**Kristall** deganda, qattiq jismni tashkil etgan atomlarning tartibli va davriy joylashganini tushunamiz. Bunda atomlar fazoda bir- birlari bilan har xil burchaklardagi 3 ta yo‘nalish bo‘ylab davriy joylashgan bo‘ladi. Kristallardagi xohlagan atomni olib eng yaqin qo‘shti atomlar asosida tuzilgan (a,b,c) hajmga ega bo‘lgan geometrik shakl bu berilgan kristallning elementar yachevkasi deb ataladi. Demak, bu elementar yacheykani a,b,c yo‘nalishlar bo‘yicha ko‘chirish hisobiga xohlagan o‘lchovdagi kristall hosil qilish mumkin. Elementar yacheyka asosini tashkil etgan (a,b,c) yo‘nalish bo‘yicha vektorlar kattaligi kristall panjara doimiysi deb ataladi. Demak, kristallning eng kichik bo‘linmaydigan xolati bu elementar yacheyka bo‘lib xizmat qiladi.

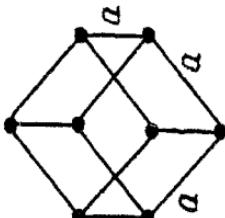
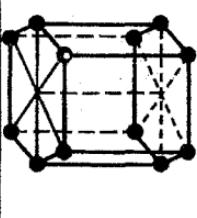
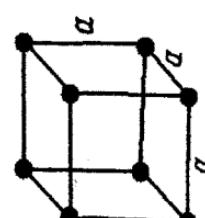
Kristall panjaraning atomlarining a,b,c yo‘nalishlari orasidagi burchaklar ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) va a,b,c yo‘nalishlar qiymatiga qarab kristall panjaralar tuzilishini 14 xilga bo‘lish mumkin. Bularni Bravi elementar yacheykalar deb ataladi. Bu 14 xil kristall yacheykalarni 7 ta guruhga ajratiladi.

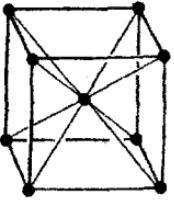
1.8 – jadval Panjara turlari – Bravye panjaraları

<p><b>uz.Triklin panjara</b> ru.Триклини́йная решётка en.Triclinic lattice</p>	<p>To‘g‘ri burchaklari bo‘lmagan, qirra uzunliklari turliча bo‘lgan geometrik shakldagi panjara.</p> 	<p><math>a \neq b \neq c</math> <math>\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ</math></p>
<p><b>uz.Monoklin panjara</b> ru.Монокли́н наярешётка en.Monoclinic lattice</p>	<p>Qirra uzunliklari (a,b,c) turlicha bo‘lgan, a va c hamda b va c tomonlar órtasidagi burchak <math>90^\circ</math>, ammo a va b tomon orasidagi burchak <math>90^\circ</math> ga teng bo‘lmagan panjara.</p> 	<p><math>a \neq b \neq c</math> <math>\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma</math></p>
<p><b>uz.Asosi markazlashgan monoklin panjara</b> ru.Монокли́н наярешётка с центрированиими основаниями en.Basecentered monoclinic lattice</p>	<p>Monoklin panjaraning asoslari markazlarida atom joylashgan bo‘ladi.</p> 	<p><math>a \neq b \neq c</math> <math>\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma</math></p>

<b>uz.Rombik panjara</b> <b>ru.Ромбическая</b> <b>решётка</b>  <b>en.(Ortho)rhombic lattice</b>	<p>Shakli to‘g‘ni burchakli parallelepipeddan iborat panjara.</p> 	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
<b>uz.Asosimarkazlash-gan rombik panjara</b> <b>ru.Ромбическая</b> <b>решётка с</b> <b>центрированием</b> <b>основаниями</b>  <b>en.Base centered rhombic lattice</b>	<p>Rombik panjaraning asoslari markazlarida atom joylashgan bo‘ladi.</p> 	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
<b>uz.Hajmi markazlash-gan rombik panjara</b> <b>ru.Ромбическая</b> <b>решёткаобъёмноцентрированной</b>  <b>en.Body-centered rhombic lattice</b>	<p>Rombik panjaraning markazida atom joyashgan bo‘ladi.</p> 	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

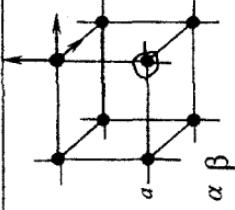
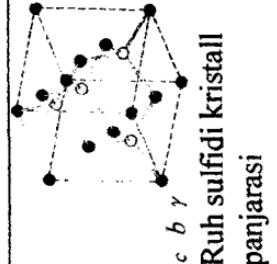
uz. Tomonlari markazlashgan rombik panjara	Rombik panjaraning tomonlari markazla-rida atom joylashgan bo'jadi.	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
ru. Ромбическая решётка гра нен. Face-centered rhombic lattice		
uz. Tetragonal panjara	Asosi kvadrat bo'lgan to 'g' ri burchakli parallelepiped shaklidagi panjara.	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
ru. Тетрагональная решётка en. Tetragonal lattice		
uz. Hajmi markaz- lashgan tetragonal panjara	Tetragonal panjaraning markazida atom joylashgan bo'jadi.	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
ru. Тетрагональная решётка объёмно- центрированная en. Body-centered tetragonal lattice		

<p><b>uz.Romboedrik panjara(Trigonal panjara)</b>  <b>ru.Ромбоэдрическая (Тригональная) решётка</b>  <b>en.Rhombohedral (trigonal) lattice</b></p>	<p>Tomonlari bir-biriga teng, burchaklari ham bir-biriga teng va <math>90^\circ</math> ga teng bo'lmagan geometrik shakldagi panjara yoki asoslari va tomonlari romblardan iborat bo'lgan panjara.</p> 	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
<p><b>uz.Geksagonal panjara</b>  <b>ru.Гексагональная решётка</b>  <b>en.Hexagonal lattice</b></p>	<p>Asosi to'g'ri olti burchakli prizma shaklidagi panjara.</p> 	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$
<p><b>uz.Kubik panjara (Oddiy kub panjara)</b>  <b>ru.Кубическая решётка</b>  <b>en.Cubic lattice</b></p>	<p>Shakli kub ko'rinishidagi panjara.</p> 	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

	uz. Hajmi markazlashgan kub ru. Кубическая ре-шётка объемноцентрированная en. Body-centered cubic lattice	Shakli kub ko'rinishidagi ammo markazi-da bitta atom joylash-gan panjara. $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
uz. Tomonlari markazlashgan kub ru.Кубическая решёткаграникоцентрированная en.Face-centered cubic lattice	Shakli kub ko'rinishidagi ammo kubning olti tomonlari o'rtalarida bittadan atom joylashgan panjara. $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	

Elementar yacheykalar o‘z ichiga olgan atomlar soniga qarab, oddiy va murakkab (atomlar zich joylashgan) turlarga bo‘linadi.Ular quyidagi jadvalda keltirilgan:

### 1.9 – jadval

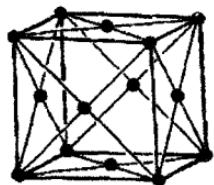
uz.Elementar kristall panjara ru.	Kristall panjara doimiy ( $a, b, c$ ) lar asosida qurilgan eng kichik panjadarid. Elementar kristall panjarani 3 xil yo‘nalishga o‘z-o‘ziga mos ravishda siljitish orqali xohlagan o‘lchamdagি kristallni olish mumkin. en.Elementary crystal lattice	
uz.Murakkab kristall panjara ru.	Elementar panjaraning nafaqat tugunlarda, balki (uning yon tomonida va ichida) tugunlilararo va hajmda atomlar joylashgan bo‘ladi.Masalan oddiy kub panjarada bitta atom tegishli bo‘lsa, hajmi markazlashgan panjaraga 2ta atom, tomonari markazlashgan panjaraga 4ta atom tegishli bo‘ladi. Panjarada atomlar soni $N = \frac{A}{8} + \frac{B}{4} + \frac{C}{2} + D$ en.Complex crystal lattice	 Ruh sulfidi kristall panjarsi

Elementar yacheyka o‘z ichiga olgan atomlar sonini quyidagicha hisoblab topiadi:

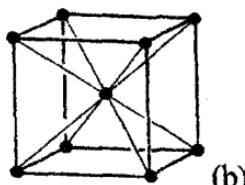
Masalan, kub elementar yacheykada har bir tugunda joylashgan atom bir vaqtning o‘zida xuddi shunday 8 ta elementar yacheyka tuzulishida ishtirok etganligi uchun tugunda joylashgan atomlar soni A ni topish uchun 8 ga bo‘lish lozim. A/8 bo‘ladi.

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

Agar kub yacheyka tomonlari markazlashgan bo‘lsa (1.1a rasm), unda tomonlarda turganatom 2 ta shunday elementar yacheyka tuzulishida qatnashayotgani uchun undagi atomlar soni B ning yarmi ya’ni B/2 shu ko‘rilayotgan elementar yacheykaga tegishli 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 C bo‘lsa, unda bu yacheykaga tegishli atomlar soni C/4 bo‘ladi. Agar kub panjara hajmiy markazlashgan bo‘lsa, (1.1b rasm), uning hajmidagi atom faqat shu yacheykaga tegishli bo‘ladi.



(a)



(b)

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

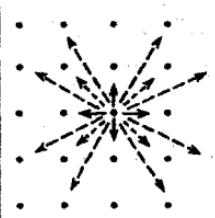
Shunday qilib, biz o‘rganayotgan har qanday elementar yacheykaga tegishli atomlar sonini quyidagicha aniqlash mumkin:

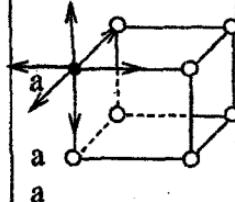
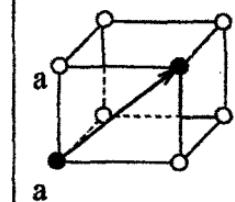
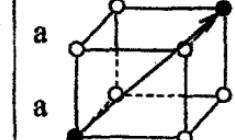
$$N = A/8 + C/4 + B/2 + D \quad (1.1).$$

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

Ular haqidagi ma'lumotlar jadvalda keltirilgan:

**Koordinatsion son. Yaqin va uzoq tartib 1.10 – jadval**

<b>uz.Koordinatsion son</b> <b>ru.Координационное число</b> <b>en.Koordination number</b>	<p>Kristalldagi har qanday atomning eng yaqin qo'shnilari soni. Qo'shnilar ko'rileyotgan atomga nisbatan yaqin, uzoq va yanada uzoq bo'lishi mumkin. Bunday qo'shnilar soni va ular o'rtaqidagi masofa kristalldagi barcha atomlar uchun doimo bir xil bo'ladi.</p> <p>Bunday qo'shnilar 1, 2, 3, ..., n-tartibli qo'shnilar yoki 1, 2, 3, ..., n-tartibli koordinatsion sonlar deyiladi. Har bir koordinatsion tartibli koordinatsion qo'shni soni va ular o'rtaqidagi masofa hamma atom uchun bir xil va o'zgarmas bo'ladi. Bu kristall asosi hisoblanadi.</p>	
-------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------

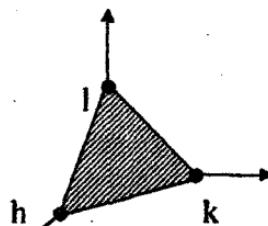
uz.1-tartibli koordinatsionson ru.Координационное число первого порядка en.Koordination number of first order	Kub kristall panjarada 1-tartibli koordinatsion sonlar soni 6 ta bo'lib ular orasidagi masofa $d = a$ , ya'ni panjara doimiyisiga teng.	
uz.2-tartibli koordinatsionson ru.Координационное число второго порядка en.Koordination 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.Координационное число третьего порядка en. Koordination 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, ya'ni mavjud emas.

### 1.3. Miller indekslari

Kristallar ta'biy bo'lsin, yoki sun'iy yo'l bilan olingan bo'lsin ular bir xil atomlardan ( olmos, Ge, Si ) yoki 2-3 xil atomlardan tuzilgan bo'lishadi. (NaCl, LiF, GaAs). Demak, kristallar monoatomlik yoki murakkab atomlik kristallarga bo'linadi. Kristallarda atomlar joylashgan

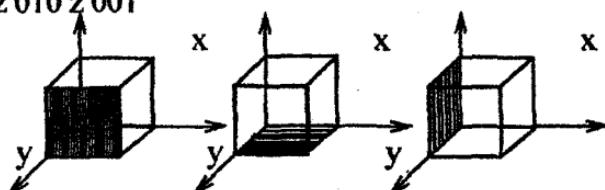
tekislik va uning yo'nalishini aniqlash nafaqat kristallning fizik xossalariiga balki, ular asosida yaratiladigan elektron asboblarining xossalariiga ham ta'sir etadi. Kristall panjara tekisliklari odatda Miller indekslari (belgilari) bilan aniqlanadi. Bunda ko'rileyotgan tekislikning koordinata o'qlari 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 doimiyлари) 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 ). Unda ( 2; 4; 1 ) Miller indekslari hisoblanadi. Odatda bularni  $(h, k, l)$  bilan belgilanadi. Bu Miller indekslari alohida yoki o'zaro parallel bo'lgan tekisliklar majmuasini ifoda etadi.



1.2 – rasm. Miller indekslari.

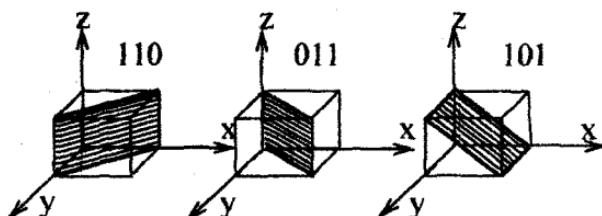
X o'qiga perpendikulyar bo'lgan tekisliklar  $(1; 0; 0)$  belgisi bilan, y o'qida esa  $(0; 0; 1)$  indekslari bilan ifodalanadi.

$z\ 100\ z\ 010\ z\ 001$



1.3. – rasm. x, y va z o'qlariga perpendikulyar 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'qqa parallel, qolgan o'qlarni bir xil masofada kesgan tekisliklarning ko'rinishi.

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



**1.5 – rasm.** Tekislikni 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 indekslarining ustiga manfiy belgisi qo'yildi. Masalan  $x$  o'qining manfiy qiymatini kesgan tekislik  $(\bar{h}, k, l)$  yoki  $x, y, z$  o'qlarining manfiy qiymatlarini kesgan tekislikni  $(\bar{h}, \bar{k}, \bar{l})$  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 kattalikdagagi kristall panjarani hosil qilish

mumkin. Buning uchun vektorlarni o'z yo'nalishlari bo'yicha xohlagan ko'chirilganda hosil qilingan kristall panjara hajmi quyidagicha ifodalanadi:

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

Kristallardagi elektronlarning energetik holatini to'laroq tasavvur qilish uchun hamda kristallarda rentgen nurlarining difraksiyasini chuqurroq tushunish uchun teskari elementar panjara tushunchasi kiritilgan. Teskari panjarani asosiy vektorlari quyidagicha aniqlanadi:

$$\bar{A} = 2\pi \frac{\bar{b} \times \bar{c}}{\bar{a} \cdot \bar{b} \times \bar{c}}, \bar{B} = 2\pi \frac{\bar{a} \times \bar{c}}{\bar{b} \cdot \bar{a} \times \bar{c}}, C = 2\pi \frac{\bar{a} \times \bar{b}}{\bar{c} \cdot \bar{a} \times \bar{b}} \quad (1.3)$$

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

$$V = \frac{(2\pi)^3}{V_{toga}} \text{ ga teng} \quad (1.4)$$

Agar biz tomonlari  $a$  ga teng bo'lgan kub kristall panjarani olsak, unga teskari panjara tomonlari (2) formulaga 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 Bravye panjarasidagi ixtiyoriy tugundan to'g'ri chiziq orqali yaqin tugunlarni birlashtiriladi. Undan so'ng bu chiziqlarni teng ikkiga bo'ladi 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 Bravye panjarasi uchun Vigner - Zeyts yacheykasi.*

Teskari elementar panjara Bravye panjarasidagi barcha simmetriya elementlarini o'z ichiga oladi. Shuning uchun ham teskari elementar panjara ichida elektron o'zining barcha energetik holatlariiga ega bo'ladi va bu panjara bilan chegaralangan hajmni birinchi Brauen 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 tabiatini qanaqa? Qattiq jismlarda kimyoviy bog'lanishni tabiatiga ko'ra asosan 4- xilga bo'lishi mumkin-metal bog'lanishlar, ion bog'lanishlar, kovalent bog'lanish va Van-der-Vaals bog'lanishlar. Kimyoviy bog'lanishlarni tabiatini shuni ko'rsatadiki, qanday turdag'i 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, 8- 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, bularning 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.



erkin elektronlar



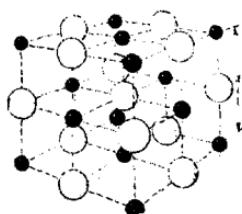
+ kristall panjara tugunlarida joylashgan ionlar



**1.8 – rasm.** Metall bog'lanish.

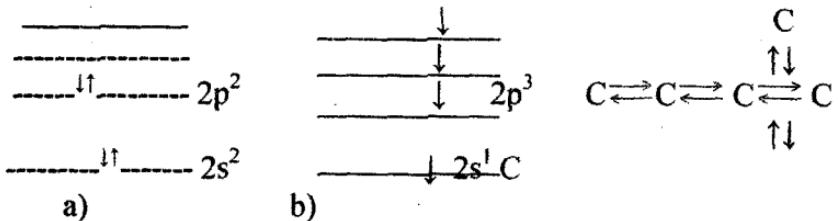
**Ion bog'lanishda** - kristallni tashkil etgan atomlarning biri o'zining elektronlar bilan to'ldirish mumkin bo'lmasigan tashqi valent elektronini ikkinchi atomga berish yo'li bilan musbat ionga aylanib elektron qobig'ini to'ntaradi. Ikkinchi atom esa, olgan elektron hisobiga o'zining tashqi elektron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

- -Na(Natriy)ioni
- -(Xlor) ioni



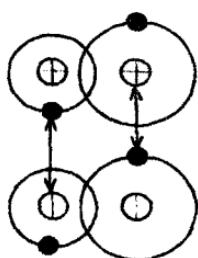
**1.9 – rasm.**  
*Ion bog'lanish.*

**Kovalent bog'lanish** - buni gomopolyar bog'lanish deb ham atashadi. Bunday bog'lanishda kristalldagi qo'shni atomlar qaramaqarshi spinga ega bo'lgan valent elektronlar ikkita atom orasida umumiy bo'lishi bilan elektron qobig'lar 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 elektroneytal holda bo'lishi bilan birga valent elektronlar kimyoviy bog'lanishi qatnashadi, 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 uni tashqi elektron qobig'ida elektronlar  $2s^2 2p^2$  holatda joylashgan bo'ladi (rasm 1-a) uglerod kristallida esa, kristall panjara potensial maydoni ta'sirida valent elektronlar boshqacha joylashadi (rasm 1-b).



### *1.10 - rasm. Kovalent bog'lanish.*

Endi bu atom o'zining to'limgan 2s va 2p satihlarida, spinlari qarama-qarshi bo'lgan to'rt qo'shnisidan elektronlar olish yo'li bilan, o'zining tashqi elektron qobigiga elektronlar soni 8 taga yetkazadi ya'ni  $2s^2 2p^6$  ko'rinishda bo'ladi. Bunday kovalent bog'lanishda qatnashayotgan barcha atomlarning elektron qobig'lari to'ladi va uglerod atomlarining barcha valent elektronlari kimyoviy bog'lanishda ishtirok etadi. Bun bog'lanish ancha 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 ( $T \sim 1 \div 4K$ ) 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.



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

### **1.6 Kristall panjara nuqsonlari**

**Kristall panjara nuqsonlari**-bu kristallardagi atomlarning davriylik va tartibli joylashishining buzilishiga aytildi. Nuqsonlarni ularning geometrik o'chovlariga ko'ra uch turga bo'lish mumkin-

nuqtaviy, chiziqli va hajmiy. Nuqtaviy nuqsonlarga geometrik o'chovlari, panjara doimisiidan uncha katta bo'limgan 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 nuqsondir. Chunki, o'zlarining atom radiusi va massasi bilan asosiy atomlardan farq qilgani uchun ular hatto panjaradagi asosiy atom o'mini egallagan bo'lsa, uning atom radiusini 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  $(5 \div 10)10^{19} \text{ sm}^{-3}$  miqdorda bo'ladi.

2. Vakansiya— ya'ni kristall panjara tugunidagi atomning bo'shab qolgan o'rni. 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'midan ketishi, tugunlar orasiga joylashishi hisobiga vakansiya paydo bo'ladi. Bunday vakansiyalarining berilgan haroratdagi konsentratsiyasi

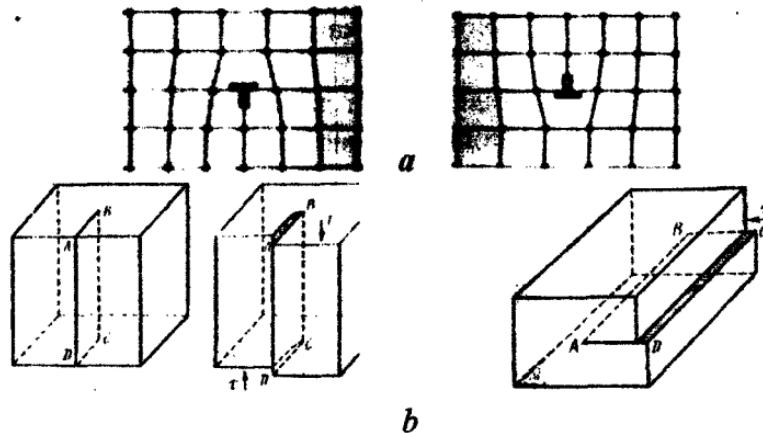
$$N_V = N_s \cdot e^{-\frac{E_V}{kT}} \quad (1.5)$$

Ifoda bilan aniqlanadi. Bu erda  $N_s$ - kristallardagi atomlar konsentratsiyasi,  $E_V$ - vakansiya paydo bo'lishi uchun kerak bo'lgan energiya,  $E_V$ ning qiymati kristallar tabiatini, kimyoiy bog'lanishlar turiga qarab  $E=1 \div 5 \text{ eV}$  atrofida bo'ladi. Ion kristallarda (NaCl) vakansiyalar, qaysi atom o'miga paydo bo'lishiga qarab, ularni tabiatini 2 xil bo'ladi.

3. Kristallarga katta energiyaga ega bo'lgan radio faol nurlar ( $\alpha\beta\gamma$ ) lar ta'sir qilganda ham nuqtaviy nuqsonlar hosil bo'ladi. Bunday nuqsonlarni radiyatsion nuqsonlar deb ataladi. Bunda, energiyasi atomlarning kristalldagi bog'lanish energiyasidan juda katta bo'lgan elektron, neytron yoki  $\gamma$  nurlari atomlar bilan to'qnashib ularni o'z joyidan chiqarib tashlaydi. Natijada, tugunlararo atomlar paydo bo'ladi. Bularni birlamchi radiyatsion nuqsonlar deb ataladi. Radiyatsiya ta'siri uzoq bo'lgan holatlarda, bunday vakansiya va tugunlar aro atomlar o'z aro uchrashib divakansiya yoki ko'proq vakansiyalar to'planishi, hisobiga ikkilamchi radiyatsion nuqsonlarni hosil qiladi. Radiyatsion

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

**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'limgan holda, ularning 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 qilish bilan ustki kristall tekisligining ostgi tekisligiga nisbatan siljigan hisobiga hosil bo'ladi.



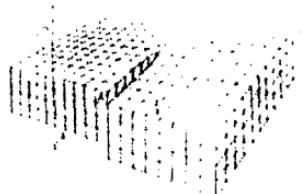
**1.12 - rasm. Chiziqli dislokatsiya (a),  
Siljish yuzaga kelgan chiziqli dislokatsiya (b).**

Buramali dislokatsiya – kristallning bir qismini ikkinchi qismiga ko'ra parallel, ammo qarama-qarshi kuch yo'nalishi bo'yicha deformatsiya qilingan holatda yuzaga keladi. Bu quydagি rasmda o'z aksini topgan (buyerda  $\tau$ -siljish vektori).

Demak, buramali va chegaraviy dislokatsiyalar kritallarning bir qismini ikkinchi qismiga nisbatan siljigan chegaralardir. Bun day siljish kuchlarining vektorlari chegaraviy dislokatsiyalarda perpendikulyar, buramali dislokatsiyalarda parallel bo'ladi. Deformatsiya vaqtida kristallning deformatsiyaga uchragan qismining deformatsiyaga uchramagan qismiga nisbatan siljishi natijasida chegarasi yuzaga keladi, bu chiziq dislokatsiya deb ataladi. Odatdagи kristallarda mavjud

bo'limagan 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 xossalariini o'zgartiradi.

Hajmiy nuqsonlarga - asosan, kristall ichida yuzaga keladigan kirishma atomlarini klasterlari kiradi. Klaster - bu ma'lum konsentratsiyadagi kirishma atomlar uning yoki nuqtaviy nuqsonlarning kristall panjarada ma'lum tuzilishga ega bo'lgan holatidir. Klasterlar bir necha atomdan boshlab, to million atomlardan tashkil topishi mumkin.



*1.13— rasm. Buramali dislokatsiya.*

**1-bobga doir sinov savollari:**

1. *Qattiq jism deb nimaga aytildi?*
2. *Qattiq jismlar fizik xossalariiga 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 kimyoziy bog'lanishlarga ega?*
9. *Kovalent bog'lanishning ion va metall bog'lanishlardan asosiy farqi?*
10. *Elementar va teskari elementar panjara nima?*

**1-bobga dolr 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 koordinastion 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 moddasini 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, bir gramm osh tuzi kristallida qancha atom Ni va Cl atomi bor va unda qancha elementar panjara mavjud?

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

8. Agar kremniy kristallinig doimiysi  $a=5,4 \text{ \AA}$  bo'lsa  $1 \text{ sm}^{-3}$  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  $5 \cdot 10^{22}$  ga teng bo'lган 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 kristalling doimiysi  $a=5,4 \text{ \AA}$  bo'lsa,  $1 \text{ sm}^{-3}$  kremniy kristallida nechta elementar panjara bor?

Masalaning yechilishi: berilgan  $a=5,4 \text{ \AA}$ , topish kerak,  $1 \text{ sm}^{-3}$  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 bu panjara kubdan iborat bo'lganligidan bitta kub yachekaning hajmini tashkil qilishini topamiz.

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

Bundan  $1 \text{ sm}^{-3}$  kristallda elementar panjara sonini quyidagi ifoda orqali aniqlaymiz.

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

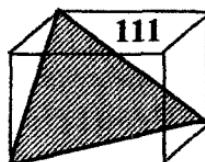
Demak, kristall panjara doimiysi  $a=5,4 \text{ \AA}$  ga teng bo'lган elementar kub panjaradan tuzilgan  $1 \text{ sm}^{-3}$  kremniy kristall panjarasidagi elementar panjaralar soni  $N_{e.p.} = 6,3 \cdot 10^{21}$  tani tashkil etar ekan.

2. Masalaning berilishi. Miller indekslari nima. [111], [101], [001] 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

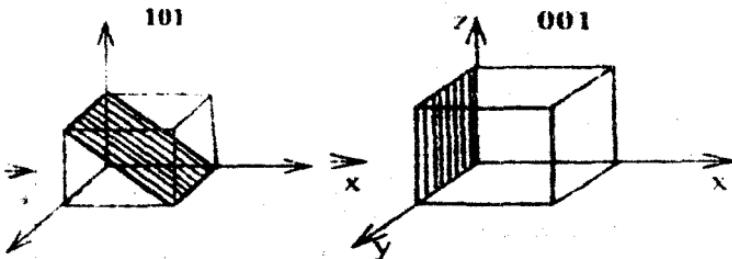
$\frac{1}{a} = h, \frac{1}{b} = k, \frac{1}{c} = l$   
kesmalarning teskari miqdorlari, ya'ni  $\frac{1}{a}, \frac{1}{b}, \frac{1}{c}$  olinib, ular umumiylashtiriladi va maxraj tashlab yuboriladi. Miller indekslari ( $h k l$ ) harflari bilan belgilanadi.

Agar kristall panjara (111) tekisliklarida kesishsa, uning fazodagi holati quyidagi rasmga ko'rsatilgandek ko'rinishga ega bo'ladi.

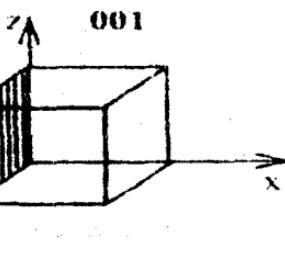


1.14 rasm.

Agar kristall panjara (101) tekisliklarida kesishsa, uning fazodagi holati quyidagi rasmga ko'rsatilgandek ko'rinishga ega bo'ladi.



1.15 rasm.



1.16 rasm.

Agar kristall panjara (001) tekisliklarida kesishsa, uning fazodagi holati quyidagi rasmga ko'rsatilgandek ko'rinishga ega bo'ladi.

## 2-BOB YARIM O'TKAZGICH MATERIALLARI

### 2.1. Yarim o'tkazgichlarning noyob xossalari

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

1. Yarim o'tkazgich materialining solishtirma qarshiligi harorat oshishi bilan ( $0\text{Kdan}$ ) eksponensial qonun bilan kamayadi. Masalan, kremniyning harorati  $T=100^0 \text{ K}$  dan  $300^0 \text{K}$  ga oshganda, uning solishtirma qarshiligi qiymati  $10^{24} \text{ Om}\cdot\text{sm}$  dan  $2\cdot10^5 \text{ Om}\cdot\text{sm}$  gacha, ya'ni  $10^{18}$  karra kamayadi. Shu oraliqda eng yaxshi metall oltinni solishtirma qarshiligi bor yo'g'i 17% ortadi. Demak, yarim o'tkazgichlarning elektr xossalari harorat yordamida juda katta oraliqda boshqarish mumkin ekan. Bu yarim o'tkazgichlarga xos juda noyob xossadir.

2. Yarim o'tkazgich materialarning solishtirma qarshiligi kirishma atomlariga o'ta sezgir bo'ladi. Misol uchun oltinga 30% mis yoki InGa 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  $10^{11}\div10^{19} \text{ sm}^{-3}$  ga oshirish hisobiga uning solishtirma qarshiligi  $\rho\sim10^5 \text{ Om}\cdot\text{sm}$  dan  $\rho\sim10^{-3}\text{Om}\cdot\text{sm}$  ga o'zgartirish mumkin. Demak, yarim o'tkazgichlarga kirishma elementlari kiritilganda ularning xususiyatlarni keskin o'zgarishi ham ularning noyob xossaga ega ekanligidan darak beradi.

3. Yarim o'tkazgich materiallarida metallardan farqli holda 2 xil tok tashuvchilar ya'ni elektron va kovaklar mavjud. Bu degan so'z bitta yarim o'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 etilishiga va hozirgi zamon mikro hamda nanoelektronika paydo bo'lishiga va rivojlanishiga asos bo'ldi. Yarim o'tkazgich materiallarining mana bu o'ta noyob

xossasi insoniyat hayotida texnika sohasi texnik revolyutsiya davrini boshlab berdi.

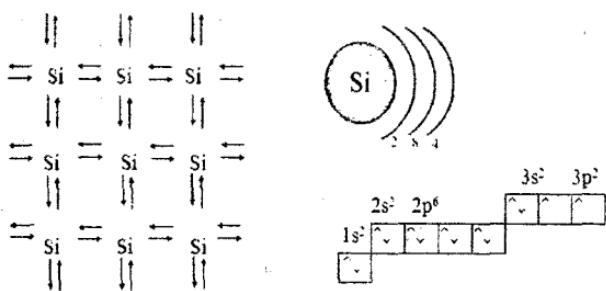
4. Metallarda umuman mayjud bo'lmagan holt ya'ni, tok tashuvchilarning (elektron va kovaklar) yashash vaqtini boshqarish usuli bilan yarim o'tkazgichlar asosida umuman yangi turdag'i elektron asboblar yaratish imkonini berdi. Bularga-lazerlar, fotoelementlar va boshqalarni kiritish mumkin. Yarim o'tkazgichlarda tok tashuvchilarning yashash vaqtini qiymatini juda katta oraliqda o'zgarishi ( $10^3 \div 10^{11}$  sek) o'ta tez ishlaydigan hozirgi zamon hisoblash mashinalari yaratishga sabab bo'ldi.

5. Metallarga qaraganda yarim o'tkazgich materiallarini 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 qurilmalarni yaratilishiga sabab bo'ldi. Bu hozirgi zamon hisoblash texnikasi, robototexnika va diagnostika sohalarini o'ta yuqori darajada rivojlanishiga asos bo'ldi.

6. Yarim o'tkazgich materiallarni metallardan yana bir farqli xususiyati bu tok tashuvchilar harakatchanligi nafaqat o'ta yuqori qiymatlarga erishshi balki, harorat hamda nuqsonlarga o'ta bog'liqdir. Yarim o'tkazgichlarning asosiy noyob xossalarni fizik ma'nosi va ularning mohiyatini kitobimizning keyingi boblarida keltirildi.

## **2.2. Yarim o'tkazgich materiallarda kimyoviy bog'lanish**

Yarim o'tkazgich materiallaridagi asosiy kimyoviy bog'lanish bu kovalent bog'lanishdir. Yarim o'tkazgich materiallarini tashkil etadigan atomlarning asosiy qismi  $s$  va  $p$  elektron qobiqlari to'lmagan bo'lgan, kristall hosil bo'lidan, ulardag'i hamma atomlarning tashqi elektron qobiqlari to'lishi shart. Natijada kristalldagi har bitta atomni tashqi qobig'ida elektronlar soni 8 taga yetib  $s^2 p^6$  holatiga o'tadi. Bunday bog'lanishda spinlari bir-biriga qarama-qarshi bo'lgan 2 ta elektron, ikki atom o'rtaida umumiy bo'lgan holda, ikki atomga tegishli. Misol uchun, Si kristallini ko'radigan bo'lsak, undagi atomlarning valent elektronlari holati  $s^2 p^3$  holatda bo'lib, bunday atom to'rt tomondagi qo'shnilaridan bittadan, qarama-qarshi spinli elektronlarni qabul qilishi bilan,  $s^2 p^6$  holatiga o'tadi.

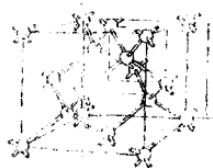


**2.1 - rasm.** Si da elektron qobiqlarning to'lishi va Si kristalining kovalent bog'lanishi.

Bunday bog'lanishlar  $s^1 p^3$  gibrildi bog'lanishlar deb atash qabul qilingan. Yarim o'tkazgich materiallarida kovalent  $s^1 p^3$  bog'lanish mavjud bo'lishi uchun kristall shunday atomlaridan tashkil topgan bo'lishi kerakki, unda kristallni tashkil etgan 2 ta qo'shni atom valent elektronlani yig'indisi 8 ga teng bo'lishi kerak. Bunday kristallar Si( $s^2 p^2$ ), Ge( $s^2 p^2$ ), Sn( $s^2 p^2$ ), C( $s^2 p^2$ ) yoki III-guruh elementlari Ga, In( $s^2 p^1$ ) va V-guruh elementlari As, Sb, P( $s^2 p^3$ ), bunda bitta elektron V-guruh to'la atomlaridan III-guruh atomlariga o'tadi va natijada III va V-guruh atom elektronlar soni 4 tadan ya'ni  $s^1 p^3$  bo'ladi yoki II-guruh elementlari Gd, Zn( $s^2 p^2$ ) va VI-guruh elementlari S, Se, Te( $s^2 p^4$ ), bu holatda VI-guruh elementlari ( $s^2$ ) dan 2 ta elektron II-guruh elementlari ( $s^2$ ) ga o'tadi va natijada har ikkala atomga ham  $s^1 p^3$  holatlari vujudga keladi hamda  $s^1 p^3$  tetroedrik kovalent bog'lanish hosil qiladi.

### 2.3. Yarim o'tkazgich materiallarida kristall panjara tuzilishi

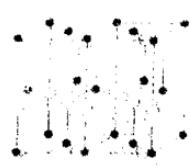
Yarim o'tkazgich materiallar kristall panjara tuzilishi asosan 4 xil tuzilishga almaz, sinkovoy obmanka, vyursit va osh tuzi ko'rinishida uchraydi. Almaz kristall panjara-bu tomonlari markazlashgan ikkita kub elementar panjaraning bir-biriga nisbatan hajm dioganali chorak qismi bo'yicha siljiganda hosil bo'ladi.



**2.2 - rasm.** Almaz kristall panjarasi



**2.3 - rasm.** Ruxsimon kristall panjarasi

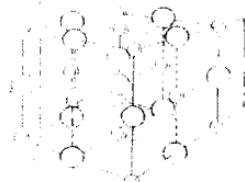


**2.4 - rasm.** Vyursit kristall panjarasi.

Sinkovoy obmanka kristall panjara-bu tomonlari markazlashgan ikkita kub elementar panjaraning hajm dioganali bo'yicha  $1/4$  qismi siljigan holatda hosil bo'ladi. Buni almaz turdag'i panjaradan farqi shuki, tomonlari markazlashgan bitta kub elementar panjara faqat bir xil atomlardan, ikkinchi shunday panjara esa boshqa xil atomlardan tashkil topgan bo'ladi.

Vyursit elementar kristall panjara-bu atomlari zinch joylashgan ikkita geksogonal elementar yacheyskaning bir-biriga kiritilgan holda paydo bo'ladi. Bunday kristall panjaralarda atomlar sinkovoy obmaka panjarasidagi tetroedrdagiday 4 ta yaqin atomlar bilan o'ralgan bo'ladi.

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



*2.5 - rasm. Osh tuzi kristall panjari.*

Quyidagi jadvalda mavjud yarim o'tkazgich materiallarini qanday elementar panjara holda bo'lishi va panjara doimiyari haqida ma'lumotlar keltiriladi:

Yarim o'tkazgich materiallarning panjara doimiysi 2.1 jadval

Material I	Element yoki birikma	Nomlanishi	Kristall struktura si	Panjara doimiysi 300K (A)
I	C	Uglerod Carbon (diamond)	D	3,56683
Element	Ge	Germaniy/Germanium	D	5,64613
	Si	Kremniy/Silicon	D	5,43095
	Sn	Qalay/Grey tin	D	6,48920
IV-IV	SiC	Karbit Kremniy Silicon carbide	W	a=3,086;c=15,117
	AlAs	Alyuminiy Arsenid Aluminum arsenide	Z	5,6605
	AlP	Alyiminiy Fosfid Aluminum phosphide	Z	5,4510

	AlSb	Alyuminiy Antimonid Aluminum antimonide	Z	6,1355
III-V	BN	Bor Nitrid Boron nitride	Z	3,6150
	BP	Bor Fosfid Boron phosphide	Z	4,5380
	GaAs	Galy Arsenid Gallium arsenide	Z	5,6533
	GaN	Galy Nitrid Gallium nitride	W	a=3,189; c=5,185
	GaP	Galy Fosfid Galliumphosphide	Z	5,4512
	GaSb	Galy Antimonid Gallium antimonide	Z	6,0959
III-V	InAs	Indiy Mishyak Indium arsenide	Z	6,0584
	InP	Indiy Fosfid Indium phosphide	Z	15,8686
	InSb	Indiy Antimonid Indium antimonide	Z	6,4794
	CdS	Kadmiy Sulfid Cadmium sulfide	Z	5,8320
	CdS	Kadmiy Sulfid Cadmium sulfide	W	a=4,16; c=6,756
	CdSe	Kadmiy Selen Cadmium selenide	Z	6,050
II-VI	CdTe	Kadmiy Tellur Cadmium telluride	Z	6,482
	ZnO	Rux Oksid Zinc oxide	R	4,580
	ZnS	Сульфид цинка Zinc sulfide	Z	5,420
	ZnS	Rux Sulfid Zinc sulfide	W	a=3,82; c=6,26
	PbS	Qo'rg'oshin Sulfid Lead sulfide	R	5,9362
IV-VI	PbTe	Qo'rg'oshin Tellur Lead telluride	R	6,4620
	PbSe	Qo'rg'shin Selen Lead selenide	R	6,12

D-almaz; W-vyursit; Z-sinkovoy obmanka; R-osh tuzi D-diamond;  
W-wurtzite; Z-zincblende; R- rock salt

## 2.4. Yarim o'tkazgich materiallaridagi nuqsonlar

Metallardan farqli holda nuqsonlar yarim o'tkazgich materiallarining barcha fizik xossalariiga juda katta ta'sir ko'rsatadi. Shuning uchun nuqsonlar tabiatiga va konsentratsiyasiga qarab, yarim o'tkazgich materiallarining xossalarni maqsadli boshqarish mumkin. Yarim o'tkazgich materiallaridagi nuqsonlar o'lchamlariga qarab, xuddi boshqa qattiq jismlar kabi nuqtaviy, chiziqli va hajmli nuqsonlarga bo'linadi. Bundan tashqari yarim o'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 konsentratsiyasini oshishi yoki kamayishi mumkin. Natijada yarim o'tkazgich materiallarining o'tkazuvchanligi o'zgaradi. Bu metallarda uchramaydigan hodisadir. Agar nuqsonlar yarim o'tkazgich materiallarida elektron va kovaklarning o'zgarishiga ta'sir etmasa bunday nuqsonlarni elektroneytral nuqsonlar deb ataladi.

Elektr faol nuqsonlarga erkin elektronlar va kovaklarni hosil qiluvchi kirishma atomlar, vakansiyalar va radiyatsion nuqsonlar kiradi. Erkin elektronlar va kovaklarning nuqson bo'lishiga sabab, erkin elektronlar kovalent bog'lanishni uzishi hisobiga paydo bo'lganligi sababli bog'lanishi buzilgan atom musbat zaryadlangan ion holiga o'tadi. Kovak esa, kovalent bog'lanishi buzilishi hisobiga musbat ionga aylangan yarim o'tkazgich materiallining asosiy atom holidir. Shuni ham ta'kidlash zarurki, kirishma atomlarining hammasi ham elektr faol nuqsonlar bo'lolmaydi. Agar kirishma atomlarining valent elektronlari soni, yarim o'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. Chiziqli nuqsonlarga-Dislokatsiya kiradi. Dislokatsiya ham elektr faol nuqson holatlarda uchraydi. Yarim o'tkazgichlarda nuqsonlarni o'z tabiatiga ko'ra muvozanatdagi, nomuvozanatdagi va kvazi muvozanatdagi nuqsonlarga bo'lish mumkin. Muvozanatdagi nuqsonlarga berilgan temperatura energiyasi  $kT$ , mos keladigan kristall panjara nuqsonlariga

aytiladi. Kristall o'stirilayotganda 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 yaqt o'tishi bilan asta-sekin o'z muvozanat holatiga qaytishi 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 emasdir. Yarim o'tkazgich materiallarida kirishma atomlar holati yuqorida ko'rsatilgandek kirishma atomlari elektr faol va neytral holatlarda bo'lishi mumkin. Elektr faol kirishma atomlar o'z tabiatiga ko'ra 3 xil vaziyatda uchraydi. Agarda kirishma atomlardagi valent elektronlar soni yarim o'tkazgichdagi asosiy atomlarni valent elektronlaridan ko'p bo'lsa, ularda qo'shimcha erkin elektronlar paydo bo'ladi. Bunday atomlar-donor kirishma atomlari deb ataladi. Agar kirishma atomlarning valent elektronlarni soni yarim o'tkazgich materiali asosiy atomlarini valent elektronlari sonidan kam bo'lsa, kovaklar paydo qiladi. Bunday kirishma atomlar-akseptor kirishma atomlari deb ataladi. Ba'zi bir kirishma atomlar yarim o'tkazgich kristall panjarasida elektronlarni kovaklarni ham o'zgarishiga olib kelishi mumkin, bunday kirishma atomlar amfoter kirishma atomlar deyiladi.

## **2.5. Yarim o'tkazgich materiallariga kirishma atomlar kiritish usullari**

Yuqorida keltirilgandek, yarim o'tkazgichlarning fizik xossalari ni ya'ni, ularni o'tkazuvchanlik, fotosezgirlik va magnit hossalarini juda katta ko'lamda boshqarishning asosiy yo'li bu bunday materialarga 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'naliish bo'yicha o'stirish usullarini eng asosiylaridan biri bu Choxlar usulidir. Ushbu usul bilan o'stirilgan kremniy monokristali quydagi 2.6 rasmda keltirildi. Bunda maxsus kvarts tigillarda yarim o'tkazgich materiallari suyultirilgan holda bo'lib, bunday suyuqlik yuzasiga aniq yo'naliishiga ([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 ( $1\div3$  mm) yuqoriga minutiga ko'tarila boshlaydi. Natijada o'sha zatravka yo'nalishiga mos holda, suyuq jism kristall holiga aylanadi.



**2.6 – rasm. Choxlar usuli bilan olingan Si monokristali.**

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 ishlataladi. Kirishma atomlarining yarim o'tkazgich kristallariga kiritishning ikkinchi usuli bu diffuziya usuli yordamida bajariladi. Bu usulda asosan kirishma atomlarini ma'lum bir yupqa qatlamlarda hosil qilish uchun ishlataladi. Bunday usulda kiritilayotgan kirishma atomlar konentratsiyasi, uning diffuziya qilinayotgan haroratidagi eruvchanligi, qancha qalinlikka kirishi esa diffuziya koefsiyenti bilan chegaralanadi. Diffuziya usuli zamonaviy mikrosxemalar va diskret yarim o'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 atomlar bilan bombardimon qilishdir. Natijada kirishma atomlar ionlar energiyasiga mos holda yuzadan bir necha  $10 \text{ \AA}^0$  dan bir necha  $100 \text{ \AA}^0$  gacha chuqurlikka kiradi, ya'ni yarim o'tkazgich materialining sirt yuzasidagi o'ta yupqa qatlam kirishma atomlari bilan boyitiladi. Bunday usulda kiritilgan atomlarni elektrfaol holiga keltirish uchun kristall ma'lum temperaturaga qizdiriladi, bundan tashqari kirishma atomlarning ionlari bilan bombardimon qilinganda kirishma atomlari yetib borgan joygacha radiatsion nuqsonlar hosil bo'ladi, agar ionlar energiyasi va dozasi yuqori bo'lsa unda kristall yuzasi amorf

holga kelishi mumkin. Bu usuldan foydalanganda kristall yuzasida xohlagan konsentratsiyadagi kirishma atomlarni paydo qilish mumkin.

## 2.6. Kirishma atomlar diffuziyasi

Diffuziya usuli bilan kirishma atomlarni kiritish hozirgi zamон mikroelektronikasida xar xil murakkablikdagi integral sxemalarni yaratish texnologiyasining eng asosiy etaplaridan hisoblanadi. Diffuziya jarayoni 2 ta asosiy bosqichlaridan: kirishma atomlar eruvchanligi va ularning diffuziya koeffisienti bilan aniqlanadi. Eruvchanlik berilgan haroratda diffuziya yo'li bilan kristallga kiritish mumkin bo'lgan atomlar konsentratsiyasidir. Eruvchanlik, kirishma atomlar radiusi, massasi va ularni tashqi elektron qobig'idagi elektronlar soniga, asosiy yarim o'tkazgich atomlaridan qanchalik farq qilganligiga bog'liq. 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 yarim o'tkazgichning asosiy atomlari orasidagi tafovud qancha katta bo'lsa, bunday holda kirishma atomlar kristall panjara oralig'ida joylashish ehtimolligi katta bo'ladi. Bunday kirishma atomlari yarim o'tkazgich materiallarning Krista panjaralarida tugunlar aro joylashgan nuqsonlarni hosil qiladi. Bundaylarga: Si ga Zn, Fe, Ni, Co ... larni misol qilish mumkin.



a)



b)

2.7 - rasm. a). Diffuziya jarayonida Si monokristaliga Ni atomlarini kiritilayotgan jarayonida infraqizil nurli mikroskopidayordamida olingan tasvir b) solishtiriluvchi namuna.

Agar kirishma atomlar bilan yarim o'tkazgich materialining asosiy atomlari orasidagi tafovud qancha kam bo'lsa atomlarni kristall panjara tugunlarida joylashish ehtimolligini o'lchamlari katta bo'lishi bilan birga

ularning eruvchanligi ham yuqori darajada bo'ladi. Bunday yarim o'tkazgich materiallar o'rindosh kirishmali qattiq jism deb ataladi. Masalan, Si uchun B, In, Ga, P, As, Sb ... kabi atomlarni misol qilish mumkin.

Kirishma atomlarning eruvchanligini haroratga bog'liqligi quyidagicha aniqlanadi:

$$N = N_0 \cdot e^{-\frac{E_d}{kT}} \quad (2.1)$$

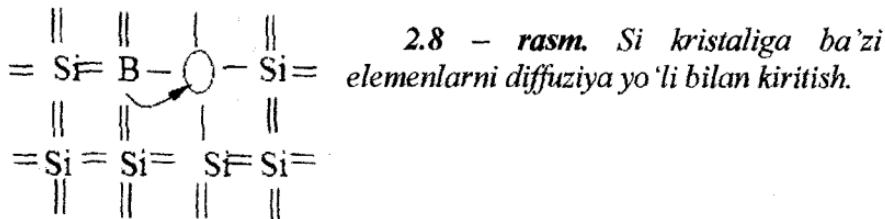
Bunda N-berilgan haroratda kirishma atomlami eruvchanligi,  $k$ -Boltsman doimiysi, T-harorat,  $E_d$ -eruvchanlik energiyasi,  $N_0$ -tempratura cheksiz bo'lganda eruvchanlik qiymati.

Kirishma atomlarning yarimo'tkazgich material sirtidan diffuzuya natijasida hajm bo'ylab kirib boorish tezligini ko'rsatadigan kattalik bu diffuziya koefisientidir. Diffuziya koefisienti qiymati ham kirishma atomlari parametrlari va diffuziya tezligiga bog'liq.

$$D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) \quad (2.2)$$

$D_0$ -tempratura cheksiz bo'lgandagi diffuziya koefisienti,  $E_d$ -diffuziyaning energiya faolligi (ya'ni atomlarning kristall panjara ichida bir muvozanat holatdan ikkinchi muvozanat holatga o'tishi uchun zarur bo'lgan energiya). Agar kirishma atomlar tugunlar bo'yicha diffuziya qilinadigan bo'lsa, unda  $E_d$  ni qiymati tugunda turgan atomning 3 ta qo'shnisi bilan bog'lanishni uzishi uchun kerak bo'lgan energiya ham atom qo'shni tugun joyiga o'tishi uchun u yerda vakansiya paydo bo'lishi uchun kerak 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 tugunlar aro diffuziya qilinayotgan bo'lsa, unda  $E_d$  qiymati atom turgan tugunlar aro joyidan qo'shni shunday joyga o'tishi uchun zarur bo'lgan energiyalar bilan, atom 2 ta tugun o'rtasidan o'tayotganda tashqi qobiq elektronlar o'zaro itarilish kuchlarini yengishi uchun sarf qilinayotgan energiyalar yig'indisiga teng bo'ladi. Bunday kirishma atomlar uchun  $E_d$  qiymati  $E_d=0,5\div2,5$  eV atrofida bo'lishi mumkin.

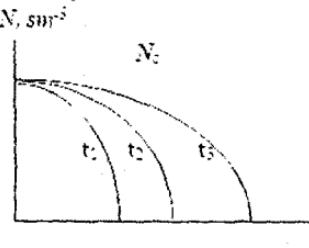
Masalan Li va Fe atomlarining Si da  $T=1000^{\circ}\text{C}$  haroratdagি diffuziya koefitsiyenti  $D_{\text{Li}}\sim 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $D_{\text{Fe}}\sim 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ . Bor (B) yoki fosfor (P) ni  $T=1200^{\circ}\text{C}$  haroratda diffuziya koefitsiyenti  $D_B=10^{-12}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



Diffuziya jarayonida berilgan vaqtida kirishma atomlarning hajm bo'yicha taqsimoti diffuziya vaqtida 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 holatni chegaralanmagan manbadan diffuziya deyiladi va uning taqsimoti quyidagi tenglik bilan aniqlanadi:

$$N = N_s \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (2.3)$$

bunda  $D$  – diffuziya koefsiyenti,  $t$  – diffuziya vaqt,  $x$  – diffuziya chuqurligi,  $N_s$  – kirishma atomlarning sirtdagи konsentratsiyasi.

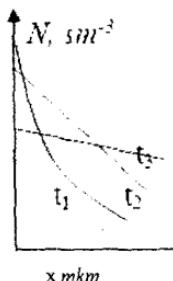


**2.9-rasm.** ( $t_1 < t_2 < t_3$ ) Cheksiz manbadan diffuziya qilinganda kirishma atomlarining taqsimoti.

Bunday holat o'zgarmas manbadan bo'layotgan diffuziya holati deyiladi.

Agar diffuziya jarayonida kirishma atomlarning jism sirtidagi konsentratsiyasi o'zgarib boradigan bo'lsa, bunday holni chegaralangan manbadan diffuziya deyiladi va uning taqsimoti quyidagi tenglik bilan aniqlanadi:

$$N(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi D t}} \exp \left( -\frac{x^2}{4 D t} \right) \quad (2.4)$$



bunda  $Q$  – diffuziya vaqtida  $1\text{sm}^2$  yuzadan yarim o'tkazgichga kiritilgan kirishma atomlari miqdori,  $D$  – diffuziya koeffsiyenti,  $t$  – diffuziya vaqtı,  $x$  – diffuziya chuqurligi.

**2.10 – rasm.** ( $t_1 > t_2 > t_3$ ) Chekli manbadan diffuziya qilinganda kirishma atomlari taqsimoti (turli xil vaqtida diffuziyalangan).

## 2.7. Kirishma atomlarning eruvchanligi

Kirishma atomlarning kristalda eruvchanligi - berilgan haroratda diffuziya natijasida kristallga kiritish mumkin bo'lgan atomlar konsentratsiyasiga aytildi. Demak, shu haroratdagi eruvchanlikdan ortiqcha atomlarni kristall panjaraga kiritish mumkin emas. Eruvchanlik haroratga bog'liq bo'lib, harorat oshishi bilan eksponensial qonuniyat bilan oshib boradi va quydagi munosabat bilan aniqlanadi:

$$N = N_o \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (2.5).$$

bunda  $N_o$  –  $T = \infty$  bo'lgandagi eruvchanlik,  $E$  – eruvchanlik energiyasi,  $k$  – Bolsman doimiysi. Kristall panjaraga diffuziya usuli bilan kiritilgan kirishma atomlar har xil holatlarda bo'lishi mumkin – faqat tugunlarda joylashishi, faqat tugunlar aro joylashishi hamda boshqa atomlar yoki nuqsonlar bilan birikmalar hosil qilishi mumkin. Nazariy hisoblashlar ko'rsatadiki, kirishma atomlarning tugunlarda joylashishi uchun quyidagi shartlar bajarilishi lozim, yarim o'tkazgichning asosiy atomlarning va kirishma atomlar radiuslari bir-biriga juda yaqin bo'lishi va ularning farqi 14% dan oshmasligi kerak. Shu bilan birga asosiy va kirishma atomlari tashqi qobig'idagi elektronlar soni ham juda kam farq qilishi kerak. Masalan, Ge atomlarning valent elektronlarni soni, atom radiusu hamda kristall tuzilishlari Si atomlaridan juda kam farq qilganligi uchun Ge va Si kristallarida cheksiz eruvchanlik xususiyatiga ega.

Kirishma atomlarning tugunlar aro joylashishi uchun kirishma atomlardan asosiy atomning radiusi qancha kam bo'lishi va ularning valent elektronlari, yarim o'tkazgichning asosiy atomlarini valent elektronlardan 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 kremniyda shunday holatlarda bo'ladi. Kirishma atomlarning diffuziya koeffsiyenti bilan, ularni eruvchanligi o'rtasida ma'lum bog'lanish bor, ya'ni diffuziya koeffsiyenti qancha katta bo'lsa, ularning eruvchanligi shuncha kam bo'ladi. Diffuziya yo'li bilan kiritilgan atomlarning hammasi ham elektrofaol bo'lmaydi, ya'ni ta'qiqlangan sohada biror energetic sath hosil qilib, qo'shimcha elektron yoki kovak hosil qilmaydi. Bunday xususiyatga ko'proq diffuziya koeffsiyenti katta bo'lgan va asosan tugunlar orasida joylashgan kirishma atomlari ega bo'ladi. Masalan, nikel kirishma atomlarining  $T=1250^{\circ}\text{C}$  da eruvchanligi  $N=(4\div 5)10^{17} \text{ sm}^{-3}$  ga teng, ulardan faqat  $4\cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$  gina elektrfaol atom hisobida ikkita akseptor energetik sathini hosil qiladi. Kiritilgan atomlarning asosiy qismi 99.9% i elektroneytal holatda qolib, har xil nuqsonlar bilan birikmalar hosil qiladi. Shunday xususiyatga *Fe*, *Mn*, *Co*, *Cd*.... va boshqa elementlar ham egadir. Kirishma atomlarning eruvchanligiga ta'sir etadigan yana bir kattalik bu ularning segregatsiya koeffsiyenti -  $k$  hisoblanadi. Bu kattalik kirishma atomlarining yarim o'tkazgich materiallarida ularning erigan ( $N_y$ ) (suyuq) va qattiq jism ( $N_s$ ) azot holatlarini ya'ni fazaviy muvozanat holatidagi konsentratsiya larning nisbatiga tengdir.

$$k = \frac{N_{qattiq}}{N_{suyuq}} \quad (2.6).$$

$k$  – kirishma atomlar tabiatiga bog'liq bo'lib, u qancha katta bo'lsa, ya'ni 1ga yaqinlashsa, uning eruvchanligi shuncha katta bo'ladi. Quyida kremniy kristallida ba'zi kirishma atomlarning eruvchanligi va segregasiya koeffsiyentining qiymatlari keltirilgan:

2.2- jadval. Kremniyda kirishmalarning eruvchanlik va segregasiya koeffsiyenti.

Kirishma	Maksimal eruvchanlik	Segregasiya	Maksimal
<i>Cu</i>	$3\cdot 10^{18}$	$2.5\cdot 10^{-4}$	1300
<i>Ag</i>	$2\cdot 10^{17}$		1350
<i>Au</i>	$1\cdot 10^{17}$	$3\cdot 10^{-5}$	1250
<i>Li</i>	$4\cdot 10^{19}$	$1.3\cdot 10^{-2}$	1200
<i>B</i>	$10^{20}$	0.9	1200
<i>Al</i>	$1.7\cdot 10^{20}$	$10^1$	1200

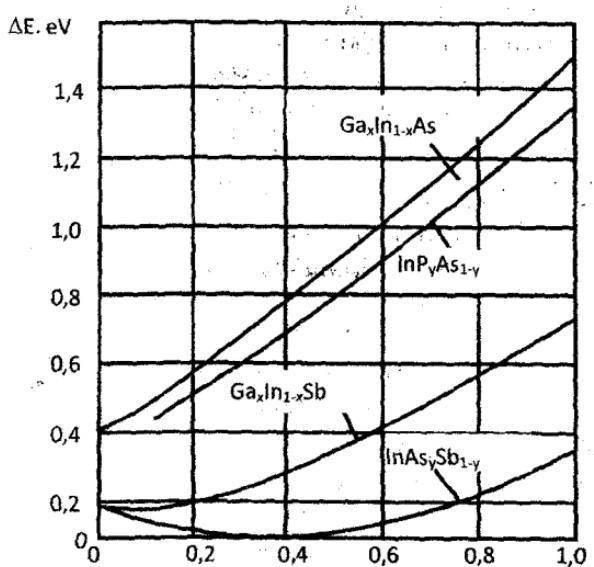
In	$10^{19}$	$5 \cdot 10^{-4}$	1200
P	$2 \cdot 10^{20}$	0,35	1200
As	$10^{20}$	0,3	1200
Sb	$10^{20}$	0,4	1200
Zn	$10^{17}$	$4 \cdot 10^{-4}$	1250
Mg	$10^{16}$		1250
Cd	$10^{16}$		1250
Hg	$10^{16}$		1270
Sc	$10^{16}$		1250
V	$10^{16}$		1250
Sn	$10^{21}$		1350
Ge	$10^{22}$		1430
Cr	$10^{16}$		1200
Fe	$5 \cdot 10^{16}$	$8 \cdot 10^{-6}$	1250
Co	$2 \cdot 10^{16}$		1250
Ni	$7 \cdot 10^{17}$		1250
Mn	$2 \cdot 10^{16}$		1250
Re	$10^{16}$		1250
Ru	$10^{17}$		1260
Os	$10^{16}$		1300
Rn	$10^{16}$		1250
Ir	$5 \cdot 10^{16}$		1250
Pd	$4 \cdot 10^{16}$		1250
Pt	$10^{16}$		1250
Sm	$10^{18}$		1300
Gd	$10^{18}$		1300
Ho	$10^{17}$		1300
O	$1,7 \cdot 10^{18}$		1250
S	$5 \cdot 10^{16}$		1250
Se	$10^{17}$		1250
Te	$5 \cdot 10^{17}$		1250
Mo	$10^{15}$		1200
W	$10^{15}$		1200

Shuni ta'kidlash lozimki, ba'zi kirishma atomlarning eruvchanligi hamma vaqt ham (2.6) ifoda bilan aniqlanmaydi. Ularning eng katta eruvchanligi ma'lum haroratgacha o'sib borib keyin kamayadi. Masalan, Cu atomlarini kreminiya da eng katta eruvchanligi  $T=875^{\circ}\text{C}$  da  $N=4 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$  ga teng bo'lib, keyin harorat oshishi bilan kamayadi.

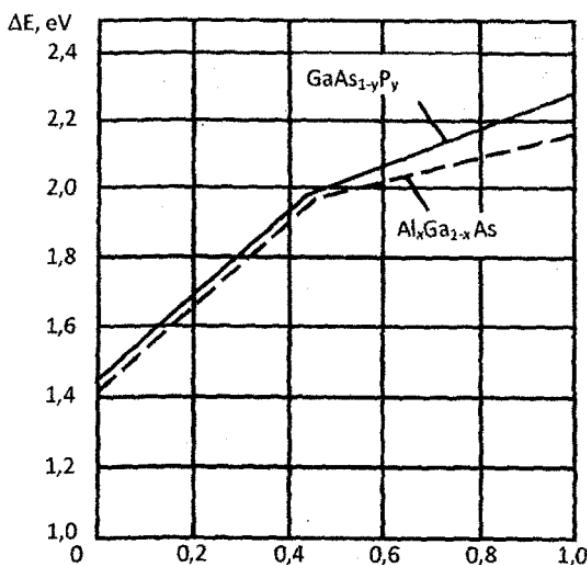
## 2.8. Binar yarim o'tkazgich materiallarida kirishma atomlar eruvchanligi

Elementar yarim o'tkazgich materiallar kremniy germaniyidan farqli holda  $A^{III}B^V$  yoki  $A^{IV}B^{VI}$  birikmalar yarim o'tkazgich materiallarda kirishma atomlarning tugundagi holati har xil bo'ladi. Bunga sabab kirishma atomi Si masalan GaAs da Ga atomining o'rnini egallasa, donor sifatini namoyon qiladi. Yoki agar u As atomining o'rnini egallaydi u endi akseptor kirishma atomi sifatida namoyon bo'ladi. Shu bilan birga Si kirishma atomining GaAs eruvchanligi ham uning qanday turganiga bog'liq bo'ladi. Chunki yuqorida haroratda diffuziya qilinganda GaAs kristallida As atomlari o'rnda ko'proq vakansiyalar hosil bo'ladi. Shunga mos holda kirishma atomlarining As atom o'rnini egallashi yuz beradi. Aksincha pastroq haroratda ( $T < 800^\circ C$ ) kirishma atomlari diffuziya qilinganda ularni Ga atomlari o'rnda joylashish ehtimoli oshadi.

Ta'kidlab o'tish kerakki,  $A^{III}B^V$  va  $A^{IV}B^{VI}$  birikmalari yarim o'tkazgich materiallarida izovalent (valentligi bir xil) kirishma atomlarining diffuziyasi tufayli, tubdan yangi murakkab yarim o'tkazgich materiallarni yaratish mumkin. Masalan GaAs kristalliga III – guruh elementlaridan Zn yoki Al diffuziya qilinganda ular Ga atomini o'rnini egallashi bilan birga ularning eruvchanligi juda katta bo'ladi. Masalan Zn kirishma atomlarini bir necha % kiritish yo'li bilan yangi  $Zn_{1-x}Ga_xAs$  – materiall hosil qilinadi. Endi, Zn atomlari qisman Ga atomlari o'rnini egallagani uchun hech qanday energetik sath hosil qilmagan va kimyoviy bog'lanishni buzmagan holda yangi murakkab elementar panjara  $Zn_{1-x}Ga_xAs$  ni-hosil qiladi. Bunday panjaraning fundamentall parametrlari – ta'qiqlangan soha kengligi, zaryad tashuvchilar harakatchanligi GaAs dan tubdan farq qiladi. Bu parametrlarni Zn ning eruvchanligini oshirish yo'li bilan to ZnGa materiallarining fundamental parametrlarigacha o'zgartirish mumkin. Quyidagi rasmda bunday holat juda yaxshi aks ettirilgan:



a)

 $x, y$ 

b)

 $x, y$ 

2.11-rasm. Ta'qiqlangan soha kengligini  $A^{III}B^V$  birikmalari asosidagi qattiq jismlarning tarkibiga bog'liqligi ( $T=300K$ ).

a – birikmalar – sodda energetik soha tuzilishiga ega juftliklar; b – birikmalar – murakkab energetik soha tuzilishiga ega juftliklar. Xuddi shundek V – guruh elementlarining atomlarini  $A^{III}B^V$  dagi eruvchanligi juda katta ekanligini hisobiga ularni diffuziya qilish yo‘li bilan yangi turdag'i yarim o‘tkazgich  $GaAs_1P_{1-x}$  yoki  $GaAs_xSb_{1-x}$  materiallari olindi.  $A^{III}B^V$  yarim o‘tkazgich materiallariga izovalent II yoki VI-guruh elementlarini diffuziya usuli bilan kiritib yangi –  $Cd_1Zn_{1-x}S$ ,  $CdS_xSe_{1-x}$  – materiallarni olish mumkin. Izovalent kirishma atomlarining  $A^{III}B^V$ ,  $A^{II}B^{VI}$  – birikmalari yarim o‘tkazgich materiallarida cheksiz eruvchanligi nafaqat yangi murakkab yarim o‘tkazgich materiallarini yaratish imkoniyatini beradi, balki bitta kristallda ma’lum qalinlikka ega bo‘lgan yangi turdag'i geteroo‘tishlar yaratish imkonini beradi. Masalan,  $Ga_1Al_{1-x}As$  –  $GaAs$  va shunga o‘xshash. Bunday yangi turdag'i geteroo‘tishlar o‘ta faol ishlaydigan va boshqariladigan yarim o‘tkazgich lazerlar va fotoelementlarni yaratish imkoniyati oshadi. Quyidagi jadvalda murakkab yarim o‘tkazgichlarning ta’qiqlangan soha kengligini izovalent kirishma atomlar miqdoriga bog‘liq o‘zgarishi keltirilgan:

### 2.3– jadval. Murakkab yarim o‘tkazgich materiallarining ta’qiqlangan soha kengligi.

Yarim o‘tkazgichlar	Taqiqlangan sohasi	Yarim o‘tkazgichlar	Taqiqlangan sohasi
$GaAs_{0,88}Sb_{0,12}$	1,21 əB	$Ga_{0,612}In_{0,388}As$	0,95 əB
$Ga_{0,47}In_{0,53}As$	0,75 əB	$CdGaAs_2$	0,55 əB
$Ga_{0,5}In_{0,5}Sb$	0,36 əB	$CdSnP_2$	1,15 əB
$Ga_{0,3}In_{0,7}Sb$	0,24 əB	$ZnGeP_2$	2,2 əB
$InAs_{0,2}P_{0,8}$	1,1 əB	$AgZnSe_2$	1,2 əB
$Ga_{0,13}In_{0,87}As_{0,37}P_{0,63}$	1,05 əB	$AgZnS_2$	2,0 əB
$GaAs_{0,45}P_{0,55}$	1,977 əB	$AgGaS_2$	2,7 əB
$Al_{0,4}Ga_{0,86}As$	1,59 əB	$CuAlS_2$	3,5 əB
$Al_{0,4}Ga_{0,86}As$	1,62 əB		

## **2- bobga doir sinov savollari:**

1. Yarim o'tkazgichlarning metallardan asosiy farqi nimalardan iborat?
2. Yarim o'tkazgichlarda kimyoviy bog'lanish tabiatini qanday?
3. Si, GaAs va Cd materiallarda kimyoviy bog'lanishni ko'rsating?
4. Yarim o'tkazgich materiallarining qanday kristall tuzilishari mayjud?
5. Kristall panjara nuqsonlari deb nimaga aytildi, muqtaviy nuqson nima?
6. Frenkel va Shottki nuqsonlari, bular qanday nuqsonlar?
7. Nuqsonlarsiz kristall olish mumkinmi?
8. Haroratga o'ta sezgir nuqsonlar bu...?
9. Yarim o'tkazgichlarga kirishma atomlarni qanday usul bilan kiritish mumkin?
10. Diffuziya nima va u qachon yuz beradi?
11. Kirishma atomlarning diffuziya ko'effisiyenti nimalarga bog'liq?

## **Yarim o'tkazgichlarda kirishma atomlar va nuqsonlarga doir masalalar:**

1. II guruh elementlari Zn, Cd kremniyda (agar ular tugunda Si atomning o'rmini egallagan bo'lsa) qanday holatda bo'ladi va qancha 49nergetic sath hosil qiladi?
2. IV guruh elementlari kirishma atom sifatida kremniyda qanday holatda bo'ladi. Ular qanday 49nergetic sathlar hosil qiladi.
3. VI guruh elementlari Si panjarasida qanday 49 nergetic 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 va ZnAs kristall panjaralarida qanday holatda bo'ladi.
6. V guruh elementlari R, As, Sb atomlari ZnS kristalida qanday holatlarda bo'lishi mumkin.
7. Muvozanatdag'i vakansiyalar konstentrasiyasi kremniy kristallida quyidagi ifoda orqali aniqlanadi.

$$N_V = 5 \cdot 10^{22} \exp\left(-\frac{3}{kT}\right) \quad (2.7).$$

Bunda harorat  $T=500, 1000$  va  $1500^{\circ}\text{K}$  da vakansiyalar konstentrasiyasini 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, konstentrasiya  $N = 10^{15} \text{ sm}^{-3}$  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.

#### *Yarim o'tkazgichlardagi kirishma atomlar va nuqsonlarga doir masalalarning yechilishi:*

1. Masalaning berilishi: Muvozanat vakansiyalar konstentrasiyasi kremniy kristallida quyidagi ifoda orqali aniqlanadi.

$N_v = 5 \cdot 10^{22} \exp\left(-\frac{3}{kT}\right)$  Bunda harorat  $T = 1000^{\circ}\text{K}$  da vakansiyalar konstentrasiyasini aniqlang. Masalaning echilishi: Muvozanat vakansiyalar konstentrasiyasi kremniy kristallida aniqlanish ifodasidan foydalanamiz.

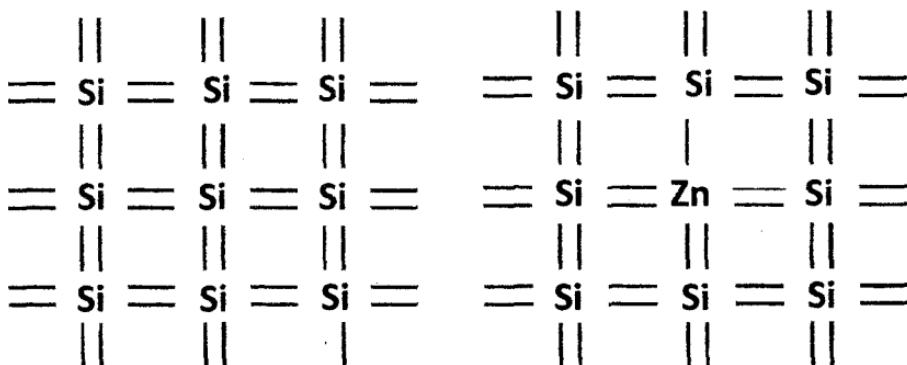
$N_v = 5 \cdot 10^{22} \exp\left(-\frac{3}{kT}\right)$  Bu erda:  $k$ - Bolsman doimiysi bo'lib, uning qiymati  $k = 8,61 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$  ifodaga qo'yib, harorat  $T = 1000^{\circ}\text{K}$  da kremniy kristalida hosil bo'lgan vakansiyalar konstentrasiyasini aniqlaymiz.

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

Demak harorat  $T = 1000^{\circ}\text{K}$  da kremniy kristalida hosil bo'ladigan vakansiyalar konstentrasiyasi  $N_v = 3,6 \cdot 10^7 \text{ sm}^{-3}$  ni tashkil etar ekan.

2. Masalaning berilishi: II guruh elementi Zn kremniyida (agar ular tugunda Si atom o'rmini egallagan bo'lsa) qanday holatda bo'ladi va qancha energetik sath hosil qiladi. Masalaning echilishi: Kremniy elementi tashqi qobig'ida to'rtta elektroni bo'lib, bita kremniy to'rtta kremniy bilan kovalent bog'lanishi hisobiga olmos ko'rinishidagi tetroedirk kristall panjara hosil qiladi.

Agar II guruh elementi Zn kremniy kristall panjarasida tugunda joylashib Si atomining o'rnnini egallagan bo'lsin, u holda Zn ikkinchi guruh elementi tashqi qobig'ida ikkita elektron bo'lganligi uchun kristall panjarada ikkita elektron bog'lanish etmaydi. Ya'ni ikkita kovak hosil bo'lib qoladi. Bundan ko'rinadiki, kristall panjarada elektronlarni yutuvchi kovaklarni itaruvchi markazni kremniyning ta'qiqlangan 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.



**2.12 rasm a)** Kovalent tetraedrik bog'lanishi

**b)** Kremniy elementiga rux atomi kiritilgan.

### 3 - BOB

#### 3.1. Yarim o'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.

$$J = \sigma E \text{ yoki } J = E/\rho \quad (3.1).$$

$\rho$ -material solishtirma qarshiligi,  $\rho$  va  $\sigma$  larning qiymatlari material tabiatiga bog'liq. Ikkinci tomondan tok zichligi  $J$  vektor kattalik bo'lib, kesim yuzasidan vaqt birligida o'tayotgan zaryad tashuvchilar miqdorini ko'rsatadi. Agar tok tashuvchilarning (elektronlarni) tezligini bir xil deb hisoblansa, unda tok zichligi quyidagiga teng bo'ladi:

$$J = -env \quad (3.2).$$

$e$ - elektron zaryadi,  $n$ - elektronlar konsentratsiyasi,  $v$ - elektronlarni dreyf tezligi. Tok yo'nalishi elektron dreyf tezligi yo'nalishiga teskari bo'lgani uchun tenglik oldida « $\rightarrow$ » (minus) ishorasi qo'yilgan. Elektr maydon qo'yilmaganda elektronlar xaotik harakat qilganligi tufayli ulaming tezliklarining vektor yig'indisi nolga teng bo'ladi. Demak tok zichligi ham nolga teng bo'ladi. Elektron elektr maydon hisobiga tezlanish oladi.  $eE = ma$  demak, elektron ikkita to'qnashish orasida o'zini tezligini  $v = at$ , ( $a = v/t$ ,  $eE = mv/t$ ,  $v = eE \cdot t/m$ ) ga o'zgartiradi.

Elektron har bir to'qnashganidan so'ng, ya'ni o'z yo'nalishini ma'lum o'zgartirgandan holda, ya'ni tezligi shunday qiymatga oshadi. Bunda  $t$ - elektronni elektr maydon hisobiga nomuvozanat holatiga chiqib so'ngra muvozanat holatiga kelishi lozim bo'lgan relaksatsiya vaqtiga  $\tau$  ga teng deb qabul qilindi. Unda elektronning o'rtacha Dreyf tezligiv =  $-eEt/m$  ni (1) ifodaga qo'yib, quydagi ifoda keltirib chiqariladi:

$$j = en \cdot eEt/m \quad j = \sigma E \quad \sigma = en\mu \quad (3.3).$$

$\mu$ - harakatchanlik [ $sm^2/V \cdot s$ ].

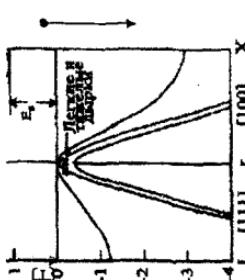
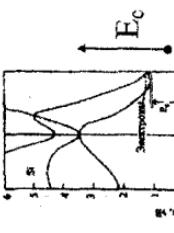
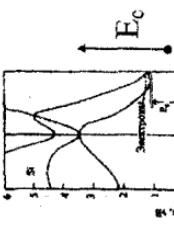
Harakatchanlik bu birbirlilik elekt maydoni qo'yilganda elektronlar dreyf tezligining o'zgarishiga tok tashuvchilarning harakatchanligi deyiladi, uning birligi  $\left[\frac{sm^2}{V \cdot s}\right]$  bilan o'lchanadi.

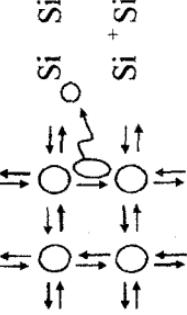
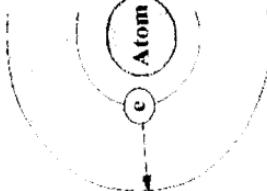
Demak, qattiq jismrlarning elektr o'tkazuvchanligi ( $\sigma$ ) ni aniqlaydigan asosiy parametr bu -elektronlar konsentratsiyasi va harakatchanligi ekan. Tok tashuvchilarning harakatchanligi yarim o'tkazgich materiallarida, juda katta ahamiyatga ega. Bu kattalik yarim o'tkazgichlarni tabiatni, tuzilishi, undagi kirishma atomlarni

konsentratsiyasi, harorati yorug'likka qarab juda katta oraliqda o'zgarishi mumkin. Yarim o'kazgichlardagi tok tashuvchilarning harakatchanligi haqida navbatdagi keyingi boblarda alohida to'xtalib o'tamiz.

### 3.2. Yarim o'kazgichlarda tok tashuvchilar tabiatи

Yarim o'kazgichlarda kimyoviy bog'lanish asosan kovalent bog'lanish bo'lganligi sababli, hamma valent elektronlar kimyoviy bog'lanishda to'la qatnashadi. Demak bunday materiallarda erkin elektronlar bo'lmaydi. Erkin elektronlar bo'lishi uchun, kimyoviy bog'lanishga qatnashayotgan valent elektronlar kimyoviy bog'lanishni uzishi va o'z atomidan uzoqlashishi kerak. Buning uchun elektron ma'lum miqdorda bog'lanish energiyasini uzishiga yetarli energiyani olishi lozim. Bu energiya yoki issqlik yorug'lik energiyasi bo'lishi mumkin. O'ta past tempraturalarda valent elektronlar erkin elektronlar holatiga o'tish ehtimolligi juda kam bo'lganligi uchun, yarim o'kazgich materiallar juda yaxshi dielektrik holatiga o'tadi. Endi bunday materiallarda o'tkazuvchanlik bo'lishi uchun kovalent bog'lanishda ishtirok etayotgan valent elektronlar ozod etilishi lozim. Bunday elektronlar erkin elektronlar holatiga o'tadi, chunki o'z atomidan uzoqlashgan bu elektronlarni boshqa hech qanday atomlar yutib olinishi mumkin emas. Chunki ularning hammasining tashqi elektron qobiqlari to'lgan. Demak, yarim o'kazgichlarda valent elektronlarning ikki holati mavjud bo'lar ekan-bu kovalent bog'lanishda qatnashgan bog'langan holati va bog'lanishdan uzelgan erkin bo'lgan holati. Elektronlarning bog'langan holatini valent soha, erkin holatini esa o'kazuvchanlik sohasida deb qabul qilingan. Bog'langan valent elektronlarni erkin holatga olib chiqish uchun lozim bo'lgan energiya elektronning bog'lanish energiyasini uzish uchun kerak bo'lgan energiyani taqiqlangan soha kengligi deb ataladi. Haqiqatdan ham, yarim o'kazgichning asosiy atomlarining valent elektronlari bog'langan yoki erkin holatda bo'ladi. Demak, berilgan energiya elektronni ozod qilishga yetarli bo'lmasa, elektron o'zi bog'langan holatiga 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 valent soha bilan o'kazuvchanlik sohasi orasida elektron joylashishi mumkin emas, shuning uchun ham bu taqiqlangan energiya sohasi deb ataladi.

	Kremniyning tasvirini sohasi	Valent sohasi
<b>uz. Valent soha</b> <b>ru. Валентная</b> <b>зона</b> <b>en. Valence band</b>	<p>mutlaq nol haroratda hamma energiya holatlari elektronlar bilan band bo'lgan ruhsat etilgan sohanning yu-qori chegarasiga ay-tildi. Ya'ni <math>T=0^{\circ}\text{K}</math> haroratda elektronlar atomga bog'langan bo'ladi. Kris-talda sohalar tuzili-shi (strukturası) ga qarab, valent soha-lar, yetarlicha mu-rakkab bo'lishi mumkin.Kristall panjarda <math>T=0^{\circ}\text{K}</math> da barcha valent elektronlar bog'lan-gan holarda valent zo-nada bo'ladi: Si</p>  <p>Si Si      <math>\uparrow\downarrow \leftrightarrow \circlearrowleft \leftrightarrow</math></p> <p>Si Si      <math>\uparrow\downarrow \leftrightarrow \circlearrowleft \leftrightarrow</math></p>	
<b>uz.O'tkazuvchan-</b> <b>lik sohasi</b> <b>ru.Зона</b> <b>проводимости</b> <b>en.Conduction</b> <b>band</b>	<p>Tashqaridan ta'sir ettirilganda masalan, harorat, yorug'lik, elektr maydon va b.) elektronlar qabul qilishi mumkin bo'lgan, absoluyut nol haroratda esa elektronlarga ega bo'lmaydigan ruhsat etilgan sohaga aytildi.Kristall panjarda <math>T&gt;0^{\circ}\text{K}</math> da malum bir elektronlar bog'lanish energiyasini yengib erkin holatga o'tadi, ya'ni</p>	<p>Kremniyning o'tkazuvchanlik sohasi</p> 

	tok o'tkazuvchanlik sohasi deb qabul qilingan.		tashishda qatnashadi. Bu holat
uz.Taqiqlangan soha ru.Запрещенная зона en.Forbidden band	Yarim o'tkazgichlarda hamma valent elektronlar kimyoviy bog'lanishda qatnashganligi tufayli $T=0^{\circ}\text{K}$ erkin elektronlar bo'lmaydi. Berilgan issiqlik yoki yorug'lik hisobiga kimyoviy bog'lanishda ishtirok etgan elektronni ma'lum energiya berib ozod qilish mumkin. Ana shundagina bu elektron elektr toki o'tkazishda qatnashadi. Shuning uchun ta-qizlangan soha deganda har qanday yarim o'tkazgich kimyoviy bog'lanishdag'i elektronni ozod qilish uchun (ya'ni bog'lanish energiyasiga teng energiya) kerak bo'lgan energiyaga aytildi va $E_g$ bilan belgilanib, uning qiymati eV larda o'lchanadi. Chunki elektronga $E_g$ dan kam energiya berilganda elektronni ozod qilib bo'lmaydi. Bu degan so'z elektron yo bog'langan holatda	Bog'langan elektronni urib chiqarish uchun kerak bo'ladigan energiya qiymati: 	Elektron qancha atomga yaqin joylashgan bo'ssa uni urib chiqarishga shuncha ko'p energiya kerak bo'лади.

(valent)	yoki (o'tkazuvchanlik kattaligi kimyoviy soha).	erkin	holatda	bo'jadi	$E_C$
	Taqiqlangan soha valent elektronlarining atomga qanday energiya bilan bog'langanligiga bog'liq. Masalan, IV guruh elementlari hammasi bir xil kristall strukturaga ega va kim-yoviy bog'lanishga ega bo'lsa ham, ularning $E_g$ si har xil bo'jadi.				$E_V$ 

### Valent $E_g$ elektronlari T=300°K

C –  $2s^2 2p^2$  5,0 eV

Si –  $3s^2 3p^2$  1,12 eV

Ge –  $4s^2 4p^2$  0,66 eV

Endi kovalent bog'lanishni uzib ketgan erkin elektron hisobiga musbat zaryadlangan, bog'lanishi to'liq bo'lman atom qoladi. Bu atom o'zidagi kovalent bog'lanishni to'ldirish uchun qo'shni atomlardan elektron olishi mumkin, go'yoki musbat zaryadlangan ion o'z o'midan boshqa joyga siljib qolgandek bo'ladi. Demak zaryad ko'chmoqda, ya'ni elektr toki hosil qilindi. Shuning uchun yarim o'tkazgich materiallar asosiy atomlar musbat zaryadlangan va kovalent bog'lanish buzilgan holatini biz "kovak", yangi turdag'i tok tashuvchilar deb qabul qilamiz. Demak yarim o'tkazgichlarda metallardan farqli holda 2 xil tok tashuvchilar elektron va kovaklar mayjud. Shuning uchun ham bunday materiallarda elektr o'tkazuvchanlik :

$$\sigma = en\mu_n + ep\mu_p \quad (3.4).$$

*n*-elektronlar konsentratsiyasi, *p*-kovaklar konsentratsiyasi,  $\mu_n$ ,  $\mu_p$ -elektronlar va kovaklar harakatchanligi formula yordamida aniqlanadi.

### 3.3. Fermi - Dirak taqsimoti

Fermi-Dirak taqsimoti spinga ega bo'lgan zarrachalar (elektron, kovak) uchun ishlataladi. Bu taqsimot yarim o'tkazgichlarda elektronlarning (kovaklarning) energetik sathlar bo'yicha taqsimotini aniqlash bilan birga, har qanday yarim o'tkazgichlarda Fermi sathini aniqlashi bilan birga Fermi sathi va yarim o'tkazgichlarning asosiy xossalari o'rtaqidagi bog'lanishni ko'rsatadi. Taqsimotni ko'rishdan oldin, umuman Fermi sathi nima degan savolga javob beraylik. Fermi sathi bu – metallarda  $T=0K$  bo'lganda elektronlar bilan band bo'lgan oxirgi energetik sathdir. Bundan kelib chiqadiki, Fermi sathini birligi energiya bilan o'lchanar ekan. Fermi sathidan yuqorida yotgan sathlarda elektronlar bo'lmaydi, pastkidagi sathlar elektron bilan to'lgan bo'ladi. Metallarda erkin elektronlar konsentratsiyasi undagi  $1sm^{-3}$  hajmdagi atomlar soniga teng. Masalan, *Au* ni oladigan bo'lsak unda  $1sm^{-3}$  hajmda  $5 \cdot 10^{22}$  erkin elektron mayjud. Endi bu elektronlar energetik sathlar bo'yicha qanday joylashgan. Buni bilish uchun oldin Pauli asosini hisobga olish kerak. Bu asosga asosan har qandan energetik sathda maksimum qarama-qarshi spinga ega bo'lgan 2 ta elektron joylashishi mumkin. Agar metallarda elektron konsentratsiyasi  $n=5 \cdot 10^{22} sm^{-3}$  bo'ladigan bo'lsa, bu elektronlar joylashishi uchun, Pauli asosiga asosan

$2,5 \cdot 10^{22}$  energetik sathlar kerak bo'ladi. Metallarda erkin elektronlar joylashgan eng pastki sath o'tkazuvchanlik sohasining boshlanishidan to Fermi sathigacha bo'lgan energiyarni  $5 \div 10 \text{ eV}$  atrofida bo'ladi. Agar bunday o'tkazuvchanlik sohasidagi elektron 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, metallarda o'tkazuvchanlik sohasidagi elektron sathlar shu sababli uzliksiz joylashgan deb qabul qilingan. Ammo yarim o'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 formula orqali ifodalanadi.

$$f = \frac{1}{1 + g \exp\left(\frac{E - F}{kT}\right)} \quad (3.5).$$

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 ehtimolligini ko'rsatadi. Berilgan energetik sathning kovaklar bilan band bo'lish ehtimolligi quyidagi formula bilan ifodalanadi:

$$(1 - f) = \frac{1}{1 + g \exp\left(\frac{F - E}{kT}\right)} \quad (3.6).$$

Bunda  $g$  – aynish koeffsiyenti deb ataladi. Bu koeffsiyent donor energetik sathlar uchun  $1/2$  ga, akseptor energetik sathlar uchun  $2$  ga teng.  $g$  ning fizik ma'nosi donor kirishma atomlarini ionlashi uchun, faqat aniq spinga ega elektronni ozod qilish kerak, ammo uni yana neytral holatga kelishi uchun unga  $2$  xil spinga ega bo'lgan elektronni xohlaganini olish mumkin. Demak  $g$  – ionlash va atomni neytrallash uchun kerak bo'lgan elektron spinlarning nisbatini ko'rsatadi. Yarim o'tkazgichlarda Fermi sathini qanday aniqlash mumkinligini ko'rsatishdan oldin, yarim o'tkazgich o'tkazuvchanlik sohasidagi elektronlar konsentratsiyasini aniqlab ko'raylik. Buning uchun yarim o'tkazgich o'tkazuvchanlik sohasidagi elektronlar joylashishi mumkin bo'lgan sathlar zichligi degan tushunchani kiritamiz. Albatta o'tkazuvchanlik sohasi parabola shaklida bo'lganligi uchun  $N_C$  – qiymati energiya  $N(E)$  ga bog'liq bo'ladi. Yarim o'tkazgich o'tkazuvchanlik sohasida mavjud elektronlar konsentratsiyasi quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$n = \int_{E_{co}}^E N_C(E) f \cdot dE = \int_{E_c}^{E_n} N(E) \cdot \frac{1}{1+g \exp(\frac{E-F}{kT})} dE \quad (3.7).$$

Bunda  $E_{co}$ —o'tkazuvchanlik sohasining eng quiyi energiyasiga mos energetic sath,  $E_n$ — esa o'tkazuvchanlik sohasining eng yuqori energiyaga mos keladigan energetic sath. Yarimo'tkazgichda erkin elektronlar konsentratsiyasi o'ta kam bo'lganligi va o'tkazuvchanlik sohasi sathidagi energetic sathlar, umuman band bo'lmaganligi.

$$N_c = 2 \left( \frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (3.8).$$

Uchun  $E_{co}$  ning qiymati hamma vaqt  $F$  dan ancha katta bo'ladi. U holda o'tkazuvchanlik sohasidagi elektronlar konsentratsiyasi quyidagiga teng bo'ladi:

$$n = N_c \cdot e^{-\frac{E_c - F}{kT}} \quad (3.9).$$

xuddi shunday valent sohadagi kovaklar konsentratsiyasi

$$p = N_V \cdot \exp\left(-\frac{F - E_V}{kT}\right) \quad (3.10).$$

Bunda:

$$N_V = 2 \left( \frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2}, \quad N_c = 2 \left( \frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2}, \quad (3.11)$$

$N_V, N_c$  — valent va o'tkazuvchanlik sohalaridagi energetik holatlar zichligi.

### 3.4. Elektr neytrallik tenglamasi

Muvozanat holatida har qanday yarim o'tkazgichda manfiy zaryadga ega bo'lgan zarrachalar (elektron, ionlashgan akseptor kirishma atomlar) konsentratsiyasi, musbat zaryadlangan zarrachalar (kovak, ionlashgan donor kirishma atomlar) konsentratsiyasiga teng bo'ladi. Bunga, xususiy yarim o'tkazgichlarda elektronlarning valent sohadan o'tkazuvchanlik sohasiga o'tishi bilan valent sohasida shunga mos xolda kovaklar hosil bo'ladi. Demak, xususiy yarim o'tkazgichlar uchun neytrallik tenglamasi quyidagicha ifodalanadi:

$$n = p = n_i \quad (3.12).$$

$n_i$ — xususiy zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi.

Agar yarim o'tkazgichda donor kirishma atomlari ( $N_d$ ) bo'lib ular to'la ionlashgan bo'lsa, unda neytrallik tenglamasini

$$n_i + n_d = p_a + N_d, \quad N_d = n_d, \quad n_i + n_d = n, \quad n = p + N_d \quad (3.13).$$

Kirishma atomlari to'la ion holatiga o'tmagan holatda quyidagicha bo'ladi:

$$n = p + \frac{N_d}{1 + g \exp\left(-\frac{E - E_d}{kT}\right)} \quad (3.14).$$

Agar kirishma atomlari akseptor bo'lib, to'la ionlashgan holatda esa quyidagi teng bo'ladi:  $n_i + N_a = p_i + p_a$ ,  $p_a = N_a$ ,  $p = n + N_a$  (3.15).

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

$$n_i + \frac{N_a}{1 + g \exp\left(-\frac{E_a - F}{kT}\right)} = p \quad (3.16).$$

Bunda  $p$ — valent sohadagi barcha kovaklar konsentratsiyasi.

O'tkazuvchanlik sohasidagi elektronlar konsentratsiyasini va valent sohadagi kovaklar konsentratsiyasini (3.13) va (3.15) munosabatlardan olib, ularni (3.12), (3.13), (3.14) tengliklarga qo'yib, bunday tenglamalarni Fermi sathi ( $F$ ) ga nisbatan yechilsa, yarim o'tkazgichlardagi Fermi sathini aniqlash mumkin bo'ladi. Fermi sathini to'g'ri aniqlash juda katta ahamiyatga ega, chunki  $F$  ning qiymatini bilish bilan, yarim o'tkazgich materialining taqiqlangan sohasidagi barcha energetik sathlarning elektronlar bilan band bo'lish ehtimolligini aniqlash mumkin bo'ladi. Bunday energetik sathlarni aniq bilish yarim o'tkazgich materiallarining termik, foto va optik xossalari boshqarish imkoniyatini beradi.

### 3.5. Xususiy yarim o'tkazgichlar

Yuqorida keltirilganidek, bunday materiallarda erkin elektronlar va kovaklarning konsentratsiyasi o'zaro teng bo'ladi.  $n = p = n_i$  (3.12) bu tenglikka biz  $n$  va  $p$  ning (3.15), (3.16) munosabatlardagi ifodadan foydalangan holda neytrallik tenglamasini olamiz:

$$N_c \cdot \exp\left(-\frac{E_c - F}{kT}\right) = N_V \cdot \exp\left(-\frac{F - E_V}{kT}\right) \quad (3.17).$$

Bu tenglamadan Fermi sathining qiymatini topamiz:

$$F = \frac{E_c - E_V}{2} + kT \cdot \ln \frac{N_V}{N_c} \quad (3.18).$$

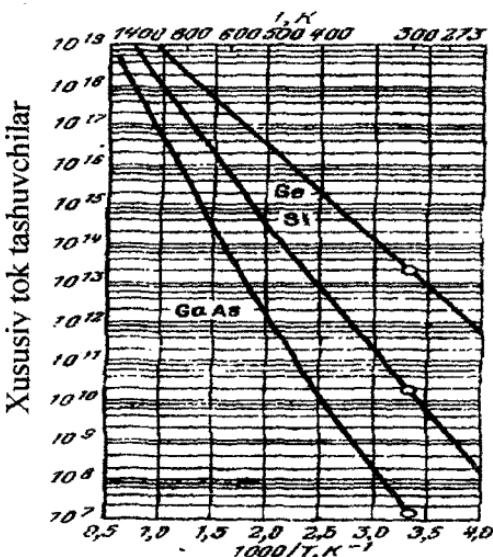
$$T=0K \text{ bo'lganda, } F = \frac{E_c - E_V}{2} = \frac{E_g}{2} \quad (3.19).$$

Ifodaga teng bo'ladi. Demak, xususiy yarim o'tkazgichlarda Fermi sathi taqiqlangan soha o'ttasida yotar ekan. Fermi sathini qiymatini

(3.19) ifodaga qo'yib, xususiy tok tashuvchilar konsentratsiyasini topamiz:

$$n_i^2 = n \cdot p, n_i = (N_c \cdot N_V)^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (3.20).$$

Bu tenglik hamma yarim o'tkazgichlar uchun o'rnlidir. Bu tenglik tok tashuvchilar konsentratsiyasini taqiqlangan soha kengligi oshib borishi bilan eksponensial kamayib borishini hamda berilgan  $E_g$  qiymatida harorat oshishi bilan  $n_i$  eksponensial qonun bilan oshib borishini ko'rsatadi. Quyidagi jadvalda  $E_g$  lari har xil bo'lgan yarim o'tkazgichlarda  $T=300K$  da xususiy tok tashuvchilar konsentratsiyasi keltirilgan:



**3.1 – rasm.** Ge, Si, GaAs yarim o'tkazgich materiallarida xususiy tok tashuvchilar konsentratsiyasini haroratga bog'liqlik grafиги keltirilgan.

Bunda shuni hisobga olish kerakki, yarim o'tkazgichlarda  $E_g$  qiymati doimiy emas balki, harorat oshishi bilan o'zgaradi:

$$E_g = E_{go} (1-\alpha T) \quad (3.21).$$

bunda  $E_{go}$  –  $T = 0K$  bo'lgandagi taqiqlangan soha qiymati,  $\alpha$  –  $E_g$  ning harorat koeffsiyenti. Demak  $n_i$  ni haroratga bog'liqlik o'zgarishini aniq hisoblash uchun (3.21) ifodani e'tiborga olish lozim. Quyidagi jadvalda asosiy yarim o'tkazgichlar uchun  $\alpha$  ni qiymati keltirilgan.

**3.2 – jadval. Yarim o'tkazgich materiallari uchun α (harorat koeffsiyenti) ning qiymatlari**

№	Yarim o'tkaz gich mater- riali	α, 10 <sup>-4</sup> (eV/g·rad)	№	Yarim o'tkaz- gich mate- riali	α, 10 <sup>-4</sup> (eV/g·ra d)	№	Yarim o'tkaz- gich materiali	α, 10 <sup>-4</sup> (eV/g·r ad)
1	Si	7,021	3	6H-SiC	-0,3055	5	InP	4,906
2	Ge	4,561	4	GaAs	8,871	6	InAs	3,158

### 3.6. Kirishma atomli yarim o'tkazgichlarda Fermi sathi

Kirishma atomlarni yarim o'tkazgich materiallarning taqiqlangan soxasida hosil qilgan energetik sathlar 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 keltirilgandek neytrallik tenglamasi har-xil bo'ladi. Agar materialga  $N_d$  konsentratsiyasi va energetik sath energiyasi  $E_d$  teng donor kirishma atomlar kiritilgan bo'lsa, u holda neytrallik tenglamasi donor atomlari to'la ionlashgan holatda quyidagi ifodaga keladi:

$$n = n_o + n_d, \quad n_d = N_d^+, \quad n_o + n_d = N_d^+ + p \quad (3.22).$$

bu holda valent sohadagi kovaklar soni,  $n$  va  $N_d^+$  ga nisbatdan o'ta kam bo'lgani uchun (3.22) tenglamadagi  $p$  ni hisobga olmasa ham bo'ladi, unda (3.22) tenglama  $n_o + n_d = N_d^+$  endi  $n$ ,  $N_d^+$  qiymatlarni (3.22) ga qo'yib tenglamadan Fermi sathini topamiz:

$$n = N_d^+, N_c \cdot e^{-\frac{(E_C-E)}{kT}} = \frac{N_d^+}{1 + \exp(-\frac{(E_C-E)}{kT})} = N_d \quad (3.23).$$

Unda

$$F = -\Delta E_d + kT \ln \frac{1}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{\frac{E_d}{2eKT}}{(2\pi m_n^* kT)^{3/2} - 1}} \right] \quad (3.24).$$

Bu holda Fermi sathining qiymati haroratga o'ta bog'liq bo'lib qoladi. Past haroratlarda quyidaki mana bu shart bajarilgan holatda

$$e^{\frac{E_d}{kT}} \gg \frac{2(2\pi m_n^* kT)^{3/2}}{N_d h^3} \quad (3.25).$$

Fermi sathining qiymati quyidagiga teng bo'ladi:

$$F = -\frac{E_d}{2} + kT \ln \left[ \frac{N_d h^3}{2(2\pi m_n^* kT)^{3/2}} \right] \quad (3.26).$$

(3.24) munosabatga asosan o'ta past haroratlarda, ya'ni T=0K ga teng bo'lganida, Fermi sathi quyidagi ifoda orqali ifodalanadi:

$$F = \frac{E_d}{2} (n_0 + n_d = N_a + p) = \frac{E_c - E_d}{2} \quad (3.27).$$

Demak, T=0K da Fermi sathi o'tkazuvchanlik sohani sathi bilan donor energetik sathni 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 (3.22) ifodani 2-hadi musbat bo'lib Fermi sathi o'tkazuvchanlik sohasi tomonga siljiydi, ammo temperatura oshgan sari ya'ni  $(2\pi m_n^* kT)^{3/2} > N_d h^3$  boshlanishi bilan 2-had manfiy ishoraga o'tadi va Fermi asta sekin past tomonga, ya'ni taqiqlangan sohaning o'rtasi tomon siljiydi. Yuqori haroratlarda qachonki xususiy zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi  $n_i \geq N_d$  donor konsentratsiyasi oshishi bilan material yana xususiy holatiga qaytadi va Fermi sathi yana taqiqlangan soha o'rtasida joylashadi.

Fermi sathining (3.24) qiymatini (3.25) ga qo'yish orqali donor kirishma atomlari bilan ligerlangan materiallar konsentratsiyasi donor sathlar parametrlariga bog'lanish ifodasini topamiz:

$$n = (2N_d)^{1/2} \cdot \frac{(2\pi m_n^* kT)^{3/4}}{h^{3/2}} \cdot e^{-\frac{E_d}{2kT}} \quad (3.28).$$

Formuladan ko'rilib turibdiki, elektronlar konsentratsiyasi o'tkazuvchanlik sohasida harorat oshishi bilan eksponensial suratda oshadi. Akseptor kirishma atomlari kiritilgan kovakli yarimo'tkazgich materiallarda ham xuddi yuqoridagi holatlar bo'yicha Fermi sathi kovaklar konsentratsiyasi akseptor kirishma atomlariga va haroratga bog'liqligini keltirish mumkin. Bu holda neytrallik tenglamasi  $p + p_A = n + N_a$ , ammo bunday materiallarda kovaklar konsentratsiyasi elektronlar konsentratsiyasidan juda ko'p bo'lgani uchun ( $p_A, N_a \gg n$ ) dan n ni hisobga olmasa ham bo'ladi. unda  $p + p_A = N_a$ ,  $p_A = N_a$

$p, p_A$  -lar qiymatlarni qo'yib tenglamadan Fermi sathi qiymatini topib, uni (3.22) o'rniga qo'ysak bunday materiallarda kovaklar konsentratsiya ifodasini topamiz:

$$P = (2N_a)^{1/2} \frac{2(2\pi m_p^* kT)^{3/4}}{\hbar^{3/2}} \cdot e^{-\frac{E_d}{2kT}} \quad (3.29)$$

Agar biz Xol leffekti yordamida elektronli va kovakli yarim o'tkazgichlarda elektronlar va kovaklar konsentratsiyasini har xil haroratlarda aniqlasak, asosan ifodani ikkala tomonini logarifmlasak quyidagi ifodani hosil qilamiz:

$$\ln n = \ln A - \frac{\Delta E_a}{2kT}, \text{ yoki } \ln p = \ln \beta - \frac{\Delta E_a}{2kT} \quad (3.30)$$

$\beta \cdot \ln n$  yoki  $\ln p - \frac{1}{T}$  ga nisbatdan grafik chizsak, olingan to'g'ri chiziq burchagi

$$\frac{\Delta \ln n}{\Delta(\frac{1}{T})} \cdot 2k = E_d, \text{ yoki } \frac{\Delta \ln p}{\Delta(\frac{1}{T})} \cdot 2k = E_a \text{ ya'ni biz donor va akseptor}$$

energetik sathlarining taqiqlangan sohalardagi energetik holatini topamiz. Odatda qulay bo'lishi uchun  $\ln n$  ning 1000T nisbatidan grafigi chiziladi va unda

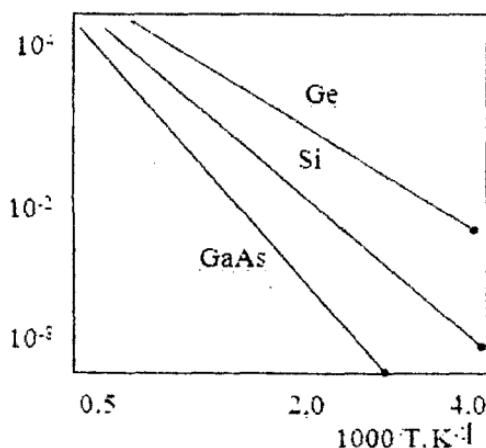
$$E_d = \frac{2k \cdot 1000 \cdot \Delta(\ln n)}{\Delta(\frac{1000}{T})} = 0,2 \cdot 2 \cdot \frac{\Delta \ln(n)}{\Delta(\frac{1000}{T})} \text{ yoki } E_a = \frac{2k \cdot 1000 \Delta \ln p}{\Delta(\frac{1000}{T})} = 0,2 \cdot 2 \cdot \frac{\Delta \ln(p)}{\Delta(\frac{1000}{T})} \quad (3.31)$$

c. Omismi:

1000    500    200

T°C

20



**3.2 - rasm.** Si, Ge va GaAs yarim o'tkazgich materiallarini o'tkazuvchanligining haroratga bog'liqlik grafigi.

Shu grafikda  $1000/T=0$  qiymatiga mos kelgan to‘g‘ri chiziqni  $\ln(n)$  bilan kesishgan qiymati va bu A yoki B qiymatiga teng bo‘ladi.

### 3.7. Donor hamda akseptorli kirishma atomlari mavjud bo‘lgan yarim o‘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  $N_a >> N_d$  material  $p$ -tur, agar  $N_a << N_d$  material  $n$ -tur, agar  $N_a$  va  $N_d$  lar yetarli darajada bir-biriga yaqin bo‘lganda bunday materiallarni kompensatsiyalangan yarimo‘tkazgichlar deb nomlanadi. Bunday xildagi materiallarda donor kirishma atomlari hosil qilgan erkin elektronlar akseptor kirishma atomlari valent sohasida hosil qilgan erkin 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 konsentratsiyasi teng  $N_d = N_a$ . holatda donor kirishma atomlari hosil qilgan o‘tkazuvchanlik sohasidagi barcha elektronlar, akseptor kirishma atomlari hosil qilgan valent sohasidagi barcha kovaklar bilan to‘la rekombinatsiyalashadi, o‘tkazuvchanlik va valent sohalarda kirishma atomlar hosil qilgan elektron va kovaklar qolmaydi va neytrallik tenglamasi

$$n_i + N_a = p_i + N_d \text{ ga teng bo‘ladi.} \quad (3.32).$$

bunda  $N_a = N_d$  bo‘lganligi uchun  $n = p$  ya’ni material yana xususiy yarim o‘tkazgich holiga qaytadi va bun materiallarda Fermi sathi quyidagi ifoda asosida aniqlanadi:

$$F = \frac{\Delta E_g}{2} + kT \ln \frac{N_V}{N_c} \quad (3.33)$$

Bunday yarim o‘tkazgichlar to‘la kompensatsiyalashgan yarimo‘tkazgich bo‘ladi, ammo u yana hususiy yarimo‘tkazgich holatiga o‘tgan bo‘lsa, o‘tkazuvchanligi hususiy yarimo‘tkazgichnikidan kam bo‘ladi. Bunga sabab, to‘la ionlashgan donor va akseptor kirishma atomlar elektronlar va kovaklar uchun qo‘srimcha sochilish markazi bo‘lib, ularni harakatchanligi kamayadi.  $N_a$  va  $N_d$  qancha ko‘p bo‘lsa, aytilgan farq yetarli darajada sezilarli bo‘ladi. Odadta xususiy

yarimo'tkazgich materialini olish texnologiyasi o'ta murakkab va ko'p energiya talab qiladi. Yuqorida ko'rsaytilganidek xususiy yarim o'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'lganda barcha donor kirishma atomlari to'liq ionlashgan bo'ladi. Material p-tur kovakli holatda bo'lib, bunda neytrallik tenglamasi quyidagicha yoziladi:  $p_a + p + N_d^- = N_a^- + n$   $n < < p$ ,  $N_d^-$ ,  $N_a^-$  va  $N_d^+ = N_d$  hisobga olsak, unda  $p_a + p + N_d^- = N_a^- p_a + p = N_a^- - N_d^+$

$p, N_a$  larning qiymatlari asosida qo'yib tenglamani yechish va undagi Fermi sath qiymati hamda kovaklar konsentratsiyasining harorat va  $N_d$  va  $N_a$  ga bog'liqligini aniqlash.

3) Agar  $N_a < N_d$  bo'lsa bunda barcha akseptor atomlari to'la ionlashgan  $N_a^- = N_a$  bo'ladi va neytrallik tenglamasi  $p < < n$ ,  $N_d$ ,  $N_a$  ni hisobga olsak  $n_d + n + N_a^- = N_d$  ga keladi. Bu tenglamada ham  $N_d^+, n$  qiymatlarini qo'yib, Fermi sathini va materialdagi elektronlar konsentratsiyani  $N_d$ ,  $N_a$  hamda  $T$  ga bog'liqligini ko'rish mumkin.

### 3.8. Birdan ko'b energetik sath hosil qiluvchi kirishma atomlari mavjud bo'lgan yarim o'tkazgichlar

Ba'zi kirishma atomlari yarim o'tkazgichning taqiqlangan sohasida birdan ortiq energetik sathlar hosil qilishi mumkin. Masalan, Zn, Cd atomlari Si da ikkita akseptor energetik sath, Se, S, Te lar esa 2 ta donor energetik sathlari Cu Ge kristallida hatto uchtdan energetik sathlarni hosil qiladi. Ikkita akseptor yoki donor energetik sathga ega yarim o'tkazgichlar uchun neytrallik tenglamasi quyidagicha yoziladi:

$$n + N_a^- + N_a^{--} = p, p + N_d^+ + N_d^{++} = n \quad (3.34).$$

$$N_a^- = \frac{N_a}{1 + g \cdot \exp\left(\frac{E_{a1}-F}{kT}\right)}, N_a^{--} = \frac{N_a}{1 + g \cdot \exp\left(\frac{E_{a2}-F}{kT}\right)} \quad (3.35).$$

$$N_d^+ = \frac{N_d}{1 + g \cdot \exp\left(\frac{F-E_{d1}}{kT}\right)}, N_d^{++} = \frac{N_d}{1 + g \cdot \exp\left(\frac{F-E_{d2}}{kT}\right)} \quad (3.36).$$

Bunda  $N_a$ ,  $N_d$  – kiritilgan kirishma atomlari konsentratsiyasi,  $E_{a1}$ ,  $E_{a2}$ ,  $E_{d1}$ ,  $E_{d2}$  - kirishma atomlar hosil qilgan birinchi va ikkinchi energetik sathlar energiyasi.

Bunday hollarda neytrallik tenglamasi uchinchi darajali tenglama bo'lib, yechimi ancha murakkab bo'ladi, bunda materialdagi asosiy tok tashuvchilar konsentratsiyasini bilgan holda, kirishma atomlarning energetik sathlarini Fermi sathiga nisbatan joylashishiga qarab, Fermi-Dirak taqsimotida hosil bo'lgan sathlarni qanchalik elektronlar bilan band yoki band emasligini topish va ularning o'tkazuvchanlikka ta'sirini aniqlashimiz mumkin bo'ladi.

Demak, Fermi-Dirak taqsimotini yarim o'tkazgich materialarda qo'llashdan maqsad, tok tashuvchilar konsentratsiyasining yarim o'tkazgich materiallarining asosiy fundamental parametrlari bo'lgan  $E_g$ ,  $N_c$ ,  $N_v$  hamda kirishma atomlarni asosiy parametrlari  $N_a$ ,  $N_d$ ,  $E_a$ ,  $E_d$  lar hamda haroratga  $T$  bog'lanish funksiyasini aniqlash imkonini beradi. Natijada quydagi ma'lumotlarni olish mumkin; 1) xususiy zaryad tashuvchilarning haroratga bog'liqlik grafigidan  $E_g$  ni aniqlash va bu orqali bizga noma'lum bo'lgan yarim o'tkazgichlarning qanday material ekanligini bilish, 2)  $n(T)$  yoki  $p(T)$  grafigida yarim o'tkazgichning taqiqlangan sohasida mavjud bo'lgan donor yoki akseptor sathlarining energetik holati bunday sathlarni hosil qilgan kirishma atomlarning konsentratsiyasini aniqlash.

### ***3 - BOB ga doir sinov savollari:***

1. *Fermi sathi nima va uning fizik ma'nosini tushintiring ?*
2. *Xususiy yarim o'tkazgichlarda Fermi sathi qanday joylashgan?*
3.  *$n$  va  $p$  turdag'i yarim o'tkazgichlarda harorat oshishi bilan Fermi sathi qanday o'zgaradi?*
4.  *$T = 0K$  haroratda  $n$  turdag'i yarim o'tkazgichda Fermi sathi holatini ko'rsating?*
5. *Fermi - Dirak taqsimotining fizik ma'nosini tushintiring ?*
6. *Taqiqlangan sohada energetik sath elektronlardan bo'sh bo'lishi uchun u Fermi sathiga nisbatan qanday joylashgan bo'lishi kerak?*
7. *Taqiqlangan sohada energetik sath elektronlar bilan band bo'lishi uchun Fermi sathiga nisbatan qanday joylashgan bo'lishi kerak?*

8. Yarim o'tkazgichlarda o'tkazuvchanlik sohasidagi elektronlar konsentratsiyasi Fermi sathini joylashishiga nisbatan qanday bog'langan?

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

10. Massalarning harakatdagi qonuni nima?

### ***Yarim o'tkazgichlarda elektronlar statistikasiga doir masalalar:***

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

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

3. Kremniy materialida  $T=50, 150, 250, 350 \text{ K}$  haroratlari bo'lganida qanday bo'ladi.

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

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

6. Elektronlar 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 elektronlar konsentratsiyasi  $n = 2 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$  teng bo'lgan Si materialida harorat  $T=300\text{K}, 500\text{K}$  hamda  $300\text{K}$  dan  $10\text{K}$  o'zgarganda Fermi sathining holatini grafik shaklda ko'rsating.

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

9. Elektronni kinetik energiyasi  $E = kT$  qiymatni  $T=20, 80, 250, 1200, 2000, 5000\text{K}$  da hisoblang va eV hamda SGS birliklar berilgandagi munosabatini ko'rsating.

10. n-turdagi yarim o'tkazgich tarkibida 2 ta har xil konsentratsiali donorlik kirishma atomlari bor bo'lgan holat uchun elektr neytrallik tenglamasini yozing.

***Yarimo'tkazgichlarda elektronlar statistikasiga doir masalalarning echilishi:***

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

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

$$F_p = kT \cdot \ln \frac{N_v}{p} \quad (3.37)$$

Bu erda  $N_v = 1,9 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ,  $k = 8,61 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$ ,  $T = 300 \text{ }^{\circ}\text{K}$  da Fermi sathini hisoblaymiz.

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

Demak R-turli kremniy materialida kovaklar konstentrasiyasi  $r = 5 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$  bo'lganda Fermi sathi  $T = 300 \text{ }^{\circ}\text{K}$  da  $F_p = 0,15 \text{ eV}$  valent sohadan yuqorida joylashgan bo'lar ekan.

## 4 - BOB Yarim o'tkazgichlarda fotoelektrik hodisalar

### 4.1 Fotoo'tkazuvchanlik

Fotoo'tkazuvchanlik bu-yarim o'tkazgichlarga tushayotgan yorug'lik ta'sirida o'tkazuvchanligini o'zgarishiga aytildi. Yorug'lik tushmasdan oldingi tok  $I_o$  ni berilgan aniq kuchlanish va haroratda aniqlaymiz. Bunda albatta yorug'lik ta'sirida yarim o'tkazgich harorati o'zgarmasligi shart. Endi yarim o'tkazgich yoritilgan vaqtdagi  $I_F$  ni aniqlaymiz. Aniqlashga toklarning qiymatini nisbati  $S = \frac{I_F}{I_o}$  - yarim o'tkazgichning fotosezgirligini ko'rsatadi. Odatda  $S$  ning qiymati yarim o'tkazgichlar tabiatini, ko'rileyotgan harorat, yorug'lik intensivligi va to'lqin uzunligiga bog'liq bo'lib bu kiritmalarni optimal tanlab olinganda  $S$  ni qiymati juda katta oraliqda o'zgarishi mumkin. Om qonuniga asosan yarim o'tkazgichdan o'tayotgan tok kuchining qiymati, solishtirma o'tkazuvchanlik bilan elektr maydon kuchlanishining ko'paytmasiga teng:

$$J = \sigma \cdot E \quad (4.1) \text{ yoki } J = en\mu \cdot E \quad (4.2)$$

Bunda  $E$  o'zgarmas qiymatga ega bo'lsa, yorug'lik ta'sirida zanjirdan o'tayotgan tokning o'zgarishi albatta zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi  $n$  va harakatchanligi  $\mu$  ga bog'liq bo'ladi. O'ta yuqori bo'limgan yorug'likning o'rtacha intensivligida  $\mu$  ni o'zgarishini hisobga olmasa ham bo'ladi. Bundan kelib chiqadiki, yorug'lik ta'sir yarim o'tkazgichda zaryad tashuvchi elektron va kovaklarning konsentratsiyasi o'zgarar ekan. Yorug'lik yo'q vaqtdagi elektronlar va kovaklar konsentratsiyasi  $n_o$ ,  $p_o$  bo'lsa, yoritilganda ular qiymati  $n_1$ ,  $p_1$  bo'ladi:

$$\Delta n = n_1 - n_o, \Delta p = p_1 - p_o \quad (4.3)$$

$\Delta n$  va  $\Delta p$  – mos ravishda yorug'lik natijasida paydo bo'lgan elektron va kovaklarni konsentratsiyasi.

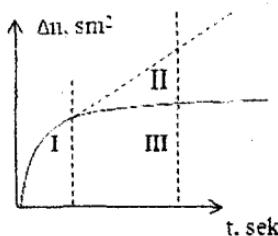
Tushayotgan foton energiyasi  $h\nu$ , yarim o'tkazgichning taqiqlangan soha kengligiga nisbatan  $h\nu \geq E_g$  qiymatga teng bo'lganda elektron

valent sohadan o'tkazuvchanlik sohasiga o'tadi va qo'shimcha erkin elektronlar hamda kovaklar hosil qiladi. Bunday jarayonni fotogeneratsiya jarayoni deb ataladi. Fotogeneratsiya jarayonida paydo bo'layotgan zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi:

$$\Delta n = \Delta p = I k \beta t \text{ ga teng.} \quad (4.4).$$

Bunda  $I$  - yorug'lik intensivligi ya'ni bir  $sm^2$  yuzaga bir sekundda tushayotgan fotonlar soni,  $k$  - yarim o'tkazgichning yorug'likni yutish koeffsiyenti, Tushayotgan fotonlarning faqat yutilgan qismigina, fotogeneratsiya jarayonida ishtirop etadi. O'lchov birligi [ $sm^{-1}$ ]  $k = \frac{1}{\Delta x} \Delta I$  - bunda yarim o'tkazgich materialining shunday qalinligiki, yorug'lik o'sha qalinlikdan o'tganda, uning intensivligini 2,7 ya'ni e marta kamaytiradi.  $\beta$  - kvant chiqish koeffsiyenti bu - bitta foton yutilganda paydo bo'lishi mumkin bo'lgan elektron - kovak jufti. Odatta  $h\nu = (I/3)E_g$  bo'lganda  $\beta = 1$  teng bo'ladi.  $t$  - yoritilish vaqt.  $\Delta n$  - yoritilish

vaqtiga to'g'ri proporsional ravishda oshib boradi. Bunga ko'ra biz qancha ko'p vaqt yoritsak,  $\Delta n$  shuncha oshadi.

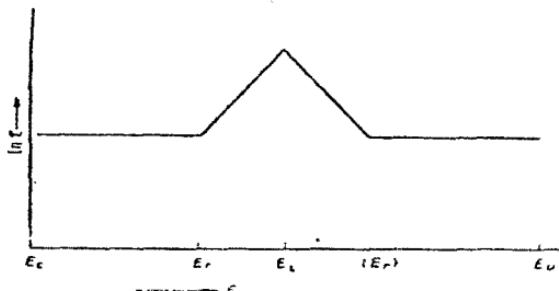


4.1 – rasm. Foto 'tkazuvchanlik.

Rasmdan ko'rinish turibdiki, tajriba natijalari nazariy natijalardan tubdan farq qiladi. Bunda  $\Delta n(t)$  bog'lanishni III-sohaga bo'lishi mumkin. 1 - yoritish vaqt juda kam bo'lganda bo'lgan soha, nazariy va tajriba natijalari bir - biriga mos tushadi. 2 - tajriba natijalari nazariy olingan qiymatlardan ancha kam soha  $\Delta n(t)$  bog'lanishi to'g'ri chiziqli bo'lmay ancha sekin o'sadi. 3 -  $\Delta n$  qiymati umuman yoritilganlik vaqtiga bo'g'liq bo'lmagan soha, bunda fototok o'zgarmas doimiy qiymatga ega bo'lar ekan.

## 4.2 Zaryad tashuvchilarining yashash vaqt

Tajriba natijalari shundan dalolat beradiki, fotogenerasiya natijasida paydo bo'layotgan erkin elektronlar o'tkazuvchanlik sohasida hamma vaqt fotogeneratsiya bo'lsa, ham o'zgarmas qolar ekan.



4.2 – rasm. Zaryad tashuvchilarining yashash vaqt

Demak, paydo bo'layotgan elektronlar va kovaklarning soni o'zaro rekombinatsiyalanganlar soniga teng bo'lar ekan ya'ni fotogeneratsiyaga har bir vaqt birligida qancha elektron paydo bo'layotgan bo'lsa, shunchasi yo'q bo'lib ketar ekan. Qisqa vaqtida yoritilganda paydo bo'lgan erkin elektron va kovaklar soni ham juda kam bo'lganda erkin elektronlar 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. Endi, vaqt o'tishi bilan elektron va kovaklar soni ortib borishi natijasida, ularning uchrashish ehtimoli ortib boradi. Endi, erkin elektron kovak bilan uchrashib, yana bog'langan elektronga aylanadi, ya'ni erkin elektron ham kovak ham yo'q bo'ladi. Yoritilish vaqt yetarlicha uzoq bo'lganda, 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  $\Delta n$  ni qiymati yoritilganlik vaqtiga bog'liq bo'lmay qoladi. Fotogeneratsiya natijasida hosil bo'layotgan erkin elektron va kovaklar bilan o'zaro uchrashib yo'qolib ketishi –rekombinatsiya jarayoni deb ataladi. Demak, fotogenerasiya bilan rekombinatsiya jarayoni hamma vaqt mayjud ekan. Savol tug'iladi, erkin elektron erkin kovak bilan uchrashguncha qancha vaqt o'tadi? Buni biz elektron va kovaklarning yashash vaqt deb ataymiz. Elektronlarning o'tgazuvchanlik sohasida bo'lish vaqt bu –uning ya'shash vaqt kovaklarning valent sohasida

bo'lish vaqt bu uning yashash vaqt bo'lar ekan. Yashash vaqtlarini  $\tau_n$  (elektron uchun) va  $\tau_p$  (kovak uchun) deb belgilab olsak, unda (4) ifoda o'rniqa qo'ysak mumkin bo'ladi.

$$\Delta n = I k \beta \tau_n, \Delta p = I k \beta \tau_p \quad (4.5)$$

unda va fotoo'tkazuvchalikning qiymati quyidagiga teng bo'ladi

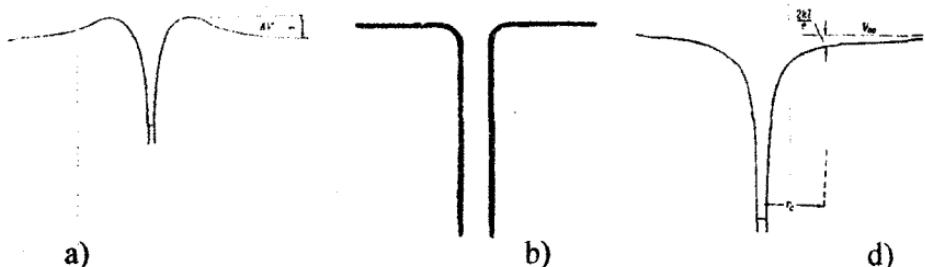
$$\Delta \sigma = \sigma_F - \sigma_O = I k \beta e (\mu_n \cdot \tau_n + \mu_p \cdot \tau_p) \quad (4.6)$$

(6)-ifodadan ko'rinib turibdiki, agar berilgan yorug'lik oralig'ida ( $I=const$ ) berilgan yarimo'tkazgichda  $k$  va  $\beta$  ni qiymati doimiy bo'lgani uchun foto o'tkazuvchanlikning qiymati asosan  $\tau_n$  va  $\tau_p$  bilan aniqlanar ekan. Odatda zaryad tashuvchilarni yashash vaqt yarim o'tkazgich materiallarida juda katta oralig'da o'zgarishi mumkin  $\tau=10^{-1} \div 10^{-1}$  sek. Demak,  $\tau$  ni boshqarish bilan fotoo'tkazuvchanlikni  $10^9$  marta ko'paytirish mumkin bo'ladi.

### 4.3 Yutish yuzasi

Elektronni o'tkazuvchanlik sohasidan sirtga tortib ushlab qoladigan keyin uning kovak bilan uchrashib rekombinasiya bo'lishiga sababchi bo'lgan markazlar-nuqsonlar hamma vaqt yarim o'tkazgichli materiallarda mavjud. Shunday markazlarning elektronni o'ziga tortib, yutib olishi o'sha nuqsonning elektronni yutish yuzasi ( $S$ ) ga bog'liq. Bunday nuqsonni odatda shar deb qabul qilsak, sharni o'rtadan bo'lganda hosil bo'lgan yuzani yutish yuzasi deyiladi. Har bir markazning o'ziga xos elektron ( $S_n$ ) va kovakni yutish yuzalar ( $S_p$ ) mavjud ekan. Biz ko'rayotgan markaz musbat zaryadlangan bo'lsa, unda markaz elektronni tortish kuchi hisobiga faqat o'sha yuza doirasida emas, balki, yuza yonidan o'tayotgan elektronni ham yutishi, ya'ni tortib olishi mumkin. Agar markaz ikki karra musbat zaryadlangan bo'lsa, uning elektronga ta'sir doirasasi yanada kengayadi. Bu holatda o'z yuzasidan ancha uzoqda bo'lgan elektronni ham tortib oladi. Musbat zaryadlangan markazning kovakni yutish yuzasi yoki tortib olish doirasini ko'rsak, unda kovak ham musbat zaryadga ega bo'lgani uchun markaz va kovak o'rtasida o'zaro itarish kuchlari natijasida yutish yuzasi kamayadi. Agar markaz ikki karra musbat zaryadlangan bo'lsa, itarish kuchlari yanada ortganligi tufayli markazning yutish yuzasi yanada kichiklashadi. Xuddi shunday, markaz bir yoki ikki karra manfiy zaryadlangan bo'lsa, unda markazni elektronni yutish yuzasi

kichiklashadi, kovakni yutish yuzasi esa kattalashadi. Bulardan, yutish yuzasi nuqson markazning o‘z atrofida hosil qilgan potensialni ko‘rsatar ekan. Quyida yutish yuzalarini marakazning zaryadlanganligiga qarab o‘zgarishini tasvirlovchi rasm keltirilgan:



**4.3 – rasm.** Elektronni yutish yuzalari: a) manfiy, b) neytral, d) musbat.

Zaryad tashuvchilar yashash vaqtin uni yutib tortib oladigan nuqsonlarni qiymati bilan aniqlanadi. Odatda nuqsonlarni zaryad tashuvchilarini yitish yuzasining  $S=10^{-13} \div 10^{-21} \text{ sm}^2$  oraliqda o‘zgaradi. Demak, biz  $\tau_n$  va  $\tau_p$  ni kiritilayotgan nuqsonlar konsentrasiyasi bilan emas, balki ularning yutish yuzasi  $S$  ni boshqarish yo‘li bilan juda katta oraliqda boshqarishimiz mumkin, bu degan so‘z fotootkazuvchanlikni ham aniqlaydigan asosiy parametr bu yarim o‘tkazgich materiallardagi mavjud nuqsonlarni-yutish yuzasi ekan. Bunga asosan yashash vaqtining qiymatlarini quyidagicha yozish mumkin:

$$\tau_n = \frac{1}{N_1 \cdot V \cdot S_n} \quad \tau_p = \frac{1}{N_2 \cdot V \cdot S_p} \quad (4.7)$$

$N_1, N_2$  – elektronlar va kovaklarni yutuvchi nuqsonlar konsentratsiyasi,  $V$  – elektronni issiqlik tezligi

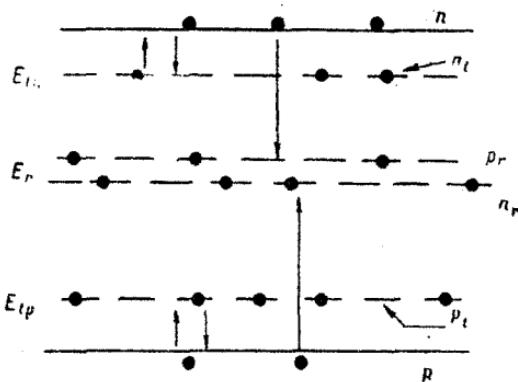
$$V = \sqrt{\frac{2kT}{m}} \quad (4.8)$$

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

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

## 4.4 Rekombinatsion va fotosezgirlikni oshiruvchi markazlar

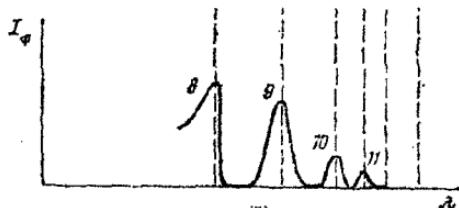
Kristall panjaradagi nuqsonlar o‘z tabiatiga mos holda yarimo‘tkazgichning taqiqlangan sohasida har xil energetik sathlar hosil qiladi. Bu energetik sathlarni ionizatsiyalashi ya’ni o‘tkazuvchanlik va valent sohalariga yaqin hamda uzoqroq joylashganligiga qarab, zaryad tashuvchilarning yashash vaqtiga har xil ta’sir ko‘rsatadi. Quyidagi rasmda uch xil faollashuv energiyaga ega bo‘lgan yarimo‘tkazgich keltirilgan. Rasmda energetik sathlar o‘tkazuvchanlik va valent sohalariga juda yaqin joylashgan bo‘lgani uchun, o‘tkazuvchanlik sohasidagi elektronlarni o‘zliga tortib, yutib olgani bilan ulardagi elektronlar issiqlik energiyasi  $kT$  hisobiga yana qaytib o‘tkazuxchanlik sohasiga o‘tishi va bu jarayon hamma vaqt yuz berib turishi mumkin. Xuddi shunday valent sohasi yaqinida joylashgan sathdan valent sohasidagi kovaklarni yutilib yana o‘z holatiga qaytihi mumkin.



**4.4 – rasm.** Uch xil faollashuv energiyasiga ega bo‘lgan yarim o‘tkazgich.

Bunday hollarda rekombinatsiya jarayoni ketmaydi. Chunki, elektron kovak bilan uchrashib yo‘q bo‘lib ketmaydi. Bunday energetik sathlar yopishuvchi energetik sathlar deb ataladi. 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  $kT$  juda katta bo‘lgani uchun energetik sathni elektronlar bilan band va bo‘sh bo‘lish ehtimoliga

qarab, yutib olgan elektronlar valent sohasidagi kovaklar bilan uchrashib o'zaro rekombinasiya bo'ladi. Energetik sathni hosil qilgan markaz nuqsonning elektron va kovaklarni yutish yuzasi nisbatiga qarab zaryad tashuvchilarni yashash vaqtini aniqlanadi. Bundan shunday hulosa chiqarish mumkin, biror energetik sathdan elektronni o'tkazuvchanlik sohasiga chiqarish ehtimoli uning shu sathlar yutish ehtimolidan katta bo'lsa, bunday energetik sathlar yopishtiruvchi sathlarga agar teskari bo'lsa, bunday sathlar rekombinasion sathlar deb ataladi. Energetik sathlarning o'tkazuvchanlik sohasidan yoki valent sohasidan taqiqlangan soha o'rtafiga siljishi ularning rekombinasion markazlariga aylanishi ehtimolligi ortadi va taqiqlangan soha o'talaridagi nuqsonlar hosil qilgan energetik sathlar faqat rekombinasion sathlar bo'lib xizmat qiladi. Quyidagi rasmda yopishtiruvchi energetik sathlari bo'lgan va ularsiz faqat rekombinasiya sathlari bor bo'lgan yaqimo'tkazgich materiallarini bir xil yorug'lik impulsi bilan yoritgandagi fototokning turg'un holatiga o'tishi impuls uchirilganda fototokning kamayishi relaksatsiyasi ko'rsatilgan. Bu relaksatsiya chiziqlaridan zaryad tashuvchilarning yashash vaqtini aniqlash mumkin.



**4.5 – rasm. Fototokning o'sish va kamayish jarayoni.**

Odatda zaryad tashuvchilarning yashash vaqtini 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 konsentrasiyasi  $N_d$  bo'lgan kremniyga ikkita energetik sath hosil qiladigan akseptor Zn ni atomlari kitirilsa va  $\frac{1}{2} N_d \leq 2N_d$  shart bajarilganda Zn elementini atomlarining asosiy qismi  $Zn^{+}$  holatda bo'ladi. Bunday markazda kovaklarni yutish yuzasi  $S_p^{-}$  juda katta bo'ladi. Ammo uni elektronni yutish yuzasi  $S_p^{+}$  juda kichik bo'ladi, ya'ni  $S_n^{-} \ll S_p^{+}$ . Bunday holatda elektronlarning yashash yaqtini keskin

oshadi, kovaklarniki esa kamayadi. Demak, yashash vaqtini ancha kichik bo'lgan elektronni yashash vaqtini oshirish hisobiga fotoo'tkazuvchanlikni shunga mos oshirishish mumkin bo'ladi. Misol uchun  $Zn$  atomlarini kiritilguncha  $\tau_n \sim 10^{-7}$ ,  $\tau_p \sim 10^{-7}$  sek bo'lgan bo'lsa, kiritilgandan so'ng  $S_p^- \sim 10^{13} \text{ sm}^2$ ,  $S_n^- \sim 10^{-20} \text{ sm}^2$  bo'ladi. U holda fotoo'tkazuvchanlik

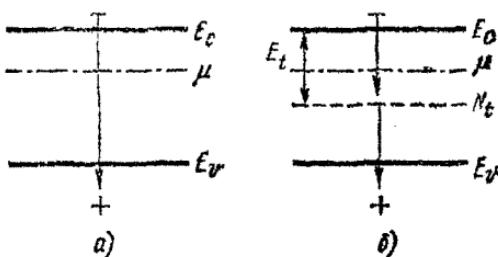
$$\Delta\sigma_o = I k \beta e (\mu_n \tau_{n_0} + \mu_p \tau_{p_0}) \quad (4.9)$$

$$\Delta\sigma_1 = I k \beta e (\mu_n \tau_{n_1} + \mu_p \tau_{p_1}) \quad (4.10) \quad \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_o} = 10^7$$

ga teng bo'ladi.  $Zn$  atomlarini ma'lum miqdorda  $n-Si$  ga kiritish bilan uning foto sezgirligini  $10^7$  ga oshirishimiz mukin. Shuning uchun  $Zn$  atomlariga mos kelgan energetik sath fotosezgirlikni oshiruvchi sath deb ataladi. Xuddi shunday  $p$ -turli  $Si$  ga  $N_d \geq N_a$  kiritish yo'li bilan kovaklarning yashash vaqtini oshirish mumkin.

#### 4.5 Rekombinatsiya turlari

Yarim o'tkazgichlarda rekombinatsiya elektron o'tishiga qarab ikki turga - sohalar aro ya'ni elektronning o'tkazuvchanlik sohasidan valent sohadagi kovak bilan to'g'ridan to'g'ri bo'ladigan rekombinatsiya hamda elektron kovak bilan rekombinatsiya bo'lishidan oldin bir rekombinatsiya markaziga yutilishi undan so'ng shu markazdan valent sohaga uchib kovak bilan rekombinatsiyalanish jarayonlariga bo'linadi.



**4.6 – 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 markaz vositasida valent sohaga o'tib kovak bilan rekombinatsiya.

I-turdagi rekombinatsiya asosan, to'g'ri sohalil yarim o'tkazgichlarda (*GaAs*, *ZnAs* ....) sodir bo'ladi. II-turdagi rekombinatsiya noto'g'ri sohaga ega bo'lgan (*Pn*, *Cu*....) yarim o'tkazgich materiallarida sodir bo'ladi. I-turdagi rekombinatsiyada elektron to'g'ri valant sohaga o'chib, kovak bilan rekombinatsiya bo'lgani uchun bunda elektron  $E_c - E_v = E_g$  ga teng energiya yo'qotadi. Bu energiyani yorug'lik energiyasi sifatida  $h\nu = E_g$  foton bo'lib chiqishi mumkin. Bunday rekombinatsiyalarni yorug'lik chiqaradigan rekombinatsiyalar deyiladi. Bu o'ta muhim xossa bo'lib, yorug'lik chiqaradigan diodlar va yarim o'tkazgich lazerlar mana shu hossaga asosan yaratiladi. Albatta bunday hollarda yarim o'tkazgichning taqiqlangan sohasida faol ishlaydigan rekombinatsiya markazlari faolligini kamaytirish kerak bo'ladi. II - tur rekombinatsiyada elektron o'z energiyasini rekombinatsiya markazini hosil qilgan atomga beradi. Elektron kovak bilan rekombinatsiya qilingan so'ng yo'qotadi energiyasini kristall panjaraga, ya'ni asosiy atomlarning issiqlik energiyasini oshirishga sarflaydi. Bunda har xil energiyaga ega bo'lgan fotonlar paydo bo'ladi. Albatta paydo bo'lgan fotonlar energiyasi fotoenergiyasidan juda kam bo'lishi bilan birga ancha katta energiya oralig'ida o'zgarishi mumkin. Demak, fotonlar kristall panjarada okustik va optik tebranishlarni yaratadi.

#### **4.6 Yorug'likning yarim o'tkazgichlarda yutilishi yoki optik hodisalar**

Yarim o'tkazgichlarda optik hodisalar o'z ichiga ko'p jarayonlarni oladi, bu yarim o'tkazgichga tushayotgan yorug'lik spektrining, yarim o'tkazgich yuzasidan qaytishi yoki yorug'likning hajm bo'ylab o'tib ketishi hamda yorug'likni yutilish jarayonlarinidir. Bu jarayonlar nafaqat o'rganilayotgan yarim o'tkazgichning eng asosiy fundamental parametrlari bo'lishi, balki sohalar tuzilishi va taqiqlangan sohadagi mavjud energetik sathlar tabiatini haqida to'la ma'lumot beribgina qolmay, shu yarim o'tkazgich materialining optik, fotoelektrik asboblar yaratishdagi funksional imkoniyatlarni ochib beradi.

Kristall yuzaga tushayotgan yorug'lik intensivligi ( $I_o$ ), sirdan qaytadigan yorug'lik ( $I_q$ ), kristalldan o'tgan ( $I_o'$ ) va qolgan qismi kristallga yutiladi ( $I_{yu}$ ).

$$I_o = I_q + I_{o'} + I_{yu} \quad (4.11)$$

Agar biz kattaliklar nisbatini oladigan bo'lsak, unda mos holda qaytish koeffsiyenti ( $R$ ), yutish koeffsiyenti ( $K$ ) va o'tish koeffsiyentini ( $T$ ) deb belgilash mumkin bo'ladi:

$$R = \frac{I_q}{I_o}, K = \frac{I_{yu}}{I_o}, T = \frac{I_{o'}}{I_o} \quad (4.12)$$

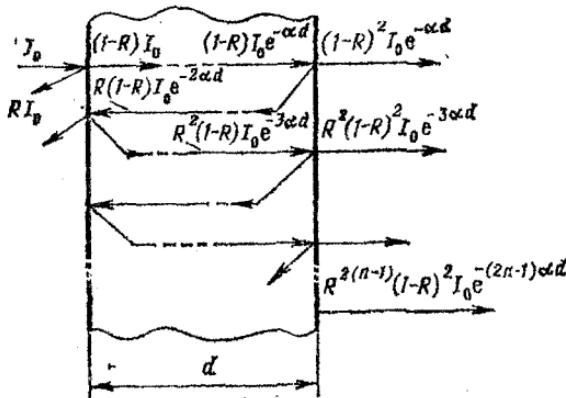
Buger-Lambert qonuni: Kristall yuzasiga tushgan yorug'lik intensivligi kristalda yutiladi va uning miqdori kristall qalinligiga eksponensial qonun bilan kamayib boradi.

$$I = I_o (1 - k) \cdot e^{-\alpha d} \quad (4.13)$$

Bunda  $\alpha$  –utilish koeffsiyenti deb ataladi va uning birligi  $sm^{-1}$ . Bu munosabatga ko'ra  $I_o(1-k)$  qiymati  $e$  marta kamayishi uchun kerak bo'lgan kristall qalinligining teskari qiymati  $\frac{1}{\Delta d} = \alpha$  bo'ladi, ya'ni  $\Delta d$  – fotonlarning erkin yugurish yo'li hisoblanadi. Utilish koeffsiyentining fizik ma'nosi bu- fotonlar atomlar bilan uchrashib, atomlar o'z energetik holatini o'zgartirishidir. Shuning uchun atomlar konsentratsiyasi qancha ko'p bo'lsa va atomlarning foton bilan uchrashish yuzasi ( $sm^2$ ) katta bo'lsa, fotonlar shuncha yutiladi.

Bundan  $\alpha = N \cdot s$  (4.14) teng bo'ladi.

Quyidagi rasmda yorug'likning yarim o'tkazgichdan qaytishi, o'tishi va yutilishi berilgan:



**4.7 – rasm.** Yorug'likning yarim o'tkazgichdan qaytishi, o'tishi va yutilishi.

Rasmdan ko‘rinib turibdiki, yorug‘lik yarim o‘tkazgichdan bir necha bor qaytadi, bu esa yorug‘likning yutilish va o‘tish xossalariga ta’sir qiladi. Bunda o‘tish koeffsiyenti quyidagiga teng bo‘ladi:

$$T = \frac{(1-k)^2 \cdot e^{-\alpha d}}{1-k^2 e^{-2\alpha d}} \quad (4.15)$$

Agar (4.15) da  $ad$  ning qiymati juda katta bo‘ladigan bo‘lsa, unda maxrajdagi ikkinchi hadni inobatga olmasak ham bo‘ladi, u holda o‘tish koeffsiyenti

$$T = (1 - k)^2 \cdot e^{-\alpha d} \quad (4.16)$$

ga teng bo‘ladi. Bundan yutilish koeffsiyentini aniqlash mumkin:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln T (1 - k)^2 \quad (4.17)$$

Agar yarim o‘tkazgich materialining qaytish koeffsiyenti  $k$  aniq bo‘lsa, unda har xil qalinlikka ega bo‘lgan bir xil yarim o‘tkazgichda yorug‘likning o‘tishini o‘lchab, yutish koeffsiyentini quydagicha aniqlash mumkin:

$$\alpha = \frac{1}{d_2 - d_1} \cdot \ln \frac{T_1}{T_2} \quad (4.18)$$

Albatta, yarim o‘tkazgichning hamma optik parametrlari  $\alpha$ ,  $T$ ,  $k$  tushayotgan yorug‘likning to‘lqin uzunligiga bog‘liq bo‘ladi. Shuning uchun yarim o‘tkazgich materiallarining optik xossalarini o‘rganishda yuqorida uchta parametrning yorug‘lik to‘lqin uzunligiga bog‘liqligi aniqlanadi. Bu parametrlarni spektral bog‘lanishi deb ataladi  $k(\lambda)$ ,  $T(\lambda)$ ,  $\alpha(\lambda)$ . Bular bog‘lanishlar tabiat, kristall tuzilishi, uning energetik sathlarini turlari, mavjud kirishma atomlar hosil qilgan energetik sathlar, kristall panjara tebranishlari, yarimo‘tkazgich materialining sirti holati, eksitonlar haqida to‘la ma’lumot olish imkonini- shu o‘rganilayotgan yarim o‘tkazgichni optik xossalari va imkoniyatlarini to‘la ochib beradi.

## **Yorug'likning yarim o'tkazgichda yutilish tabiatи haqida qisqacha ma'lumot**

Umuman olganda yarim o'tkazgichlarda yorug'likni yutilishi va uni ifodalovchi yutish koeffsiyenti α-har xil tabiatga ega bo'lgan yutilishlarni yig'indisidan iborat bo'ladi. Shuning uchun ko'rيلayotgan yutish jarayonida qaysi turdag'i 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:

1) Yorug'likning fundamental yoki xususiy yutilishi - elektronlarning valent sohadan o'tkazuvchanlik sohasiga o'tishini ta'minlaydigan yutilish.

2) Zaryad tashuvchilar (elektron va kovaklar) o'tkazuvchanlik sohasi ichidagi (elektron) yoki valent sohasi ichidagi energetik holatlarni o'zgartirishga olib keladigan erkin zaryad tashuvchilar tomonidan yutilishi.

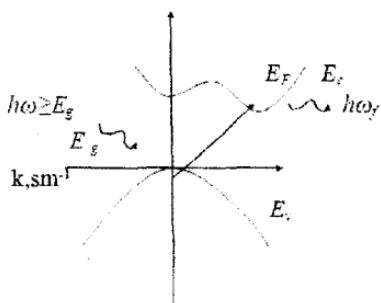
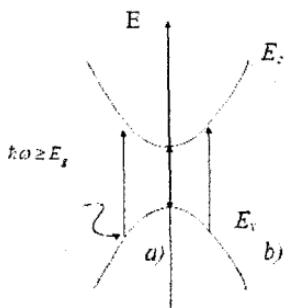
3) Elektron kirishma atomlari hosil qilgan energetik sathlardan o'tkazuvchanlik sohasiga yoki elektronlarning valent sohasidan akseptor energetik sathlariga o'tishdagi kirishma atomlar orqali yutilishi.

4) Fotoenergiyaning kristall panjara tebranishlarining xossalari o'zgartirishga olib keladigan fonon yutilish.

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

### **4.7 Xususiy yutulishlar**

Bizga ma'lumki, yarim o'tkazgichlar elektron sohalar (sohalar) tuzilishi asosan ikki xil bo'ladi, ya'ni to'g'ri elektron sohalar va noto'g'ri sohalar. To'g'ri elektron sohalar deganda, o'tkazuvchanlik sohasining minimum qiymati, valent sohasining maksimum qiymatini to'lqin vektori ( $k$ ) ning bir qiymatiga to'g'ri kelgan sohalar tuzilishiga aytildi (rasm- a). Bunday kristallarga  $GaAs$ ,  $GaP$ ... va boshqalar kiradi. Agar o'tkazuvchanlik sohasining minimum qiymati, valent sohasining maksimum qiymatlar to'lqin vektorining har bir qiymatlariga to'g'ri kelsa, bunday energetik sohalar noto'g'ri sohalar deb ataladi. Buлarga  $Si$ ,  $Ge$  kristallarini sohalar tuzilishi kiradi (rasm-b).



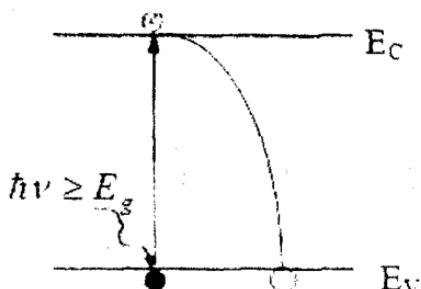
**4.8- rasm.** Yarim o'tkazgichlardagi to'g'ri (a) va noto'g'ri (b) elektron o'tishlar.

Yorug'likning soha-soha bo'yicha, ya'ni xususiy yutilish (foton yutilishi hisobiga elektronning valent sohasidan o'tkazuvchanlik sohasiga o'tishi) Bunday holatda yutilish koefsiyentini fotonenergiyaga bog'liqligi har xil bo'ladi. Xususiy yutilishning spektr bog'lanishi-valent va o'tkazuvchanlik sohalardagi energetik holatlar zichligining energiya bo'yicha taqsimoti va elektronning o'tish ehtimoliga bog'liq bo'ladi. To'g'ri yutilish-bunday holatda energiya va impuls saqlanish qonuni bajarilishi lozim, ya'ni elektronning o'tkazuvchanlik holatdagagi 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 koefsiyentining spektrga bog'liqligi quyidagicha ifodalanadi:

$$\alpha = A \cdot (hv)^{1/2} \quad (4.19)$$

Bunda  $A$ - proporsionallik koefsiyenti.

Shuni ta'kidlash lozimki, (4.19) - ifoda energetik sohalari parabola bo'lgan holatlar uchundir. Kremniy kristallining zond tuzilishi 4.9 rasmda ko'rsatilgan:



**4.9 – rasm.**  $hv$  foton yutg'an elektronorda sodir bo'ladigan jarayon.

Bunda elektronning boshlang'ich holati  $A$  va oxirgi holati  $B$  bo'lib sohalar aro o'tish ikki bosqichdan iborat bo'ladi.  $P_1$  impulsni elektron  $hv$  energiyali fotonni 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.

#### 4 - bobga doir sinov savollari:

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

*Yarim o'tkazgichlarda fotoelektrik hodisalar doir masalalar:*

1. Tushayotgan yorug'likning to'lqin uzunligi va shu yorug'lik  $\frac{1,24}{\lambda}$

fotoenergiyasini orasidagi bog'lanishni  $hv=E=\frac{1,24}{\lambda}$  ekanligini hisoblab chiqaring.

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

3. Agar yarimo'tkazgichga to'lqin 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 qonuniga asoslanib, yorug'likni jismda nisbatan yutilishini chizib bering. Yutilish koeffsiyenti  $\alpha = 10^4, 10^2, 10^1$  va  $10^{-1}$  sm $^{-1}$  bo'lgan holatlar uchun.

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

6. Fotootkazuvchanlikni 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  $\tau=10^{-9} \div 10^{-11}$  s va  $\tau=10^{-3} \div 10^{-4}$  s ga oshirish uchun nima qilish kerak.

8. To'lqin uzunligi  $\lambda = 500$  nm, 650 nm, 900 nm va 1500 nm 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 yo'q bo'lsa nima uchun?

*Yarim o'tkazgichlarda fotoelektrik hodisalar doir masalalarning yechilishi:*

Masalaning berilishi: Yarimo'tkazgichda harorat pasayishi bilan xususiy fotootkazuvchanlikka mos keluvchi yorug'likning to'lqin uzunligi qaysi tomonga siljiydi. Kremniy materialida  $T=0$  K, 100 K va 400 K tehg bo'lgan holatlar uchun hisoblang va tushuntirib bering.

Masalaning yechilishi: Tushayotgan yorug'likning to'lqin uzunligi  $\lambda_{\min} = \frac{1,24}{1,24}$

va shu yorug'lik fotoenergiyasini orasidagi bog'lanish  $h\nu = E_g = \frac{1,24}{\lambda_{\min}}$  ifodasidan yorug'likning to'lqin uzunliklarini qiymatlari topib olinadi:

$T_1 = 0$  K  $T_2 = 100$  K  $T_3 = 400$  K haroratlar uchun

---

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 - ?$

$$\lambda_1 = \frac{h\nu}{E_{g1}} = \frac{1,24 \text{ mkm}}{1,17} = 1,05 \text{ mkm} \quad \lambda_2 = \frac{1,24}{1,13} = 1,1 \text{ mkm}$$

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

$$E_g = E_{go} \pm \alpha T$$

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

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

Javob: Si da harorat oshsa, xususiy fotootkazuvchanlikka mos keluvchi yorug'likning to'lqin uzunligi ham oshib boradi.

## 5 - BOB Qattiq jismlarda elektronlarning energetik holatlari

### 5.1. Elektronlarning atomlardagi energetik holatlari

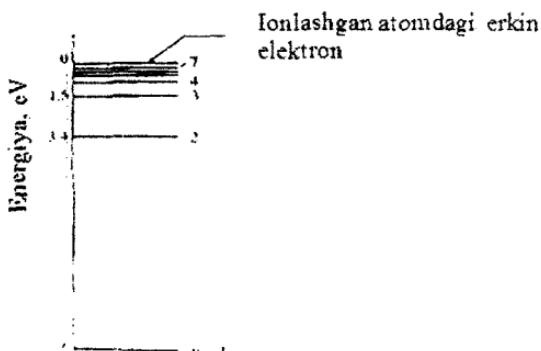
Atom yadro va uning atrofida har xil energetik holatlarda bo‘lgan elektronlardan iborat. Atom yadrosi – protonlar ya’ni musbat zaryadga ega ( $1.6 \cdot 10^{-19} K$ ), massasi elektron massasidan 1836 marta ( $m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} kg$ ) katta va radiusi  $6 \cdot 10^{-13} sm$  ga teng hamda neytronlar - elektron 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 bu elementar zarrachalarga qaraganda ancha katta o‘lchamdagagi ya’ni radiusi  $\sim 10^{-5} sm$  ga teng bo‘lgan zarracha. Bundan ko‘rinib 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 bilan ya’ni bosh kvant soni  $n$ , orbital kvant soni  $l$ , magnit kvant soni  $m$  va spin kvant soni  $s$  bilan aniqlanadi. Bosh kvant soni  $n$  ning qiymati atomdagagi elektronlar 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 Bor taklif etgan atomning planitar modeliga asosan, (bu model ikki pastulotdan iborat). 1-pastulat elektron atom atrofida xohlagan emas, balki aniq turg‘un qobiqlar bo‘yicha elektromagnit to‘lqinlarni chiqarmasdan harakatda bo‘ladi va ularning energiyasi

$$E = \frac{m \cdot e^4}{32 \cdot \pi^2 \cdot \hbar \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{1}{n} \quad (5.1)$$

bilan aniqlanadi. Bu yerda  $m$ - elektron massasi,  $\hbar$ - Plank doimiysi,  $n$  - esa bosh kvant soni ( $n=1, 2, \dots$ ),  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-13} F/m$ . 2-pastulot-elektron bir turg‘un energetik qobiqdan ikkinchisiga o‘tishi uchun qobiqlar energetik sathlarning ayirmasiga teng foton energiyasini yutish yoki chiqarishi amalga oshiriladi  $h\nu$ - foton energiyasi ( $\nu$ -chastota)

$$h\nu = E_1 - E_2 \quad (5.2)$$

Demak, bosh kvant soni energetik qobiqlar sonini, ularda joylashishi mumkin bo'lgan maksimum elektronlar miqdorini va ularning energiyasini aniqlab berar ekan. (1) formuladan ko'rinish 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. (1) formulaga asosan vodorod atomidagi elektronlar energiyasi hisoblanganda  $E_1=13.6$  eV ga teng bo'ladi. 5.1-rasmda elektronlarning energetik sathlarida-bosh kvant sonining o'zgarishi ko'rsatilgan. Rasmdan ko'rinish turibdiki,  $n$  ning qiymati oshgan sari energetik sathlar orasidagi energiyalar farqi kamayib boradi va ular oralig'ida elektronlar joylashishi taqiqlangan sohalar mavjud bo'ladi.



**5.1 – rasm.**  
Elektronning energetik sathlarida-bosh kvant sonining o'zgarishi.

Fizikada birinchi elektron orbitalani  $K(n=1)$ , ikkinchisi  $L$ , uchinchisi  $M$ , to'rtinchisi  $N$  va qolganlari  $O,P,Q$  bilan belgilash qabul qilingan.

$l$  - orbital kvant soni-bu elektronning 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.

$m$  - magnit kvant soni qiymati  $m=\pm l$  bo'lib, uning fizik ma'nosi harakat miqdori momentining magnit maydoniga nisbatan proyeksiyasini ko'rsatadi. Demak, berilgan  $n$  va  $l$  qiymatlariда  $m$  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 ten bo'ladi.

Spin kvant soni 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 holatini 4 ta kvant soni

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

$$l = (n-1) = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$$m = \pm l = (-l+1), (-l+2)$$

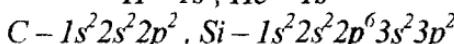
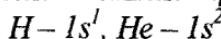
$$s = -1/2, +1/2$$

bilan aniqlansada yana bir o‘ta muhim Pauli asosini hisobga olmasdan, elektronlarning atom atrofida joylashishi to‘g‘risida to‘la tasavvur qilib bo‘lmaydi. Pauli asosi - 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  $-1/2$  2 ta 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  $N = 2n^2 = 8$  elektron bo‘lishi mumkin, ammo Pauli asosiga asosan bunday orbita 2ta dan elektron joylashadigan 4ta orbita qobiqlariga ajraladi va  $l=1$  energetik holatni  $p$  deb belgilanadi hamda  $l=1$   $2s2pp$  - holat ham o‘z navbatida 3 ta qobiqqa ajraladi.  $n=3$   $l=2$  elektron holat  $d$  bilan ifodalaniladi, bular ham o‘z navbatida Pauli asosiga asosan 5 ta qobiqqa ajraladi.

Elektron sathlarni belgilash quyidagicha bo‘ladi:

$$1 = 0\ 1\ 2\ 3\ 4\ 5\ s\ p\ d\ f\ g\ h\ qobiqlar\ 0\ 3\ 5\ 7\ 7\ 7$$

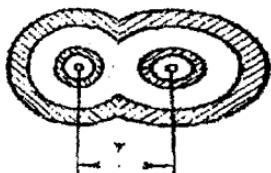
Bularga asosan atomlar elektron tuzilishi quyidagicha ifodalaniladi:



## 5.2. Qattiq jismlarda elektronlar energetik holati

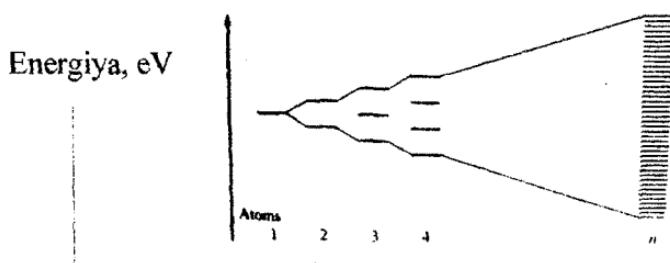
Yuqorida alohida joylashgan atomlarda elektronlarning energetik qobiqlari va sathlaridagi taqsimotini ko‘rib chiqdik. Endi mana shu

atomlar ishtirokida tashkil topgan qattiq jism kristallarida elektronlarning energetik joylashish taqsimotini ko'rib chiqamiz. Bunday holatda kristallni tashkil etgan atomlar o'rtasidagi masofa (panjara doimisi-masalan kremniyda  $d=5,4\text{\AA}$ ) juda kichik bo'ladi. Endi atomlaming yadrolarining har bir atomga tegishli elektronlarning barcha yadro va barcha elektronlarga o'zaro ta'sirini, elektronlarning energetik sarhlari va ulardagagi taqsimotiga ta'sir qilmasdan iloji yo'q. Buni aniqroq tasavvur qilish uchun ikkita bir xil atomni bir – biriga shunday yaqinlashtiraylikki, ular orasidagi masofa kristall panjara doimisiga 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 endi ikkala atom tashqi elektronlari uchun umumiy elektron qobig'i paydo bo'ladi. Ammo bu elektron qobiqda to'rtta elektron bo'lib qolganligi uchun Pauli asosiga (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.



*5.2-rasm. Ikkita atomni bir-biriga o'zaro yaqinlashtirilgandagi holati.*

Endi o'nta atomni o'zaro yaqin joylashtiraylik. Bu holatda o'nta atomning tashqi elektron qobiqlari umumiy bo'lib qoladi va ular shunga mos holda o'nta mayda energetik sathlarga ajraladi. Demak yagona atomdagi elektronlarning bir xil energetik sathlari o'miga joylashgan atomlar soniga mos mayda qobiqlarga ajralgan umumiy energetik sath paydo bo'ladi.



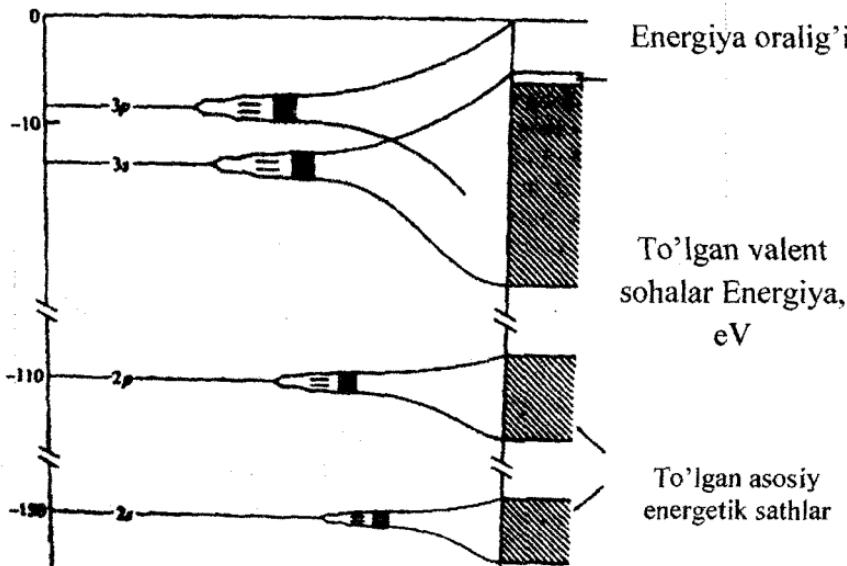
**5.3 – rasm.** O’zaro yaqinlashtirilgan 10 ta atomni energetik sathlarga ajralishi.

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

$$\Delta E = \frac{(5+10)\text{eV}}{5 \cdot 10^{22}} = (1 \div 2) 10^{22} \text{ eV} \quad (5.3)$$

ga teng o‘ta kichik qiymatdan iborat bo‘ladi. Shuning uchun bu soha ichida elektronlarning energiyasi uzlusiz o‘zgaradi deb aytish mumkin. Xuddi shunday hol atomlar ichki boshqa qobiqlarida han yuz beradi. Ammo ularning o‘zaro kirishish holati yuqorida qobiqlarga nisbatan kamroq bo‘ladi. Shunga mos holda hosil bo‘lgan energetik sath joylashgan energiya oralig‘i kamayib boradi. Demak, alohida atomda mavjud bo‘lgan elektron qobiqlar o‘rniga kristallda  $\sim 10^{22}$  ga teng, o‘ta zinch 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 5.4 rasmda *Si* atomining tashqi elektron sathlari o‘rniga, *Si* kristallida 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 2 marta ko‘p elektronlar joylashishi mumkin.

Energiya oralig'i



5.4 – rasm. Si atomining tashqi elektron sathlari o'rniغا Si kristallida hosil bo'ladigan energetik sohalar.

Elektronlarning kristalldagi energetik sathlari energetik sohalardan iborat bo'lib, har bir energetik soha bir-biridan taqiqlangan sohalar bilan ajralib turadi. Har bir energetik soha kengligi ( $eV$  hisobida) shu energetik sohani hosil qilgan atomdagi elektron qobiqlarning 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 springa ega bo'lgan 2 tadan elektron bor bo'lib, tashqi maydon qo'yilganda ularning siljishi mumkin bo'lmasligi 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 tabiatini uning elektr o'tkazuvchanlik xususiyatlarini aniqlaydi. Bunda 3 ta holat yuz beradi: 1-holda valent elektronlari hosil qilgan energetik sathlar to'lmasligi bo'ladi. Bu faqat toq valent elektronlariga ega bo'lgan atomlar ( $Cu, Ag$  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 issiqqlik energiya ( $E = kT$ ) lari hisobiga band energetik sathlardan bo'shlariga

o'tib, elektr tokini o'tkazishda qatnasha oladi. Yuqorida keltirganimizdek, hosil bo'lgan energetik sohada energetik sathlar energiyalarining farqi juda kichik ya'ni  $\Delta E = 10^{-22} \text{ eV}$  ga teng, bu esa hatto eng past harorat ( $T=1\text{K}$ ) dagi issiqlik energiyasi ( $E = 8,8 \cdot 10^{-5} \text{ eV}$ ) dan o'ta kichikdir. Bunday tashqi energetik sathga ega bo'lgan qattiq jismlar tokni juda yaxshi o'tkazadi va ular **metallar** deb ataladi. Juda ko'p metallarda valent energetik soha keyingi bo'sh o'tkazuvchanlik sohasi bilan qo'shilgan bo'ladi. 2-holatda valent elektronlari hosil qilgan energetik soha elektronlar bilan to'la band bo'ladi. Bu holatda tashqi valent elektronlar just bo'lgan atomlarga, masalan  $Si (1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p)$  tegishli bo'ladi. Agar bunday atomlarda elektron bilan band bo'lgan sohadan keyingi elektronlardan bo'sh bo'lagan energetik soha orasidagi energiya farqi, ya'ni taqiqlangan soha kengligi  $\Delta E_g < 3\text{eV}$  bilan ajralib tursa, bu materialiga tashqaridan elektr maydoni qo'yilganda, elektronlar faqat valent energetik sohasidan keyingi sohaga  $\Delta E_g$  ni yengib o'tgandagina o'tkazuvchanlikka qatnashishi mumkin bo'ladi. Endi valent elektronlarining bir sekundda keyingi bo'sh sohaga o'tish ehtimoli:

$$p = a \cdot n_o p_o e^{-\frac{\Delta E}{kT}} \quad (5.4)$$

ga teng bo'ladi. Bunda  $n_o$ -valent soha chegarasidagi elektron zichligi,  $p_o$  – bo'sh sohaning eng pastki qismida elektronlarni qabul qilish joylar zichligi. Demak,  $\Delta E_g$  qancha katta bo'lsa, ehtimollik shuncha kam, harorat qancha katta bo'lsa ehtimollik eksponensial ortar ekan. Bunday qattiq jismlarda o'tkazuvchanlik qiymati faqat  $\Delta E_g$  ga bog'liq bo'ladi. Agar  $\Delta E_g < 3\text{eV}$  bo'lsa, xona haroratida ma'lum miqdordagi elektronlar keyin bo'sh sohaga o'tib o'tkazuvchanlikda qatnashadi. Bunday qattiq jismlar yarim **o'tkazgichlar** deb qabul qilingan. 3-holat, agar  $\Delta E_g > 3\text{eV}$  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 kam bo'ladi. Bunday materiallar **dielektriklar** deb ataladi. Demak, valent elektronlarini hosil qilgan energetik sohani valent soha, undan keyingi bo'sh sohani o'tkazuvchanlik sohasi deb ataladi. Yuqorida, hosil bo'ladigan energetik sohalar va ular orasidagi taqiqlangan sohalarni qiymatlari ularni tashkil etadigan elektronlar atom

elektron qobiqlarining yadrosiga nisbatan joylashishiga bog'liq deb aytgan edik. Buning isboti sifatida IV – guruh elementlarini keltirish mumkin. Quyidagi jadvalda ularning tashqi elektron qobiqlaridagi elektronlarni bog'lanish energiyasi keltirilgan. ularning barchasini tashqi elektron qobig'ida 4 tadan elektron  $s^2p^2$  joylashgan va ular bir xil kimyoviy bog'lanishga ega bo'lganiga qaramay, ularning taqiqlangan energetik sohalarining qiymatlari bir-biridan juda farq qiladi.

*5.1 – jadval. IV- guruh elementlarining tashqi elektron qobiqlaridagi elektronlari sturukturasi va taqiqlangan soha energiyasining qiymati.*

Element	Elektron strukturası	$E_g$ , eV
C	$1s^2 2s^2 2p^2$	5,48
Si	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$	1,17
Ge	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^2$	0,74
Sn	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^2$	0,082

Shunga mos holda uglerod atomlaridan tashkil topgan olmos kristalli juda yaxshi dielektrik ( $\Delta E_g=5,6\text{eV}$ ), Si ( $\Delta E_g=1,12\text{eV}$ ), Ge ( $\Delta E_g=0,67\text{eV}$ ) lar yarim o'tkazgichlar Sn( $\Delta E_g=0,018\text{eV}$ ) va Pb lar esa xona haroratida metall xususiyatiga ega bo'ladi. Demak, kristallarda elektronlarning energetik sathlari-energetik sohalarga ega bo'lib, bunda elektronlar bilan to'la band bo'lgan ichki elektronni energetik sohalardagi elektronlarni o'tkazuvchanlikka yoki umuman shu qattiq jismning fizik xossalariiga 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 to'lqin xossasiga ega. Demak, elementar zarrachalarning o'z energiyasi  $E=h\nu$ , impulsiga  $p=kh$  va to'lqin uzunligiga  $\lambda=2\pi/k$ , tebranish chastotasiga  $v=1/\lambda$  ega bo'ladi. Bunda  $k$  – to'lqin vektori bo'lib,  $k=2\pi/\lambda$  ga teng. De-Broyl nazariyasiga asosan, elementar zarrachalarning energiyasi va to'lqin uzunligi o'rtaqidagi bog'lanish quyidagi ifoda bilan yoziladi:

$$E = \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2m\lambda^2} \quad (5.5)$$

ga teng bo'ladi.

$$\lambda_D = \frac{\hbar^2}{\sqrt{2mE}} \quad (5.6)$$

(2)-ifoda De-Broyl to'lqin uzunligi deb ataladi. Ushbu ifodadan ko'riniib turibdiki, elementar zarracha massasi  $m$  va energiyasi  $E$  qancha katta bo'lsa, uning to'lqin uzunligi shuncha kichik bo'ladi. Demak, elektronning holatini endi uning to'lqin funksiyasi  $\varphi$  bilan aniqlanadi va shunga mos holda elektronning to'la harakati Shredinger tenglamasi bilan ifodalanadi:

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V_0(r) \right] \varphi(r) = E\varphi(r) \quad \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (5.7)$$

Bunda-Laplas operatori,  $v_0(r)$ -elektronni potensial energiyasining  $r$  vektori,  $E$ -elektronning to'la energiyasi. Tenglamani elektronning potensiall energiyasining  $v_0(r)$ - berilgan holati va turiga qarab  $\varphi(r)$  ni aniqlash mumkin. Ammo elektronning kristall panjaradagi holati, uning yakka atomdag'i holatidan tubdan farq qiladi. Chunki elektronga o'zining yadrosidan tashqari barcha qo'shni atomlar yadrolari ham ta'siri qiladi. Yadrolarning o'zaro ta'siri kristall panjaraсидаги barcha elektronlarning ta'siri va shu elektronlarning o'zaro ta'siri kristalldagi elektronning potensiall energiyasini aniqlaydi:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \sum_i \frac{\partial^2}{\partial r_i^2} - \frac{\hbar^2}{2M_j} \sum_j \frac{\partial^2}{\partial R_j^2} + \sum_{i=n} \frac{Z_j z_n e^2}{R_{jn}} + \frac{1}{Z} \sum_{i \neq k} \frac{e^2}{r_{ik}} - \sum_{ikj} \frac{z_i e^2}{r_{ij}}. \\ \varphi(r_i, R_j) = \varepsilon \varphi(r_i, R_j) \quad (5.8)$$

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

yaqinlashuv tadbiq etiladi. Bu yaqinlashuvning mohiyati shundan iboratki, elektronlarga nisbatan atom yadrolarini harakati o‘z o‘mida qo‘zg‘almas deb qaraladi. Bunga sabab hatto eng kichik yadrodan iborat bo‘lgan vodorod atomini yadrosi ham elektron massasidan 1836 marta ko‘p 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:

$$E = kT = \frac{mv^2}{2} v_e = \sqrt{\frac{E}{m_e}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_e}} v_{yadro} = \sqrt{\frac{2kT}{m_{yadro}}} v_e \gg v_{yadro} \quad (5.9)$$

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 yadrolarni hosil qilgan umumiy maydoni asosida yuz bergen holda yadrolarning koordinatasi elektronning kinetik va potensial energiyalariga bog‘liq bo‘lmaydi. Unda (4) tenglamani elektron uchun quyidagicha quyidagicha quyidagicha yozish mumkin bo‘ladi:

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \sum_i \frac{\partial^2}{\partial r_i^2} + \frac{1}{Z} \sum_{i \neq k} \frac{e^2}{r_{ik}} - \sum_{ikj} \frac{z_i e^2}{r_{ij}} \right] \varphi(r_i, R_j) = \varepsilon \varphi(r_i, R_j) \quad (5.10)$$

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 ikkinchi bir elektron yaqinlashuv usulini ko‘ramiz. Buning mohiyati-kristallda elektronlarning o‘zaro bir-biri bilan ta’sirlashishi o‘rniga ko‘rilayotgan elektronni boshqa bir elektron tomonidan hosil qilgan o‘rtacha elektr maydon ta’sirida almashtiramiz. Bunda kristalldagi barcha elektronlar yagona yangi effektiv zaryadga ega  $\langle zarracha \rangle$  ta’sirida qolib, ko‘rilayotgan elektronning harakat holati mana shu zarracha hosil qilgan maydon ta’sirida deb qarash mumkin. Bunday yaqinlashish kristallarda barcha va har xil koordinatsion vektorlarga ega bo‘lgan elektronlar

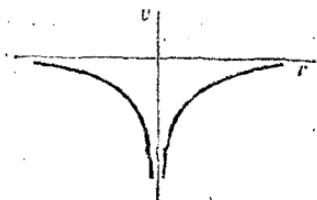
o'zoro cheksiz miqdordagi ta'sirlashuvni ko'p elektronlik ta'sirlashish muammosidan qutilishga olib keladi. Endi kristalldagi elektron uchun Shredinger tenglamasi quyidagicha yoziladi:

$$\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\varphi(r)}{dr^2} - [V(r) + \Omega(r)]\varphi(r) = E\varphi(r) \quad (5.11)$$

Demak,  $v(r)$  ko'rileyotgan elektronning harakatsiz ionlar hosil qilgan maydondagi ta'sirlashuv potensiallli,  $\Omega(r)$  esa o'sha elektronning barcha elektronlar hosil qilgan maydon bilan ta'sirlashishi potensial energiyasidir:

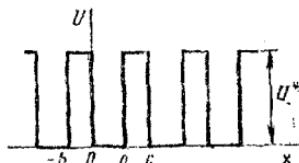
$$V(r) + \Omega(r) = U(r) \quad (5.12)$$

Ifodadan kristalldagi elektron uchun Shredinger tenglamasi yuqoridagi elektron holatini aniqlaydigan tenglamaga mos bo'lib qoladi. Bilamizki, yakkalangan (alohida) atomdag'i  $v_o(r)$  – potensial energiya giperbola shakliga ega bo'ladi.  $v(r)$  – bir xil takrorlanuvchi giperbola shaklida bo'ladi



**5.5 – rasm.** Yakkalangan atomda ko'rileyotgan elektronning harakatsiz ionlar hosil qilgan maydondagi ta'sirlashuv potensial energiyasining giperbola shakliga ega bo'lishi.

(5.12) 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 davriyiligi – bir xil ifodaviy formada, bir xil masofada doimiy takrorlanuvchi funksiya ekanligidadir.



**5.6-rasm.** Kronig-Penin kristallida elektronning aproksimatsiya potensial funksiyasi.

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

$$\frac{ma}{h^2} bU = P = \text{cons} \quad (5.13)$$

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

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

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

3)  $P \gg 1$  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, elektronni alohida atomdagagi va erkin holat o'rtaqidagi vaziyatlariga mos keladi.

Bunday holatda elektron diskret energetik sathlarda emas, balki bir – biridan ma'lum kenglikka ega bo'lgan taqiqlangan sohalar bilan ajralgan energetik sohalarda (sohalarda) joylashadi. Elektronni 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 tabiatini va tuzilishi bilan aniqlanar ekan.

### 5.3 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 2-qonuniga asosan quyidagicha yozamiz:  $F = eE = m \cdot a = m \cdot dv/dt$ . 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 potensiali 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 potensialiga mos o'zgarib turganligi uchun, kristalldagi elektron harakat yo'nalish trayektoriyasini aniq o'lhash juda murakkab bo'ladi. Bu masalani yaxshiroq tushunish uchun quyidagi hodisani ko'rib, chiqamiz. Havoda yuqorida tushayotgan jism tezlanishi  $g$  bo'lsiri, u yerning tortish kuchi  $F_T = mg$  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:

$$g = \frac{F_T - F_A}{m}, F_A = \rho_s V g, F_T = mg = \rho V g \quad (5.14)$$

bunda  $V$  – suyuqlik hajmi,  $\rho$ ,  $\rho_s$  – havo va suyuqlik zichligi.

Unda jismning suyuqlikdagi tezlanishini quyidagicha yozishimiz mumkin bo'ladi:

$$a = \frac{F_T - F_A}{m^*} = \frac{V(\rho - \rho_s)}{m^*} = \frac{F_T}{m^*} m^* = \frac{m}{\frac{1 - \rho_s}{\rho}} \quad (5.15)$$

Bundan ko'rinish turibdiki, suyuqlikda jismning og'irlik kuchi ta'siridagi harakatida jismning massasi qandaydir yangi holat  $m^*$ -effektiv massa bilan tushuntirish qulay.  $\rho_s/\rho$  ning qiymatiga qarab,  $m^*$  m dan kichik bo'lib, musbat hatto manfiy ham bo'ladi. 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 potensialini birgalikda ko'rsatilayotgan ta'sirini ko'rsatuvchi kattalikdir. Effektiv massa-massaga xos modda miqdori va enertsiya o'lchov birligiga xos xususiyat emas, ya'ni u elektron massasi hisoblanmaydi. Bizga ma'lumki, elektron elementar zarracha bo'lganligi uchun u ham zarracha va to'lqin xossalariiga egadir. Kvant fizikasida asosan elektronning energiyasi uning De – Broyl to'lqin uzunligi bilan quyidagi ifoda orqali bog'langan:

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

$$E = \frac{mv^2}{2}, mv = p, E = \frac{p^2}{2m}, p = hk \quad (5.16)$$

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

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

Bu ifodaning birinchi darajali hosilasi elektronning tezligini beradi:

$$\frac{1}{h} \frac{dE}{dk} = \frac{hk}{m\lambda} V \quad (5.17)$$

Ikkinchi darajali hosilasi esa tezlanishni beradi:

$$a = \frac{dV}{dt} = \frac{1}{h} \frac{d}{dt} \left( \frac{dE}{dk} \right) \quad (5.18)$$

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

$$dA - dE = FdS = F\bar{V}dt \quad (5.19)$$

Bunda

$$\frac{dE}{dt} = F\bar{V} \quad (5.20)$$

(5.21) ni ifodani (5.20) ifodaga qo‘yib, tashqi ta’sir kuchini  $k$  ga bog‘liq emasligini hisobga olsak bo‘ladi

$$\bar{a} = \frac{d\bar{V}}{dt} = \frac{1}{h} F \frac{d\bar{V}}{dt} \quad (5.21)$$

(5.19) ifodadan yana bir marta hosila olsak, quyidagi ifodaga kelib chiqadi:

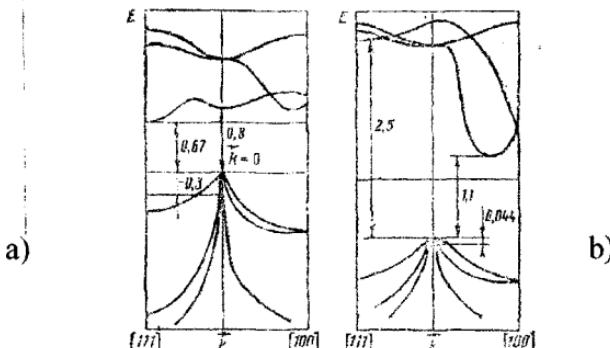
$$\bar{a} = \frac{d\bar{V}}{dt} = \frac{1}{h^2} F \frac{dE}{dk^2} \quad (5.22)$$

Endi bu ifoda Nyutonning 2 – qonuniga mos keladi va unda

$$F = ma = h^2 \frac{1}{\frac{d^2 E}{dk^2}} \cdot a = m^x a \quad (5.23)$$

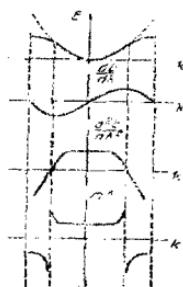
$$m^x = \frac{h^2}{\frac{d^2 E}{dk^2}} \quad (5.24)$$

Bu ifodani elektronning effektiv massasi deb qabul qilamiz. Bu effektiv massa-odatdagи massa xos bo‘lgan inertsiya o‘lchovi, og‘irlik tortish kuchi va modda miqdori kabi xossalarga ega bo‘lmagan kattalikdir. (5.19) -ifodaga mos yarim o‘tkazgichlar elektron energiyasining to‘lqin vektoriga bog‘liqlik sohalari diagrammasi keltirilgan. Bundan ko‘rinib turibdiki, elektron energiyasi bu to‘lqin vektori bo‘yicha o‘zgaruvchi kattalik ekan.



5.7 - rasm. Germaniy (a) va kreminiy (b) ning energetik soha strukturasi.

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



5.8 – 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’nosи-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 holatni musbat

zaryadlangan kovak deb qabul qilingan va uning harakati elektron harakatini bir-biriga uzatish estafeta harakatidan iborat. Ya. 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 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 yarim o'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 yarim o'tkazgich materiallarida energetik sohalar sferik bo'lganligi uchun effektiv massa tenzor kattalik hisoblanmaydi. Quyida *Ge* va *Si* yarim o'tkazgich materiallari uchun elektron va kovaklarni effektiv massalarining elektronning haqiqiy massasiga nisbati berildi. Bu kattaliklar ushbu materiallarning fizik xossalari va fundamental parametrlarini o'rganishda hamda hisoblashlarda qulaylik tug'diradi.

*5.2 – jadval. Ge va Si yarim o'tkazgich materiallari uchun elektron va kovaklarni effektiv massalarining elektronni haqiqiy massasiga nisbati.*

Yarim o'tkazgich	$\frac{m_{II}^*}{m_o}$	$\frac{m_{\perp}^*}{m_o}$	$\frac{m_{p1}^*}{m_o}$	$\frac{m_{p2}^*}{m_o}$	$\frac{m_{p3}^*}{m_o}$
Germaniy( <i>Ge</i> )	1,58	0,08	0,33	0,042	0,077
Kremniy ( <i>Si</i> )	0,91	0,19	0,49	0,16	0,245

*5 - bobga doir 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‘langan?
- 4) Bor taklif etgan atomning planar modelini aytib bering
- 5) Pauli asosini fizik ma’nosi nima?
- 6) Agar atomda valent elektronlari hosil qilgan energetik sathlar to‘lmagan bo‘lsa, unda qanday jarayon yuz beradi?
- 7) Qattiq jismilar hisoblangan metall, yarim o’tkazgich va dielektriklarda energetik sohalar qanday joylashgan?
- 8) To‘qin soni, to‘lqin vektorining fizik ma’nosi nima?
- 9) Qattiq jismarda 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 jismarda elektronlarning energetik holatlariga 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, kremni esa yarim o’tkazgich.
- 5) Si, Ge, GaAs moddalarining taqiqlangan sohalarini keltiring va tushuntirib bering.
- 6) Dielektrik moddalariga misol keltiring va ularning solishtirma qarshiligi qanday bo‘ladi?
- 7) Elektron, vodorod atomi, proton va neytronlar uchun De – Broyl to‘lqin uzunligini hisoblang va tushuntirib bering.
- 8) Si elektronlarning effektiv massalari qanday qiymatlarga ega, kovaklarnikichi?

## 6 - BOB

### 6.1. Yarim o'tkazgichlarda kinetik hodisalar

Kinetik hodisalar deganda – yarim o'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, elektr yurituvchi kuchlar hosil bo'lishiga aytildi. Tashqaridan biror ta'sir bo'limgan yarim o'tkazgichdagitok tashuvchilar muvozanat holatda bo'ladi. Demak, moddani tashkil etgan barcha atomlar va elektronlar energiyasi, moddani o'rabi 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 yarim o'tkazgichdagi barcha elektronlar tartibsiz issiqlik harakatida bo'ladi. Ularning yo'nalishlar bo'yicha taqsimoti ham bir xil bo'lganligi uchun bir tomonqa qancha elektron harakat qilayotgan bo'lsa, unga qarama – qarshi tomonqa ham shuncha elektron harakatda bo'ladi. Natijada yarim o'tkazgichda tok hosil bo'lmaydi. Yarim o'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:

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

Nazariy qaraganda (6.1)-ifodaga mos elektronning tezligini cheksiz oshirish mumkin bo'lar edi. Ammo, yuqorida boblarda ko'rsatilgandek, elektronning harakatigakristall 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 degan so'z elektron ikki ta to'qnashuv orasida erkin harakat qilib ma'lum masofa ( $l$ ) ni bosib o'tadi.  $l$  – elektronning erkin yugurish masofasini  $t$  – ikki to'qnashuv orasidagi vaqt (elektronning erkin yugurish vaqt).

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

Bunda  $\tau$  – 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 tushuniladi. U relaksatsiya vaqt deb atalib, tashqi ta'sir to'xtagandan so'ng tizimni yana muvozanat holatiga qaytib kelishi uchun lozim bo'lgan vaqt hisoblanadi. Demak, kristalda 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'ladi. 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 uni yana takroran muvozanatga qaytarishiga olib keladi. Tashqi elektr maydon ta'sirida yarim o'tkazgichdan tok o'ta boshlaydi va uning qiymati elektr maydon  $E$  ga bog'liq bo'ladi:

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

Bunda  $\sigma$  – proporsionallik koefsiyenti bo'lib, elektr o'tkazuvchanlik deb ataladi. Agar yarim o'tkazgichning bir qismida harorat oshirilsa, o'sha joyda elektronlar konsentratsiyasi oshib, harorat pasaygan tomon diffuziya bo'la boshlaydi. Natijada yarim o'tkazgich issiq va sovuq tomonlari orasida elektr yurituvchi kuch paydo bo'ladi, uning qiymati

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

$\alpha$  – yarim o'tkazgichni solishtirma issiqlik o'tkazuvchanlik koefsiyenti deb ataladi.

Agar yarim o'tkazgichga bir vaqtning o'zida 2 xil tashqi kuch masalan elektr ( $E$ ) va magnit maydoni ( $B$ ) o'zaro perpendikulyar holda ta'sir etsa, unda elektr va magnit maydon yo'nalishlariga perpendikulyar bo'lgan yon tomonlarida Xoll elektr yurituvchi kuchi ya'ni Xoll elektr potensiali paydo bo'ladi. Uning qiymati

$$u_X = R_X \frac{J-B}{t} \quad (6.5) \text{ga teng.}$$

Bunda proporsionallik koefsiyenti  $R_X$  – Xoll koefsiyenti deb ataladi. Xuddi shunday yarim o'tkazgich materiallariga yorug'lik ta'sir etganda yoki bir vaqtning o'zida yorug'lik va magnit maydon, yorug'lik

va elektr maydoni yoki boshqa kuchlar ta'sir etganda, shunga mos yangi fizik hodisalar – Dember effekti, fotomagnit effekt va boshqalar yuzaga keladi.

## 6.2. Yarim o'tkazgichlarda zaryad tashuvchilarning harakatchanligi

Yuqorida keltirilgandek, tashqi elektr maydoni ta'sirida elektronlar o'rtacha qo'shimcha 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 to'qnashushi natijasida uzlusiz oshmasdan, o'z miqdori va yo'nalishini o'zgartirib turardi.  $\tau$  – elektronning relaksatsiya vaqtini bo'lib, uning qiymati panjaradagi nuqsonlar tabiatini va konsentratsiyasiga bog'liq bo'ladi. Bizga ma'lumki, yarim o'tkazgichga elektr maydoni ( $E$ ) ta'sir etganda undan o'tayotgan tok zichligi 6.7 ifodaga teng bo'ladi.

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

$$j = -en\bar{V} \quad (6.7)$$

(6.6) va (6.7) – ifodadan elektron o'rtacha tezligi topilsa:

$$\bar{V} = -\frac{\sigma E}{en} \quad (6.8) \text{ teng bo'ladi}$$

Elektronni maydon ta'siridagi olgan tezligini qiymati (6.6) ni

$$\frac{eE}{m} \cdot \tau = \frac{\sigma E}{en} \quad (6.9) \text{ hosil bo'ladi}$$

Bunda  $\sigma$  – yarim o'tkazgichning solishtirma o'tkazuvchanligi bo'lib:

$$\sigma = en \frac{e}{m} \cdot \tau \quad (6.10)$$

Elektronlarning yana bir muhim xususiyatlaridan biri bu – elektronlarning harakatchanligi bo'lib, u quyidagiga teng bo'ladi:

$$\frac{e}{m_n} \cdot \tau = \mu_n \quad (6.11)$$

Demak, bundan ko'rinish turibdiki, elektronning harakatchanligi faqat  $\tau$  ya'ni relaksatsiya vaqtini bilangina aniqlanar ekan.  $\sigma = en\mu$  Metallarda relaksatsiya vaqtini – ulardag'i mavjud  $\sim 10^{22} \text{ sm}^{-3}$

elektronlarning o‘zaro to‘qnashuvi bilan aniqlanadi va  $\tau - 10^{-12}$  sga teng bo‘ladi. Yarim o‘tkazgich materiallarda esa elektronlar konsentratsiyasi  $n \sim 10^{13} \div 10^{16} \text{ sm}^{-3}$  bo‘lganligi uchun  $\tau$  ning qiymati asosan elektronning panjaradagi nuqsonlar bilan to‘qnashuvi bilan aniqlanadi. Bundan ko‘rinadiki, agar relaksatsiya vaqt cheksiz bo‘lsa, elektronlar harakatida hech qanday to‘qnashuvar yuz bermaydigan holat kuzatilib, unda harakatchanlik va modda solishtirma o‘tkazuvchanligi o‘ta o‘tkazuvchanlik holati kuzatiladi. Biz yuqorida elektronlarning har xil nuqsonlarda sochilishi mavjud ekanligini aytdik. Endi ushbu sochilish tushunchasini ham ozgina yoritib o‘taylik. Avvalo sochilish 2 xil bo‘ladi: elastik – ya’ni sochilishda elektron o‘zining kinetik energiyasini yo‘qotmaydi va faqat o‘z yo‘nalishini o‘zgartiradi. Bunday sochilish elektronning unga nisbatan massasi juda katta bo‘lgan kirishma atomlar bilan to‘qnashganda sodir bo‘ladi. 2 – xil elastik bo‘lmagan sochilish – elektron o‘z energiyasini o‘zgartirishi oqibatida, ya’ni o‘zidan massasi kichik bo‘lgan nuqsonlar – fotonlar, fononlar bilan to‘qnashuvi asosida yuz beradi. Endi to‘qnashuv va sochilish hodisalarining mohiyatini ko‘rib chiqaylik. Elektronlar kristalldagi kirishma atomlari yoki ionlar bilan to‘g‘ridan – to‘g‘ri to‘qnashmagan holda ularning ta’sir doirasi chegarasiga kirishi bilan o‘z 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. 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 bo‘ladi. Bularning hammasi elektron harakatchanligini chegaralovchi faktorlardir. Elektron harakatchanligi nuqsonlar tabiatida va haroratga qarab qanday o‘zgarishi bu sochilish mexanizmlari bilan aniqlanadi. Bu mexanizmlarni ko‘rib chiqishdan oldin unga asos bo‘lувchi kinetik hodisalar mohiyatini ochib beruvchi Boltzman nazariyasi bilan tanishib chiqaylik.

### **6.3 Boltzman tenglamasi**

Sistema muvozanat holatda bo‘lganida taqsimot funksiyasi  $f$  (elektronlarning energetik sathlar bo‘yicha taqsimoti) – zaryad tashuvchilar koordinatlari ( $r$ ), to‘lqin vektori ( $k$ ) va albatta vaqt ( $t$ ) ga bog‘liq bo‘lib, uning ifodaviy ko‘rinishi quyidagicha bo‘ladi:

$$V = \frac{dr}{dt}, \frac{d}{dt} f(r, k, t) = \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial k} \frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial t} + (V \nabla_r f) + \frac{1}{h} (F \nabla_k f) \quad (6.12)$$

*V*-elektronni tezligi, *F* – elektronga umumiy ta’sir etuvchi kuch bo‘lib, ichki va tashqi ta’sir kuchlarini yig‘indisidan iborat bo‘ladi. Muvozanatholatda  $df/dt=0$  bo‘lishini hisobga olib (6.12) ifodani quyidagini yozish mumkin:

$$-\frac{\partial f}{\partial t} = (V \nabla_r f) + \frac{1}{h} (F \nabla_k f) \quad (6.13)$$

Umumiy ta’sir kuchni ichki ( $F_i$ ) va tashqi ( $F_t$ ) ta’sir kuchlar yig‘indisi ekanligini hisobga olsak unda (6.13) – ifoda quyidagi ko‘rinishga keladi:

$$-\frac{\partial f}{\partial t} = (V \nabla_r f) + \frac{1}{h} (F_i \nabla_k f) + \frac{1}{h} (F_t \nabla_k f) \quad (6.14)$$

Ichki kuchlar bu – elektronlarning kristall panjara nuqsonlarida sochilishidan iborat bo‘ladi. Agar elektronlar sochiladigan nuqsonlar orasidagi masofa  $\sim 10^{-6} \text{ sm}$ , ya’ni bir necha o’n panjara doimiyisiga teng deb olsak, elektronni nuqson bilan to‘qnashish (unda sochilish) vaqt  $\sim 10^{-13} \text{ s}$  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 yozishimiz mumkin:

$$-\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_i = \frac{1}{h} (F_i \nabla_k f) \quad (6.15)$$

Endi tashqi ta’sir natijasida elektronlarning harakatga kelishi tufayli taqsimot funksiyasining o‘zgarishi quyidagicga teng bo‘ladi:

$$-\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_t = (V \nabla_r f) + \frac{1}{h} (F_t \nabla_k f) \quad (6.16)$$

(6.15) va (6.16) – ifodalarning yig‘indisi – taqsimot funksiyasining umumiy o‘zgarishini ko‘rsatadi. Bu esa Boltzman tenglamasi deb ataladi va quyidagicha ko‘rinishga ega bo‘ladi:

$$df/dt = (df/dt)_i + (df/dt)_t \quad (6.17)$$

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 bo‘ladi:

$$\frac{df}{dt} = 0, \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_i + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_t = 0 \quad (6.18)$$

Tashqi ta'sir kuchlar tabiat umuman olganda ma'lum masala ichki ta'sir kuchlar tabiatini chuqurroq tahlill qilish va mohiyatini o'rganishni lozimligini taqozo qiladi. Bunda tashqi ta'sir to'xtagandan so'ng tizimning muvozanat holatiga qaytish jarayoni quyidagicha ifodalanadi:

$$-\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_i = \frac{f(r,k,t) - f_o(r,k)}{\tau(k)} = \frac{\Delta f}{\tau(k)} \quad (6.19)$$

$f(r,k,t)$  – tashqi ta'sir to'xtagan vaziyatdagi taqsimot funksiyasi,  $f_o(r,k)$  – muvozanat holatdagi taqsimot funksiyasi,  $\Delta f$  – tashqi ta'sir natijasida taqsimot funksiyasining vaqt o'tishi bilan yo'qolishi lozim bo'lgan o'zgargan qiymati. Agar (6.19)– ifodani integrallaydigan bo'lsak, unda quyidagi ifodaga ega bo'lamiz:

$$f - f_o = \Delta f = [f - f_o]_{t=0} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (6.20)$$

Bu ifodadan ko'rinish turibdiki,  $\tau$  – shunday vaqtka, bu vaqt ichida  $\Delta f = f - f_o$  marta kamayadi ya'ni tashqi ta'sir natijasidagi taqsimot funksiyasini o'zgarishi kamayib muvozanat qiymati tomon intiladi. Bundan, ko'rinaladi,  $\tau$ -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 sochilishi mexanizmi bilan aniqlanadi. Albatta bu kattalik zaryad tashuvchilar energiyasiga bog'liq bo'ladi.

## 6.4 Elektronlarning kristall panjara nuqsonlarida sochilishi

Kristall panjara nuqsonlari o'z tabiatiga ko'ra elektroneytral, zaryadlangan (musbat, manfiy, bir karra, ikki karra) oddiy nuqtaviy va murakkab bo'lishi mumkin. Shuning uchun ham ularda elektronlarni sochilish mexanizmi va bu jarayonning haroratiga bog'liqligi ham o'z alohida o'rganishni talab etadi va elektronlarning harakatchanligi alovida alovida o'zgarishni talab etadi.

### 6.4.1 Elektronlarning zaryadlangan nuqsonlarda sochilishi

Ma'lumki, har qanday zaryadlangan nuqson o'z atrofida elektr potensial (maydon) hosil qiladi:

$$U(r) = e^2 / \kappa \cdot r \quad (6.21)$$

$\varkappa$  – 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 yonidan 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 –  $2\pi r dr$  – sochilishning diffirensial yuzasi deb ataladi.

$$\sigma(\theta) d\Omega \, d\Omega = 2\pi \sin\theta d\theta \quad (6.22)$$

(6.22) – ifodani hisobga olsak, quyidagiga ega bo‘lamiz:

$$\sigma(\theta) = \frac{r}{\sin\theta} \left( \frac{dr}{d\theta} \right) \quad (6.23)$$

$dr$  ning qiymatini (1) – ifodadan topsak, quyidagi hosil bo‘ladi:

$$dr = -\frac{e^2}{2\kappa mv^2} \frac{1}{\sin^2\frac{\theta}{2}} d\theta \quad (6.24)$$

Demak,

$$\sigma(\theta) = \left( \frac{e^2}{2\kappa mv^2} \right)^2 \frac{1}{\sin^4\frac{\theta}{2}} \quad (6.23)$$

bundan elektronlarning sochilish ehtimoli  $w$  va shunga mos relaksatsiya vaqtini aniqlash mumkin bo‘ladi:

$$w(\theta) = \frac{1}{\sigma(\theta)} \quad \tau = \frac{1}{\int w(\theta) d\Omega} \quad (6.24)$$

Qiyin bo‘limgan matematik almashadirishlar asosida zaryadlangan nuqsonlardagi sochilishning relaksatsiya vaqtini energiyaga bog‘liqlik ifodasini quyidagicha yozish mumkin:

$$\tau = \frac{\kappa^2 \sqrt{2m\bar{x}} (kT)^{3/2} \epsilon^{3/2}}{\pi e^4 A} \quad (6.25)$$

(6.25) – ifodaga asosan shuni ta’kidlash mumkinki, relaksatsiya vaqtin bunday hollarda harorat oshishi bilan  $T^{3/2}$  qonuniyat bilan oshar ekan. Buning fizik ma’nosi shundan iboratki, harorat oshishi bilan zaryad tashuvchilarning kinetik energiyasi oshadi. Bu esa, zaryadlangan nuqson potensialining kamroq ta’sir etishiga olib keladi. Bu nuqsonlarning zaryadlanganlik darajasi oshib borishi bilan, albatta yuqorida keltirilgandek, ularning differinsial sochilish yuzasi ortib

boradi. Ma'lumki, zaryadlarning harakatchanligi ularning relaksatsiya vaqtiga bog'liq:

$$\mu = \frac{e}{m_n^x} \tau \quad (6.26)$$

Bundan kelib chiqadiki, sochilish zaryadlangan nuqsonlarda yuzberganda harakatchanlikning haroratga bog'liqligi (6.26) -ifodaga mos holda bo'lib quyidagiga teng bo'ladi:

$$\mu = \mu_0 T^{3/2} \quad (6.27)$$

Harorat ortgan sari harakatchanlik ham  $T^{3/2}$  qonuniyat bilan o'zgarar ekan.

#### 6.4.2. Elektroneytral nuqsonlarda sochilish

Kristall panjarada juda ko'p nuqsonlar elektroneytral holatda bo'ladi. Ammo ularning massasi, atom radiusi va tashqi elektron qobiqlari yarim o'tkazgich asosiy atomlar parametrlaridan farq qilganligi uchun ular ham elektronlar, (kovaklar) ga sochilish manbai bo'ladi. Bu holatda relaksatsiya vaqtি faqat elektroneytral nuqsonlar konsentratsiyasiga ( $N_0$ ) teskari proporsional holatda o'zgaradi, ammo harakatga bog'liq bo'lmaydi.

$$\tau = \frac{m^{*2} e^2}{20 \pi h^3 N_0} \quad (6.28)$$

Shuniham eslab o'tish lozimki, barcha kirishma atomlari donor yoki akseptor bo'lsa ham o'ta past haroratda elektroneytral holatda bo'ladi va ular toki ionlashguncha neytral nuqson sifatida sochilish manbai ionlashgandan so'ng esa zaryadlangan nuqsonlar sifatida sochilish manbai bo'ladi. (6.28) ifodaga mos zaryad tashuvchilar harakatchanligi ham haroratga bog'liq bo'lmaydi.

#### 6.4.3. Zaryad tashuvchilarning kristall panjara tebranishlarida sochilishi

Kristall panjarani tashkil etgan atomlar  $T=0$  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'zarbo'lgangan bo'lganligi sababli har bir atom tebranishi albatta qo'shni atomlarning ham siljishiga ya'ni, tebranishiga olib keladi, natijada

kristall panjarada elastik tebranishlar tebranishlar hosil bo'ldi. Bunday tebranishlar chastotasi haroratga kristall panjara yo'naliishlariga bog'liq bo'lgani uchun har xil chastotali tebranishlar vujudga keladi. Tebranish chastotalari tovush to'lqinlarigamos bo'lganligi uchun ularni akustik tebranishlar deb ataladi. Akustik tebranishlar asosan elementar yarim o'tkazgichlar (kremniy va germaniy) da mavjud bo'ldi. A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>, A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup> va boshqa birikmali yarim o'tkazgich materiallarda panjaradagi qo'shni atomlar bir-biridan nafaqt massasi o'chovlari bilan balki, ion holatlari bilan ham tubdan farq qilganligi uchun qo'sh atomlarning o'zaro qarama - qarshi yo'naliish bo'yicha siljish natijasida optik chastotatalarga mos vujudga kelgan tebranishlar optik tebranishlar deb ataladi. Kristall panjara tebranishlari energiyasini ifodalovchi kvazielementar zarra *hw* energiyaga ega bo'lgan fonon tushunchasi qabul qilingan. Demak kristall panjarada har xil chastotatli 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 aniqlangandi:

$$\tau_L = \frac{\pi h^4 c_L \epsilon^{*-1/2}}{\sqrt{2} E_1^2 (m^* kT)^{3/2}} \quad (6.29)$$

$E_1 = V_0 \frac{dE_0}{dV_0}$  C – kristall panjara ning ko'ndalang to'lqinlardagi plastik doimiysi,  $E_g$  – taqiqlangan sohaning panjara hajmi o'zgarishiga mos o'zgarishi ifodasi quyidagicha yoziladi:

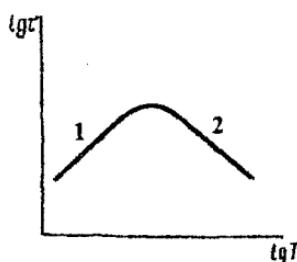
$$\tau = \tau_o(t) \cdot \epsilon^{3/2} \quad (6.30)$$

Demak harorat oshishi bilan relaksatsiya vaqtি  $T^{3/2}$  qonuniyat bilan o'zgarar ekan ya'ni, kamayadi. Endi Debay haroratidan yuqori bo'lgan haroratlardagi optik tebranishlar ta'sirida relaksatsiya vaqtি quyidagiga teng bo'ldi:

$$\tau_{on} = \tau_o \epsilon^{1/2} \quad (6.31)$$

Yuqorida relaksatsiya vaqtining haroratga bog'liqlik har xil nuqsonlarda sochilishiga yuz bergen hollarini alohida ko'rib chiqdik. Ammo, real holatda bir vaqtning o'zida yuqoridagi sochilishlarni hammasi ham mavjud bo'ldi. Shuning uchun ham ko'rileyotgan aniq sharoitda qaysi sochilish mehanizmining tutgan o'rni va kossasiga qarab

relaksatsiya vaqt va harakatchanlikni aniqlanishi kerak. 6.1 Rasmda kremniy kristallida relaksatsiya vaqt hamda elektronlar harakatchanligi qiymatini harorat o'zgarishiga bog'liqligi keltirilgan:



**6.1 – rasm.** Tok tashuvchilarning kirishma ion (1) lar va akustik fonon (2) lar ta'sirida bir vaqtning o'zida sochilishining relaksatsiya vaqtini harorat o'zgarishiga bog'liqligi.

Bu natijalar asosidat- va  $\mu$ - ni harorat  $T \leq 100K$  gacha ionlashgan nuqsonlarda sochilish mexanizmini aniqlaydi.  $T \geq 200K$  da esa 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  $T=100K$  dan yuqoriroq haroratlarda ham yuz berishi mumkin.

## 7 - BOB Metall – yarim o'tkazgich kontakti va p-n o'tish fizikasi

Har qanday yarim o'tkazgich materiallarning fizik xossalarini o'rganish va yarim o'tkazgichli qurilmalarning xossalarini aniqlash hamda ularni zamonaviy qurilmalarda ishlatalish uchun, ularni manbalarga yoki boshqa qurilmalarga ulash, albatta metall kontaktlar yordamida amalga oshiriladi. Shuning uchun metal-yarim o'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'rinni egallaydi. Bu muammoni batafsil ko'rib chiqishdan oldin, metall yarim o'tkazgich kontaktlar tabiatini aniqlaydigan ba'zi fundamentall tushunchalar ustida to'xtalib o'tamiz.

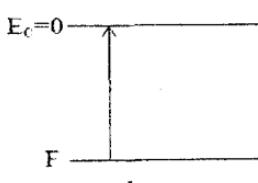
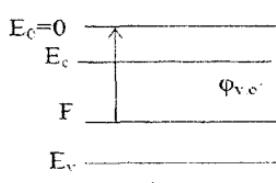
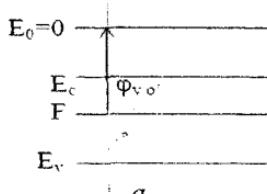
### 7.1 Qattiq jismlarda chiqish ishi

Chiqish ishi bu-Fermi sathidan elektronlarni vakuumga chiqarish uchun lozim bo'lgan energiyaga aytildi. Chiqish ishining qiymati qattiq jismlarda  $A \sim 1 \div 10 \text{ eV}$  oraliq'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 potensiallari farqidan ( $\varphi = A_1 - A_2$ ), bunda kontaktdagi biror metallni chiqish ishi oldindan ma'lum bo'lsa, ikkinchi metallning chiqish ishini topish mumkin. Ko'proq qo'llaniladigan bu-fotoelektrik metodi bo'lib, unda asosan Eyshteyn formulasi  $h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$  yordamida chiqish ishini juda katta aniqlik bilan topish mumkin, bunda  $h\nu$ -metall sirtiga (katodga) tushayotgan foton energiyasi. Metallarda chiqish ishini boshqarish (kamaytirish) faol ishlaydigan emitterlar yaratishda juda muhim ahamiyatga ega. Metall sirtlarga qo'shimcha ishlov berish yoki vakumda boshqa atomlarni purkash usullari bilan chiqish ishini o'zgartirish mumkin.

Ma'lumki, yarim o'tkazgich materiallarida Fermi sathining qiymati harorat, yorug'lik va ayniqsa, kirishma atomlar tabiatini va konsentratsiyasiga bog'liq bo'lganligi uchun, ularda chiqish ishining qiymati o'zgarib turadi. Agar biz donor kirishma atomlari

konsentratsiyasini oshirish yo‘li bilan, Fermi sathini o‘tkazuvchanlik sohasigacha , hatto uning ichigacha olib kirishimiz mumkin bo‘lsa, aksincha akseptor kirishma atomlar konsentratsiyasini boshqarish yo‘li bilan Fermi sathini valent soha ichkarisida joylashtirishimiz mumkin.

Demak yarim o‘tkazgichlarda Fermi sathi butun taqilangan soha kengligi bo‘yicha o‘zgartirish mumkin bo‘lganligi uchun, chiqish ishining qiymati shunga mos o‘zgaradi.



**7.1 – rasm. a) n – turli yarim o‘tkazgichda chiqish ishi, b) p – turli yarim o‘tkazgichda chiqish ishi, d) metallning chiqish ishi.**

## 7.2 Metall – yarim o‘tkazgich kontakti

Metall-yarim o‘tkazgich kontaktlar o‘z tabiatini, yaratilishi, ishlatalishi va xossalariiga qarab ikki turga-omik kontaktlar va Shottki diodlariga bo‘linadi. Har qanday qattiq jismidan vakuumga termoelektron emissiya orqali chiqadigan elektron tok zichligi, shu qattiq jismidan elektronlarni chiqish ishi bilan aniqlanadi. Agar u yarim o‘tkazgich bo‘lsa, unda

$$J_{y,o} = \frac{4\pi(kT)^2}{h^3} \cdot e^{-A_{y,o}/(kT)} \quad (7.1)$$

formula orqali, agar u metall bo‘lsa, unda termoelektron emissiya tok zichligi, albatta metall chiqish ishi  $A_m$  ga bog‘liq holda

$$J_m = \frac{4\pi(kT)^2}{h^3} \cdot e^{-A_m/(kT)} \text{ aniqlanadi} \quad (7.2)$$

Yarim o‘tkazgich va metallni to‘g‘ridan-to‘g‘ri o‘zaro kontaktga keltirsak, (7.1) va (7.2) formulalarga asosan elektronlar oqimi albatta  $A_{y,o}$  va  $A_m$  lar qiymati bilan aniqlanadi. Birinchi holda  $A_{y,o} < A_m$  holatni ko‘raylik (yarim o‘tkazgich n-turli bo‘lsin). Bu holda elektronlar yarim o‘tkazgich kontakt sohasidan metall kontakt sohasiga o‘ta boshlaydi. Bu o‘tish natijasida yarim o‘tkazgich kontakt sohasi elektronlarni yo‘qotgan donor ionlari hisobiga musbat zaryadlanadi. Metallning kontakt sohasi esa mos holda manfiy zaryadlanadi, ya’ni bunda kontaktda yarim o‘tkazgichdan metallga yo‘nalgan elektr maydoni hosil bo‘ladi. Elektronlarning yarim o‘tkazgichdan metallga o‘tishida, kontaktda hosil

bo‘lgan elektr maydoni qiymati, elektronlarning o‘tishiga etarli darajada to‘sinqilik qiladi. Bu holda yarim o‘tkazgichdan metallga o‘tadigan elektronlarning tok zichligi:

$$J_{y.o} = \frac{4\pi(kT)^2}{h^3} \cdot e^{-(A_{y.o} + \varphi)/kT} \quad (7.3)$$

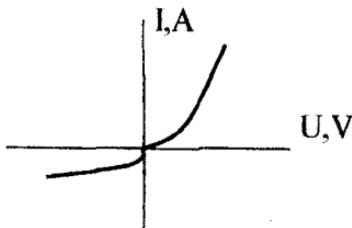
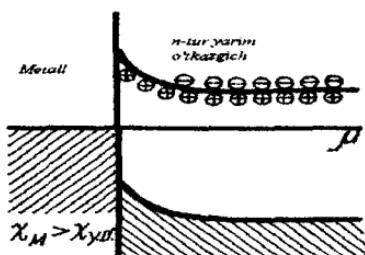
Bilan aniqlanadi, bunda  $\varphi$ -metal-yarim o‘tkazgich kontakt sohasida hosil bo‘lgan potensialning qiymati  $\varphi = A_m - A_{y.o}$ , ga teng bo‘lib metalldan yarimo‘tkazgichga o‘tadigan termo elektron emissiyaning tok zichligi o‘zgarmaydi. Yarim o‘tkazgichning kontakt sohasida elektronlarni yo‘qotgan musbat donor ionlar hisobiga ma’lum qalinlikka ega bo‘lgan hajmiy zaryad sohasi ( $L_{y.o}$ ) hosil bo‘ladi xuddi shunday, yarimo‘tkazgichga o‘tgani qo’shimcha elektronlar hisobiga, metal kontakt sohasida ham manfiy zaryadga ega bo‘lgan hajmiy zaryad qalinligi ( $L_m$ ) hosil bo‘ladi. Bu hajmiy zaryad qalinligi metal va yarim o‘tkazgichdagi elektronlar konsentratsiyasi bilan aniqlanadi.

$$L_{y.o} = \frac{A_m - A_{y.o}}{4\pi e^2 \epsilon n_{y.o}}, L_m = \frac{A_m - A_{y.o}}{4\pi e^2 \epsilon n_m} \quad (7.4)$$

(4)-formulaga asosan,  $A_m - A_{y.o} \sim 1eV$ ,  $n_{y.o} \sim 10^{16} sm^{-3}$ ,  $n_m \sim 10^{22} sm^{-3}$  qiymatlarini olsak, unda  $L_{y.o}$  ning qiymati  $L_m$  dan  $10^5$  marta ko‘p bo‘ladi ( $L_{y.o} \sim 30 mkm$ ,  $L_{y.o} \sim 10 A^0$ ), demak, hosil bo‘lgan hajmiy zaryad qalinligi asosan yarimo‘tkazgich tomonida bo‘lar ekan. Yarimo‘tkazgich kontakt sohasida hosil bo‘lgan hajmiy zaryad bu sohadagi elektronlar taqsimotiga ham ta’sir qiladi ya’ni kontaktdan yarimo‘tkazgich ichiga kirgan sari elektronlar konsentratsiyasi oshadi va  $n_o$  ga ya’ni yarimo‘tkazgich hajmidagi elektronlar konsentratsiyasiga tenglashadi:

$$n(x) = n_o e^{-\varphi(x)/kT} \quad (7.5)$$

Bu holatdagi metall – yarimo‘tkazgich kontakt soha diagrammasi hamda VAT si 7.2 rasmida ko‘rsatilgan:

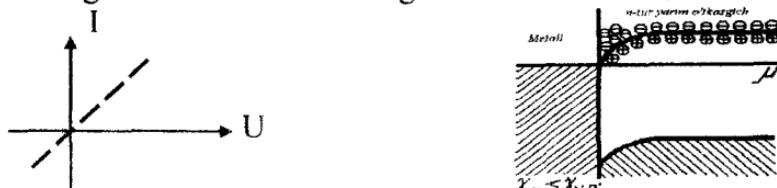


**7.2 – rasm.** Metall va n – turdagi yarim o‘tkazgich kontakt sohalari diagrammasi hamda VAT  $\chi_m > \chi_{y.o}$  holat uchun.

Agar  $n$ -turdagi yarim o'tkazgichda elektronlarni chiqish ishi  $A_{y.o'}$ , metalldagи chiqish ishidан katta bo'lsa, u holda yuqoridagi (7.4) va (7.5) - tenglamalarga asosan elektronlarning metallga termoemissiya bo'yicha oqimi, yarim o'tkazgichdagi termoemissiyadagi elektronlar oqimidan ko'p bo'ladi. Natijada yarim o'tkazgichning metall bilan kontakt sohasi metalldan o'tgan elektronlar bilan boyitiladi ya'ni, o'tishdagi elektronlar konsentratsiyasi, yarim o'tkazgich hajmidagi elektronlar konsentratsiyasidan ko'p bo'ladi va manfiy zaryadga ega bo'lgan soha yuzaga keladi. Shu bilan birga metallning kontaktning shunga mos elektronlarni yo'qotgan ionlar hisobiga musbat zaryadlangan hajmiy zaryad sohasi yuzaga keladi. Metalldagi hajmiy zaryad sohaning qalinligi, yarim o'tkazgichda hosil bo'lgan manfiy zaryad hajmiy zaryad sohasining qalinligidan juda kam bo'ladi. Bu holda yarim o'tkazgich kontakt sohasidagi elektronlar taqsimoti esa

$$n = n_o \cdot e^{\frac{A_m - A_{y.o'}}{kT}} = n_o \cdot e^{\frac{\varphi(x)}{kT}} \quad (7.6)$$

bilan aniqlanadi. Bu holdagi metall – yarim o'tkazgich kontakt sohalar diagrammasi rasmda keltirilgan.

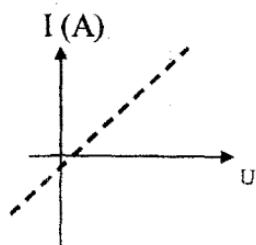
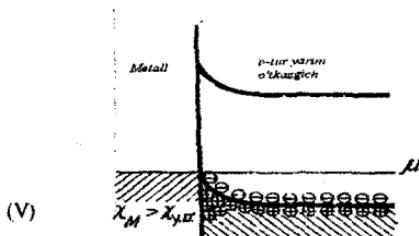


**7.3- rasm.** Metall va n- turli yarim o'tkazgich kontakt sohalar diagrammasi hamda VAT fi.  $\chi_m < \chi_{y.o'}$  holat uchun.

Endi p-turli kremniy bilan metall kontakt haqidagi ham biroq to'xtalib o'taylik. Dastlabki holatda  $A_{y.o'} < A_m$  bo'linsin. Bu holda yuqorida keltirilgandek, metalldan yarim o'tkazgichga o'tayotga elektronlar oqimi, yarim o'tkazgichdan metallga o'tayotgan elektronlar oqimidan ko'p bo'ladi va natijada metalldan o'tgan elektronlar, yarim o'tkazgich kontakt sohasidagi kovaklar bilan rekombinatsiyaga kirishib kovaklar konsentratsiyasini kamaytiradi. Bu jarayon to'g'ridan to'g'ri kontakt sohasida juda faol va yarim o'tkazgich ichiga kirgan sari sekinlashadi. Natijada yarim o'tkazgich kontakt sohasida kovaklarini yo'qotgan akseptor manfiy zaryadga ega bo'lgan va Bor atomlari hisobiga manfiy zaryadlangan hajmiy zaryad sohasi hosil bo'ladi. Bu sohaning qalinligi

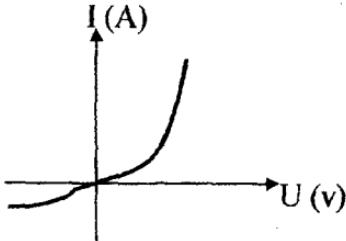
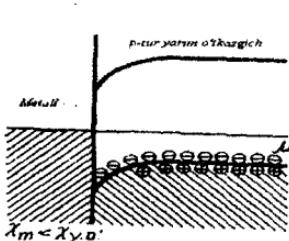
(7.7) ifodaga asosan p-turdagi kovaklar konsentratsiyasi bilan aniqlanadi, ammo u metall kontakt sohasida hosil bo'lgan musbat zaryadli hajmiy zaryad qalinligidan juda katta bo'ladi. Yarim o'tkazgich kontakt sohasidagi kovaklar taqsimoti quyidagicha aniqlanadi:

$$p = p_o e^{\frac{-A_{y,o} - A_m}{kT}} = p_o e^{\frac{-\varphi(x)}{kT}} \quad (7.7)$$



**7.4 – rasm.** Metall va p-turli yarim o'tkazgich kontakt sohalar diagrammasi hamda VAT si.  $\chi_m > \chi_{y,o}$  holat uchun.

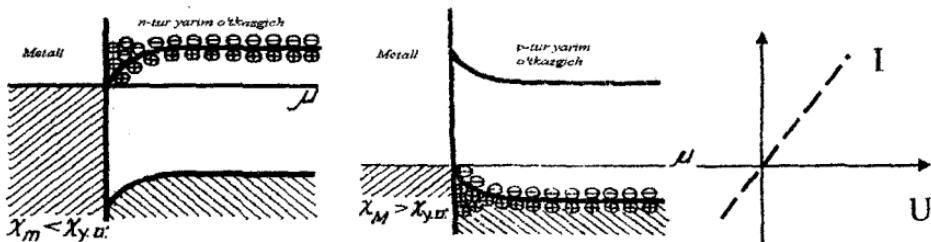
Navbatdagi holatda p-turli yarim o'tkazgich materialida elektronning chiqish ishi  $A_{y,o}$  katta bo'lsin, metallning chiqish ishi  $A_m$  dan,  $A_{y,o} > A_m$ . bu holatda elektronlarni yarim o'tkazgichdan metallga o'tish oqimi, teskari yo'nalishdagi elektronlar oqimidan ko'p bo'ladi. P-turdagi yarim o'tkazgichdan elektronlarning metallga o'tishi natijasida (albatta elektronlar valent sohaga o'tadi), yarim o'tkazgich kontakt sohasida kovaklar konsentratsiyasi ortadi, ya'ni bu soha kovaklar bilan boyitilgan bo'lib qoladi. Bunday kontaktlar sohalar diagrammasi quyidagi rasmda keltirilgan:



**7.5 – rasm.** Metall va p-turli yarim o'tkazgich kontakt sohalar diagrammasi hamda VAT si.  $\chi_m < \chi_{y,o}$  holat uchun.

### 7.3 Omik kontakt

Omk kontakt deganda metall – yarim o'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 aytildi. Bunday kontakt hosil qilishning asosiy sharti metall - yarim o'tkazgich kontakt qarshiligini, asosan yarim o'tkazgich kontakt sohasining qarshiligi uning hajmiy solishtirma qarshiligidan o'ta kichik bo'lgandagina bajariladi. Bu o'z navbatida yarim o'tkazgich kontakt sohasining tok tashuvchilar (elektron yoki kovaklar) bilan boyitilgan holatida yuz beradi. Yuqorida ko'rsatilganidek, bu faqat  $n$ -turli yarim o'tkazgich uchun  $A_{y,o} > A_m$ , p-turli yarim o'tkazgich uchun  $A_{y,o} < A_m$  bo'lgandagina bajariladi. Demak, yarim o'tkazgichlarda metall omik kontakt sohalar tuzilishi 7.6-rasmda tasvirlanganidek bo'ladi. Bunday kontaktlarning Volt-Amper tavsifi quyidagicha bo'ladi:



7.6 – rasm. Omik kontakt sohalar diagrammasi va VATfi.

Quyidagi jadvalda yarim o'tkazgich materiallarida omik kontakt hosil qilish uchun ishlataladigan asosiy materiallar keltirilgan:

**7.1 – jadval. Yarim o'tkazgich materiallarida omik kontakt hosil qilish uchun ishlataladigan materiallar.**

Qotishma tarkibi	Qo'llash sohasi
Sn + $(\text{CH}_3\text{CHOHCOOH})$	Ge
Au + Si + Al = 90% : 7%:3%	Si p – tur

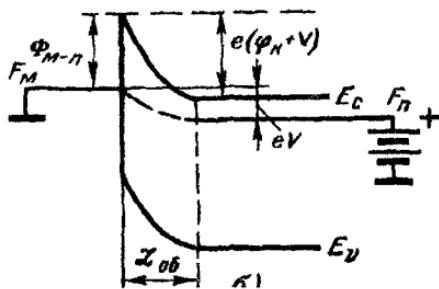
Au + Si + Sb=90% : 7%:3%	Si n – tur
In	GaAs ( $n = 10^{18} \div 10^{19} \text{ sm}^{-3}$ )
In	GaSb
In	ISb
In + Te = 97% : 3%	Legirlangan GaAs va GaP n-tur ( $n = 10^{16} \div 10^{18} \text{ sm}^{-3}$ )
In + Zn = 95% : 5%	Legirlangan GaAs va GaP p – tur
Sn + (SnCl <sub>2</sub> )	GaAs n – tur ( $n = 10^{14} \div 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ )
WNi (hajmiy nisbatda 2:1)	SiC n va p-turlar ( $\rho = 10^{-3} \div 10^2 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ )
Ta+Au+Al=45%: 40%:5%	SiC p – tur ( $\rho \geq 10 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ )
Ta + Au = 50% : 50%	SiC n – tur ( $\rho \geq 10 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ )

#### 7.4. Shottki diodi

n-turli yarim o'tkazgichda elektronlarli chiqish ishi, metallardagi elektronlarni chiqish ishidan kichik bo'lganda  $A_{y.o} < A_m$  yoki p-turli yarim o'tkazgich chiqish ishi qiymati metallnikidan katta bo'lganda  $A_{y.o} > A_m$ , yarim o'tkazgich kontakt sohasida ma'lum qalinlikka ( $10 \div 50 \text{ mkm}$ ) ega bo'lgan hajmiy zaryad sohasi hosil paydo bo'ladi. Bu hajmiy zaryad sohalarida erkin zaryad tashuvchilar konsentratsiysi (elektron yoki kovak) yarim o'tkazgichning hajmidagi zaryad tashuvchilar konsentratsiyasidan o'ta kam bo'ladi va ularning taqsimoti quyidagicha ifodalanadi :

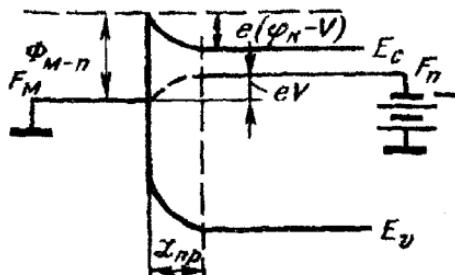
$$n = n_o e^{\frac{-\varphi(x)}{kT}}, p = p_o e^{\frac{-\varphi(x)}{kT}} \quad (7.8)$$

Kontaktda tok tashuvchilarni harakatiga hosil bo'lgan kontakt potensiali  $\varphi$  to'sqinlik qiladi. Bunday kontaktga tashqi manba ulanganda, metall va yarim o'tkazgichga manbaning qanday qutblari (+yoki-) ulanishiga qarab, kontakt potensialini yetarli darajada o'zgartirish mumkin. Demak kontakt orqali o'tayotgan tok qiymat tashqi manba yo'nalishiga o'ta bog'liq bo'lar ekan. Yuqorida ko'rsatilgan kontaktga tashqi manba ulaylik. Bunda manbaning <<+>> qutbiga n – turli yarim o'tkazgich, <<->> qutbiga esa metall ulanadi.



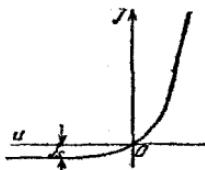
**7.7 – rasm.** Metall – yarim o’tkazgich kontakti tashqi manbaga teskari ulangandagi holati.

Kontakt potensialining qiymati  $\varphi$ , tashqi qo‘yilgan maydon yo‘nalishiga mos holda ortadi. Bunga sabab kontaktda hosil bo‘lgan va tashqi elektr maydoni manba yo‘nalishlari bir xil bo‘lishi bilan birga, yarim o’tkazgichga ulangan manbaning <<+>> qutbi uning ichkarisidan elektronlarni tortadi, natijada, hajmiy zaryad kengligi ortadi. Bunday kontaktdan elektronlarning yarim o’tkazgichga o’tish ehtimoli tashqi maydon qiymati oshgan sari kamayib boradi va shunga mos holda tok ham qiymati kam bo‘ladi. Manbaning bunday ulanishi teskari yo‘nalish ulanishi deb qabul qilingan. Teskari ulanish holatida metal-yarim o’tkazgich kontaktidan o’tayotgan tok qiymati juda kichik va tashqi manba kuchlanishiga juda kam bog‘liq bo‘lar ekan. Agar yarim o’tkazgichga manbaning manfiy, metallga manbaning musbat qutblarini ulaydiganda, tashqi manba elektr maydon yo‘nalishi bilan metall – yarim o’tkazgich kontaktidagi elektr maydon yo‘nalishlari bir-biriga qarama-qarshi holatda bo‘ladi.



**7.8 – rasm.** Metall – yarim o’tkazgich kontakti tashqi manbaga to‘g‘ri ulangan holati.

Yarim o'tkazgichga tashqi manbadan elektr oqimi kirib kelishi bilan, yarim o'tkazgich kontakt sohasidagi hajmiy zaryad miqdori va qalinligi kamayishi natijasida, kontakt potensiallar farqi  $\varphi = A_{y,o} - A_m$  kamayadi. Bu, elektronlarning yarim o'tkazgichdan metallga o'tish oqimini oshiradi. Tashqi maydon ortgan sari kontakt potensiali shuncha kamayadi. Agar bunday metall - yarim o'tkazgich kontaktining Volt-Amper tavsifisiga diqqat bilan e'tibor bersak, bunday qurilmadan tok bir yo'nalish bo'yicha juda kichik va tashqi elektr maydon qiymatiga bog'liq bo'lmaydi. Ikkinchi yo'nalish bo'yicha tokning qiymatini tashqi elektr maydon oshishi bilan eksponensial ortadigan qiymatiga ega bo'ladi:



*7.9 – rasm. Metall – yarim o'tkazgich kontaktining Volt – Amper tavsifi.*

Bunday qurilmalar elektronikada to'g'rilagich sifatida ishlatiladi va qurilmani Shottki diodi deb ataladi. Shottki diodi odatdag'i p-n diodi kabi to'g'rilagich vazifasini bajaradi, ammo undan asosiy farqi - Shottki diodida tok tashishda faqat elektronlar qatnashadi. (p-n o'tish diodlarida elektron va kovak qatnashadi). Elektronlarning harakatchanligi kovaklar harakatchanligidan odatda 5-6 marta bo'lganligi uchun Shottki diodlari p-n diodlaridan yuqori chastotalarda ishlatish imkoniyatini beradi. Kremniyli Shottki diodlarini olish texnologiyasi bu - juda yaxshi tozalangan  $SiO_2$  qatlamlaridan holi bo'lgan Si sirtiga yuqori vakuumda metallarni purkash yo'li bilan olinadi. So'nggi yillarda juda yaxshi Shottki diodlari Si sirtida har xil metall silisidlarini hosil qilish bilan olingan xomashyolar pastdagi jadvalda Shottki diodlarini olish uchun ishlatiladigan metallar va silisidlar haqida ma'lumotlar keltirildi:

*7.3 – jadval. Shottki diodlarini olish uchun ishlatiladigan metalsilisidlar.*

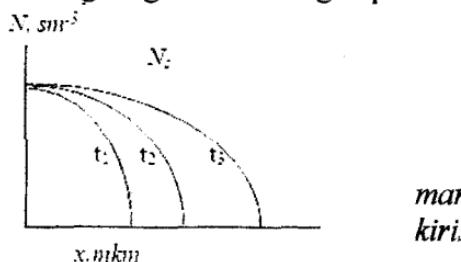
## 7.5. p-n - o'tish olish texnologiyasi

n va p turiga yarim o'tkazgichlarni to'g'ridan to'g'ri bir biriga kontaktga keltirish yo'li bilan p-n o'tishni hosil qilib bo'lmaydi. Chunki, har qanday yaxshi ishlangan 2 turdag'i yarim o'tkazgichlarning sirtlarini kontaktga keltirilganda ular orasida ma'lum bo'shliq qolishi, sirtlarda adsorbsiya qilingan begona atomlar va nuqsonlar hamda *oksid* qatlamlarni mavjudligi bir biri bilan birikishiga imkon bermaydi p-n o'tishni hosil qilishning turli usullari mavjud ulardan biri yuqori vakuumda ma'lum metallni kremniyga kontaktga keltirib, samarali haroratigacha qizdirish yo'li bilan, masalan, *Al-nSi* ni  $T=550^{\circ}\text{C}$  qizdirganda kontakt sohasida yangi *Al* bilan boyitilgan p-turga ega bo'lgan soha hosil bo'ladi. Yarim o'tkazgich sirtiga unga qarama-qarshi o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan yupqa epitaksial qatlamlarini hosil qilish yo'li bilan yoki yarim o'tkazgich sirtiga undagi kirishma atomlar tabiatiga teskari bo'lgan kirishma atom ionlarini implantatsiya qilish yo'li bilan xam bilan amalga oshrish mumkin. Ammo hozirgi zamon elektronika va mikroelektronikasida eng asosiy qo'llaniladigan usul bu planar texnologiya ya'ni difuzion texnologiyasidir. Diffuzion texnologiyada – p-n o'tishni hosil qilinadigan materialning asosiy parametrlari-qanday turdag'i kirishma atomlari bilan legirlanganigi,

Metall silit-sidi	Hosil bo'lish temperaturasi T(K)	Erish temperaturasi T(K)	Metall silit-sidi	Hosil bo'lish temperaturasi T(K)	Erish temperaturasi T(K)
CoSi	400	1460	Mn <sub>11</sub> Si <sub>19</sub>	800a	1145
CoSi <sub>2</sub>	450	1326	MoSi <sub>2</sub>	1000a	1980
CrSi <sub>2</sub>	450	1475	TaSi <sub>2</sub>	750a	2200
HfSi	550	2200	TiSi <sub>2</sub>	650	1540
IrSi	300	-	ZrSi <sub>2</sub>	600	1520

ularning konsentratsiyasi va qanday chuqurlikda p-n o'tish hosil qilish kerakligini oldindan bilgan holda, unga qanday kirishma atomlari qancha haroratda va qancha vaqtida diffuziya qilish hisoblab chiqiladi. Bunda diffuziya qilinayotgan kirishma atomlarining diffuziya koeffsiyentini va eruvchanligini haroratiga bog'liqligining qiymatlarini

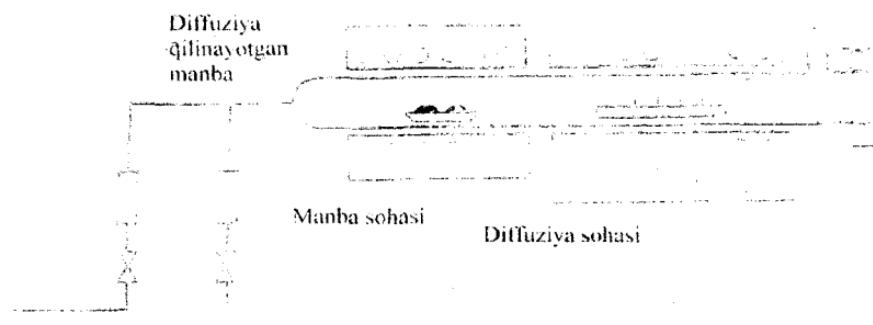
aniq bilishni talab etadi. O'rganilayotgan material p-turga ega va undagi akseptor kirishma atomlari konsentratsiyasi  $N_A = 10^{16} \text{ sm}^{-3}$  bo'lsa, unda diffuziya qilinadigan kirishma atomlari albatta donorlik xususiyatiga ega bo'lishi va shunday haroratda diffuziyaki qilinishi lozimki, unda yarim o'tkazgich sirtida diffuziya vaqtida kirgan donor kirishma atomlari konsentratsiyasi materialdag'i mavjud akseptor kirishma atomlar konsentratsiyasidan  $10^2 \div 10^3$  marta katta bo'lishi kerak. Yuqoridaqı mavzularda ta'kidlaganımızdeк, diffuziya doimo manbadan amalga oshirilganligi uchun uning taqsimoti rasmida ko'rsatilgandek bo'ladi:



**7.10 – rasm.** Diffuziya o'zgarmas manbadan amalga oshirilgandagi kirishma atomlari taqsimoti.

Bu ko'rsatilgan uch sohani ko'rib chiqaylik. I-sohada diffuziya natijasida kiritilgan donor kirishma atomlarning konsentratsiyasi mavjud akseptor kirishma atomlarni konsentratsiyasidan katta, albatta rasmida ko'rsatilganday bu nisbat kristall sirtidan uning ichiga kirgan sari o'zgarib boradi. Demak, bu sohada  $N_D > N_A$  yoki  $n > p$  sharti bajarilganligi uchun material 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'rيلayotgan haroratga mos xususiy zaryad tashuvchilar bo'ladi. Demak bu sohada material xususiy yarim o'tkazgichga - eng katta solishtirma qarshilikka ega bo'lgan materialga aylanadi. Mana shu  $N_D = N_A$  bo'lgan soha p-n o'tish sohasi yarim o'tkazgichga xos sirtidan mana shu sohagacha bo'lgan masofa p-n chuqurligi deb ataladi. III-sohada donor kirishma atomlari mavjud akseptor kirishma atomlarning konsentratsiyasidan kam bo'lganligi uchun  $N_A - N_D = p_o - N_D = p$ , material p-

turga ega bo‘ladi va p-n o‘tish chegarasidan uzoqlashgan sari p-kovaklar miqdori oshib p<sub>o</sub> ga yaqinlashadi. p-n o‘tishning diffuzion texnologiyasi boshqa usullarga nisbatan xohlagan chuqurlikda, o‘ta aniqlik bilan p-n o‘tish hosil qilish imkonini berdi. Shuning uchun ham buni planar texnologiya deb ataladi. p-n o‘tish hosil qilingan plastinkalarda yana qo‘sishimcha va boshqa operatsiyalarni bajarish orqali, xohlagan o‘lchovdagi oddiy yoki murakkab integral sxemalarni yaratish mumkin. Quydagi rasmida diffuziya amalga oshiriladigan pechlar va unda joylashgan yarim o‘tkazgich plastinkalari ko‘rsatilgan:

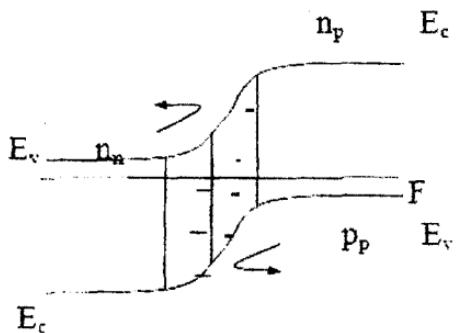


**7.11-rasm.** Diffuziya amalga oshiriladigan pechlar va unda joylashgan yarim o‘tkazgich kristalli.

## 7.6 p-n - o‘tish fizikasi

Quyidagi rasmida hali kontaktga keltirilmagan n va p yarim o‘tkazgich materiallari modeli va sohalar tuzilishi keltirilgan. Ko‘rinib turibdiki, har qaysi materiallarning xohlagan nuqtasida hamma vaqt elektron neytrallik sharti bajariladi, chunki n-turdagi yarim o‘tkazgichda erkin elektronlar soni, musbat zaryadlangan elektronlarni hosil qilgan donor atomlar konsentratsiyasiga, n-turdasida kovaklar konsentratsiyasi ular hosil qilgan manfiy zaryadlangan akseptor atomlar konsentratsiyasiga teng. p-turda Fermi sathi o‘tkazuvchanlik sohasiga yaqin, p-turda esa valent soha atrofida yotadi. Bu 2 xil turdagagi yarim o‘tkazgichlarni o‘zaro kontaktga keltiramiz p-n chegarasidagi elektron va kovaklarning taqsimotidagi gradiyent hisobiga n-turli yarim o‘tkazgichning kontakt sohasidagi elektronlar va kovaklar bilan

rekombinatsiyalashadi. Xuddi shunday p-turli yarim o'tkazgichdan n-turli yarim o'tkazgich kontakt sohasiga diffuziya qilinib, undagi yerdagi elektronlar bilan rekombinatsiyalashadi. Natijada n-turli yarim o'tkazgichning kontakt sohasida elektronlarni yo'qotgan musbat zaryadlangan donor ionlar, p-turli yarim o'tkazgichni kontakt sohasida kovaklarini yo'qotgan manfiy zaryadlangan akseptor ionlari hosil bo'ladi. boshlaydi, elektron va kovaklarning diffuziya asosida xosil bo'lgan bunday o'tishlar, kontaktda yuzaga kelgan potensial to'siqni tobora oshishiga va bu sohada Fermi sathlarini tenglashganida potensial to'siqlar o'zini maksimum qiymatiga erishadi. Bu holat, p-n o'tishda muvozanat holati bo'lib hisoblanadi. p-n o'tishda hosil bo'lgan elektr maydoni o'z yo'nalishi bo'yicha elektronlarning n - turdan p - turga va kovaklarni esa p - turdan n - turga o'tishiga to'sqinlik qiladi, ya'ni asosiy zaryad tashuvchilarining p-n o'tishda diffuziyaga qarshilik qiladi. Ammo bu hosil bo'lgan elektr maydoni p - turda asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar elektronlarni p - turga va n - turda asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar kovaklarni n - 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 6.11 rasmida keltirilgan:



**7.11 – 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.

$$J_{nn} + J_{pp} = J_{np} + J_{pn} \quad (7.9)$$

Demak, p-n o'tishda hamma vaqt asosiy zaryad tashuvchilar diffuziyasi natijasida yuzaga keladigan diffusion tok va unga qarama qarshi yo'nalgan p-n o'tishdagi elektr maydoni ta'sirida asosiy bo'limgan zaryad tashuvchilar harakati tufayli hosil bo'ladigan Dreyf toki vujudga keladi. p-n o'tishda hosil bo'ladigan potensial to'siq qiymati  $\varphi$  n va p turdag'i yarim o'tkazgichlardagi Fermi sathlarini qiymatlariga bog'liq va ularning farqiga teng bo'ladi:

$$\varphi = F_n - F_p \quad (7.10)$$

$F_n$  va  $F_p$  qiymatlarini yuqoridagi 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 tok tashuvchilar  $n_n$ ,  $p_p$  konsentratsiyasiga bog'liq nisbatini quyidagicha yozish mumkin:

$$\varphi = kT \ln \frac{n_n p_p}{(n_i)^2} = kT \ln \frac{N_d N_a}{(n_i)^2} \quad (7.11)$$

bunda  $n_i$  – berilgan haroratdagi xususiy zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi. (7.11) ifodadan ko'rinish 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 zaryadlar kengligi ham n va p-turli yarim o'tkazgich materiallardagi donor va akseptor kirishma atomlarining konsentratsiyasiga bog'liq ekan:

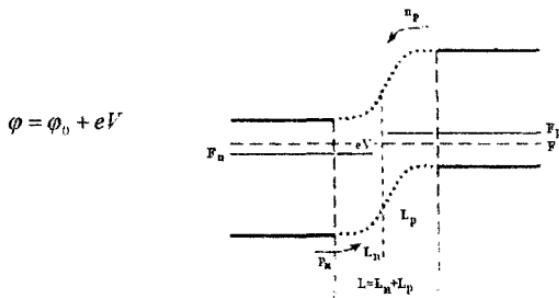
$$L_n = \left( \frac{\kappa \cdot \varphi}{4\pi e N_d} \right)^{1/2} L_p = \left( \frac{\kappa \cdot \varphi}{4\pi N_a} \right)^{1/2} \quad (7.12)$$

bunda  $\kappa$  – materialning dielektrik doimiysi. (7.12) ifodadan ko'rinish turibdiki, agar  $N_d > N_a$  bo'lsa, p – turdag'i yarim o'tkazgich materialda hosil bo'ladigan hajmiy zaryad kengligi, n – turdagidan ko'proq bo'lishi mumkin. Unda hajmiy zaryadlar teng nisbatlarini quyidagicha yozish mumkin:

$$\frac{L_n}{L_p} = \left( \frac{N_a}{N_d} \right)^{1/2} \quad (7.13)$$

## 7.7 p-n - o'tishga tashqi manba ulangandagi holat

p-n o'tishga ega bo'lgan yarim o'tkazgich materialining n – turli tomoniga manbaning  $<+>$ , p – turli tomoniga manbaning  $<->$  qutbi ulansin:

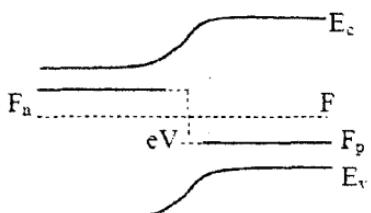


**7.12 – rasm.** Teskari maydonda p-n o‘tish

Bu holda tashqi maydon bilan p-n o‘tishdagagi 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 hajimi zaryad kengligi ortadi va kontakt potensial qiymati  $\varphi = \varphi_0 + eV$  ga teng bo‘ladi, ya’ni ortadi. Natijada p-n o‘tishdagagi asosiy zaryad tashuvchilar oqimi, ya’ni diffuzion tok miqdori kamayadi va eV tashqi maydon potensiali ortishi bilan asosiy zaryad tashuvchilarning p-n o‘tish diffuziyasi nolga intiladi. Ammo bu holatdagagi potensial to‘siqning oshishi asosiy bo‘lmagan zaryad tashuvchilar harakatiga ya’ni Dreyf toki qiymatiga ta’sir etmaydi. Endi p-n o‘tishdagagi tok qiymati bu faqat Dreyf toki qiymati bilan aniqlanadi va tashqi manba kuchlanishiga bog‘liq bo‘lmay qoladi. p-n o‘tishga tashqi manbarining 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 holatdagagi 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‘yligandagi o‘zgarishini aks ettiruvechi kvazi Fermi sathlari ( $F_p$ ,  $F_n$ ) hosil bo‘ladi. Ularning farqi  $F_n - F_p = eV$  tashqi qo‘yligan potensialga teng.  $J_{so}$  ning tashqi maydonga bog‘liqlik grafigi p-n o‘tishning teskari Volt–Amper xaracteristikasi deyiladi.  $J_{so}$ -tokining qiymati asosan asosiy bo‘lmagan zaryad tashuvchilar qiymati bilan aniqlangani uchun, uning miqdori o‘ta kichik bo‘lib, asosiy zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi ortishi bilan yanada kamayadi. Bunday tokning qiymatini harorat va yarim o‘tkazgich fundamental parametrlariga bog‘liqlik ifodasi quyidagiga teng bo‘ladi:

$$J_{so} = e(N_c \cdot N_V) \left( \frac{1}{N_a} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + \frac{1}{N_d} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \right) \cdot e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (7.14)$$

$D_n$ ,  $D_p$ ,  $\tau_n$ ,  $\tau_p$  – elektron va kovaklarning diffuziya koeffsiyenti va ularning yashash vaqt,  $N_a$  va  $N_d$  – donor va akseptor kirishma atomlari konsentratsiyasi,  $E_g$  – taqiqlangan soha kengligi. (7.14) ifodadan ko‘rinib turibdiki, harorat oshishi bilan  $J_{so}$  ning qiymati ortib boradi. 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 ulanganda kontaktdan elektronlar, p – turga esa kovaklar oqimi kira boshlaydi. Natijada n – turda injeksiya qilingan elektronlar konsentratsiyasini oshirish bilan birga, hajmiy zaryad qalinligini kamaytiradi. 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 bu sohadagi hajmiy zaryad qalinligi ham kamayadi. Demak, p-n o‘tishdagi potensial to‘siq miqdori ham qo‘yilgan tashqi maydon kuchlanishiga mos holda kamayadi:  $\phi = \phi_0 - eV$ . Bu esa asosiy zaryad tashuvchilar bo‘lgan n – turdagidan elektronlarni p – turga va p – turdagidagi kovaklami n – turga diffuziya oqimining oshishiga olib keladi ya’ni diffuziya toki 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 7.13 rasmida ko‘rsatilgan:  $\phi_0 = \phi_k - eV$



7.13 – rasm. To ‘g‘ri maydonda p-n o‘tish.

bunda  $F_n$  va  $F_p$  p-n o'tish to'g'ri ulangandagi kvazi Fermi sathlari. p-n o'tishning umumiy Volt-Amper tavsifsi quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$J = J_{so} \left( e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right) \quad (7.15)$$

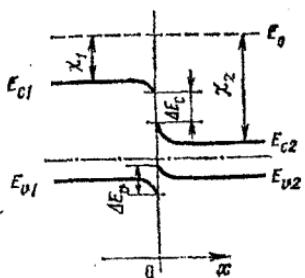
Bu ifodadan ko'rinish turibdiki, harorat oshishi bilan to'g'ri yo'nalishdagi tok miqdori kamayadi. Yuqori haroratda teskari tokning oshishi to'g'ri yo'nalishdagi tokning kamayishiga olib keladi oqibatida bu toklar qiymatining berilgan kuchlanishdagi farqlari asta – sekin kamayib, VAT endi Om qonuni aks ettiruvchi to'g'ri chiziq bilan ifodalanadi ya'ni p-n o'tishning to'g'rilaqich xossasi yo'qoladi. Demak, har qanday p-n o'tishga ega bo'lgan diodning to'g'rilaqich xossasi harorat oshishi bilan yomonlashar ekan. p-n o'tish ulangan manba yo'nalishiga qarab, tokini 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'rilaqich sifatida foydalanish imkonini beradi. Agar p-n o'tishga o'zgaruvchan manba ulasak, unda manbaning bir yo'nalishda tok o'tadi, ikkinchi yo'nalishda 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'rilaqich xossalari metall – yarim o'tkazgich diodlariga nisbatan yaxshiroqdir. Har qanday to'g'rilaqich diodlarining sifati uning to'g'rilaq koeffsiyentiga qarab baho beriladi. U qancha katta bo'lsa, diodning to'g'rilaqich xossasi shuncha yaxshiroqdir bo'ladi. To'g'rilaq koeffsiyenti  $k$  - to'g'ri va teskari yo'nalishda  $U = IV$  berilgandagi, to'g'ri va teskari toklar qiymati bilan aniqlanadi:

$$k = \frac{J_{torg'rt}}{J_{teskari}} = \frac{J}{J_{so}} \quad (7.16)$$

## 7.8. Geteroo'tishlar

Yuqorida bitta yagona kristall ichida diffuziya yo'li bilan hosil qilingan p-n o'tishning xossalarni o'rganildi. Bu yerda p va n turdag'i tomonlarni kristall panjara tuzilishi, ularning taqilangan sohalari va boshqa xususiyatlarida hech qanday farq mavjud emas, chunki ular yagona kristalda hosil qilingan. Taqilangan energetik sohalari har xil bo'lgan, ikki xil yarim o'tkazgich kontaktini geteroo'tish deb ataladi.

Bunda ikki xil atom tuzilishlardi, yarim o'tkazgichlarni kristall panjara doimiysi va ularning issiqlikdan kengayish koeffsiyentlari har xil bo'ladi. Shuning uchun ham geteroo'tishning xossalari yuqorida keltirilgan - panjara doimiysi, issiqlikdan kengayish koeffsiyenti va atom tuzilishidagi farqlarga o'ta bog'liq bo'ladi. Geteroo'tishni hosil qilishda bu farqlar eng kam bo'lgan yarim o'tkazgich materiallar tanlab olinadi. Geteroo'tishli qurilmalarning mono p-n o'tishlardagi materiallardan eng asosiy ahamiyati ular asosida yarim o'tkazgichli lazerlar, yorug'lik chiqaradigan diodlar, o'ta faol ishlaydigan quyosh elementlari yaratish mumkin. p – turdag'i bo'lgan Ge kristalli bilan n – turdag'i bo'lgan GaAs kristalli asosidagi geteroo'tish strukturasini ko'rib chiqaylik (Ge va GaAs kristall panjara doimiylari va boshqa xossalari bir – biriga juda yaqin). Bu materiallarning energetik soha tuzilishlaridan ko'rinish turibdiki, Ge ning chiqish ishi va elektronlarning o'tkazuvchanlik sohasidan vakuumga chiqish uchun zarur bo'lgan energiya , GaAs materiallarnikidan katta va taqiqlangan soha kengligi mos ravishda  $E_{g(Ge)}=0,67$  eV,  $E_{g(GaAs)}=1,43$ eV qiymatlarga teng. p-n geteroo'tishdagi energetik sohalar tuzilishi p-n mono o'tish energetik sohalari tuzilishidan farqi Ge va GaAs materiallarining taqiqlangan sohalar kengligidagi farq ta'siridan iborat bo'ladi. Mono p-n o'tishda o'tkazuvchanlik va valent sohalarini energiyasi uzlusiz o'zgarmasdan ularda  $\Delta E_C$  va  $\Delta E_V$  uzilgan sohalarni hosil bo'lishga olib keladi.



7.14 – rasm. Geteroo'tishning sohalar diagrammasi.

Ge (p – turli) ÷ GaAs (n - turli) geteroo'tishda kovaklar Ge kristallining kontakt sohasidan GaAs kontakt sohasiga o'tib, undagi elektronlar bilan rekombinatsiyalashadi va elektronlar n – GaAs kontakt sohasidan p – Ge kontakt sohasiga o'tib, undagi kovaklar bilan rekombinatsiyalashadi. Zaryad tashuvchilarining o'zaro o'tish jarayoni muvozanat o'rnatilguncha, ya'ni Fermi sathlari tenglashguncha davom etadi. Natijada Ge kontakt sohasi manfiy zaryadlanadi (kovaklarni

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. Natijada GaAs o‘tkazuvchanlik sohasining yuqoriga  $\varphi_1$  qiymatiga, Ge ning o‘tkazuvchanlik sohasi esa pastga  $\varphi_2$  qiymatga siljishiga olib keladi. Geteroo‘tishda erkin zaryad tashuvchilar harakatiga to‘sinqinlik qiluvchi kontakt potensial to‘sig‘ini hosil qiladi. Bu potensial to‘siq qiymati quyidagiga teng bo‘ladi:

$$\begin{aligned}\varphi = F_n - F_p &= (\eta_{Ge} + E_{g(Ge)} - \Delta\delta_{Ge}) - (\eta_{GaAs} + \Delta\delta_{GaAs}) \\ &= \varphi_1 + \varphi_2 \quad (7.17)\end{aligned}$$

7.14 rasmida keltirilgan sohalar diagrammasidan geteroo‘tish o‘tkazuvchanlik sohalardagi uzilish qiymatini  $\Delta E_c$  ni topish mumkin:

$$\Delta E_c = \Delta\delta_{GaAs} + \eta_{GaAs} - (E_{g(Ge)} - \Delta\delta_{Ge}) + \eta_{Ge} \quad (7.18)$$

$\varphi_1$  va  $\varphi_2$  ning qiymatlarini (1) ifodadan foydalanib, quyidagi ifoda yordamida topiladi:

$$\Delta E_c = \eta_{Ge} - \eta_{GaAs} \quad (7.19)$$

Demak bu qiymat, geteroo‘tishni hosil qilayotgan yarim o‘tkazgich materiallarining elektron (sredstva) larining farqiga teng bo‘lar ekan. Xuddi shunga o‘xshab valent sohadagi uzilish qiymatini ham topamiz:

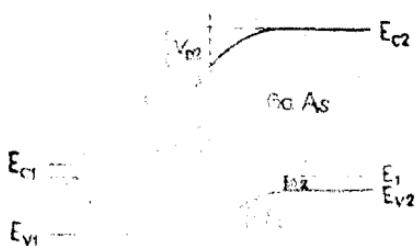
$$\Delta E_V = (E_{g(GaAs)} - E_{g(Ge)}) - (\eta_{Ge} - \eta_{GaAs}) \quad (7.20)$$

Valent sohasidagi uzilish  $\Delta E_V$  ning qiymati yarim o‘tkazgichlarning taqiqlangan sohalarini ayirmasidan ularning energetik qiymatlarining ayirmalarini farqiga teng bo‘ladi.(7.19) va (7.20) ifodalardan kelib chiqadi

$$\Delta E_V + \Delta E_c = (E_{g(GaAs)} - E_{g(Ge)}) \quad (7.21)$$

Demak  $\Delta E_c$  va  $\Delta E_V$  larni getero‘tishlarni tashkil etgan ikkita yarimo‘tkazgich materiallarini taqiqlangan sohalari va elektron lari

qiymatlarini bilgan holda har qanday getero o'tish uchun sohalar diagrammasini keltirish mumkin ekan. Masalan p-GaAs va n-Ge getero o'tish sohalar diagrammasi quyidagi 7.15-rasm keltirilgan. Sohalar diagrammasidan ko'rinish turibdiki, potensial to'siqning qiymati kovaklar uchun elektronlarga qaraganda ancha kam, bu geteroo'tishda asosiy tok kovaklar harakati bilan aniqlanishini ko'rsatadi.



**7.15 – rasm.** P – GaAs va n – Ge geteroo'tish sohalar diagrammasi.

Getero o'tishning Volt – Amper tavsifsi ifodasini quyidagicha yozish mumkin:

$$j = A \cdot \exp\left(-\frac{eV}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV_2}{kT}\right) - \exp\left(\frac{eV_1}{kT}\right) \quad (7.22)$$

Bunda

$$V_2 = k_2 V_o, V_1 = k_1 V_o, k_2 = \frac{1}{1 + \frac{N_d}{N_a} - \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}}, k_1 = 1 - k_2$$

$V_o$  – tashqi manba kuchlanishi va  $V_1, V_2$  lar p – GaAs hamda n – Ge geteroo'tishdagi kontakt sohalariga tushayotgan kuchlanish,  $N_d, N_a$  – GaAs va Ge donor hamda akseptor kirishma atomlar konsentratsiyasi. Geteroo'tishga musbat yo'nalish berilganda, ya'ni manbaning << + >> qutbi Ge kristalliga << - >> qutbi esa GaAs kristalliga ulanganda VAT si ifodasi quyidagicha bo'ladi:

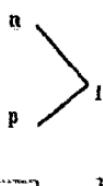
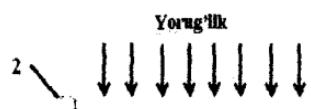
$$j = A \cdot \exp\left(-\frac{eV_2}{kT}\right) \exp\left(\frac{ek_2 V_o}{kT}\right) \quad (7.23).$$

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 hosil bo'ladigan (yorug'lik EyuK) yarim o'tkazgichli asboblarga quyosh elementlari deyiladi. Quyosh elementlari yorug'lik energiyasini to'g'ridan to'g'ri elektr energiyasiga aylantirib beradi. Bu jarayonning fizik mohiyati quyidagicha. Yarim o'tkazgichda yorug'lik nuri yutilganda 132lectron va kovak hosil bo'ladi. Yarim o'tkazgichdagi p-n o'tish elektr maydoni ta'sirida erkin elektronlar n-sohaga, kovaklar esa p – sohaga o'tadi. Natijada yarim o'tkazgichning n-sohasida ortiqcha erkin elektronlar, p-sohaga kovaklar to'planadi va n-soha manfiy, p-soha musbat zaryadlanadi.

Agar yarim o'tkazgichning n- va p-sohalarinitashqi zanjir bilan tutashtirilsa, berk zanjirdan tok oqadi.



**7.16 - rasm** quyosh elementining tuzilishi

1-Yarim o'tkazgichning n- va p-sohalari

2- Quyosh elementining yuza omik kontakti

3- Quyosh elementining orqa tomondagi omik kontakti

A

### Quyosh elementining VAT

$$(p-n \text{ o'tishning}) \text{ VAT si } I = I_s \cdot (e^{\frac{e\varphi}{kT}} - 1) \quad (7.24)$$

Agar  $p-n$  o'tish yoriltsa qo'shimcha yorug'lik toki  $I_f$  hosil bo'ladi:

$$I = I_f - I_s \cdot (e^{\frac{e\varphi}{kT}} - 1) \quad (7.25)$$

Bu ifodani quyidagicha yozish mumkin:

$$I_s \cdot (e^{\frac{e\varphi}{kT}} - 1) = I_f - J; e^{\frac{e\varphi}{kT}} = \frac{I_f - I}{I_s} + 1; \frac{e\varphi}{kT} = \ln\left(\frac{I_f - I}{I_s} + 1\right); \varphi = \frac{kT}{e} \ln\left(1 + \frac{I_f - I}{I_s}\right); \quad (7.26)$$

Agar quyosh elementiga (*p-n* o'tishni) tashqi zanjir ulansa u holda (7.24) va (7.25) ifodadagi tok

$I = \frac{U}{R_{yuk}}$  ifodaga teng bo'ladi. Shundan kelib chiqib (7.25) ifodani quyidagicha yozish mumkin.

$$I_f - J_s (e^{\frac{e\varphi}{kT}} - 1) = \frac{U}{R_{yuk}} \quad (7.27)$$

Bu ifodadagi fototok  $I_f$  yuklama qarshiligi  $R_{yuk}$  dan o'tayotgan tok  $I_u = \frac{U}{R_{yuk}}$  ifoda bilan *p-n* o'tishdan o'tayotgan tok  $I_u = J_s (e^{\frac{e\varphi}{kT}} - 1)$  ifoda yig'indisiga teng bo'ladi

$$I_f = I_{yuk} + I_u \quad (7.28)$$

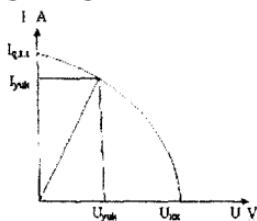
$R_{yuk} \rightarrow 0$  kichik bo'lganda (qisqa tutashuv toki holati) (7.28) ifodadagi  $I_u \approx 0$  va  $I_{yuk} \approx I_f$  bo'ladi

$$(I_{yuk} = I_{q.t.t}) I_f = \Delta\sigma \cdot E = e \cdot \beta \cdot k \cdot I (\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p) \cdot E \quad (7.29)$$

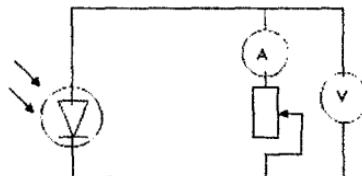
$R_{yuk} \rightarrow \infty$  katta bo'lganda (foto EYuK holati) (7.28) ifodadagi  $I_{yuk}=0$  va  $I_u \approx I_f$  u holda (7.26) ifodadan

$$\Delta\varphi = U_{xx} = \frac{kT}{e} \ln\left(1 + \frac{I_f}{I_s}\right); \quad (7.30)$$

Yorug'lik tushganda potensial to'siq kamayishi  $\Delta\varphi$  salb yurish kuchlanishga teng.



7.17-rasm



7.18-rasm

Quyosh elementi VAT ni grafigi O'chash uchun yig'iladigan elektr sxema

$$R_{yuk} = 0 \Omega \text{ bo'lganda } I_{yuk} = I_{q.t.t} \text{ ga } U_{yuk} = 0 \quad P_{yuk} = I \cdot U = 0 \text{ bo'ladi}$$

$$R_{yuk} \rightarrow \infty \Omega \text{ da } I_{yuk} = 0 \text{ da } U_{yuk} = U_{xx} \quad P_{yuk} = I \cdot U = 0 \text{ bo'ladi}$$

$$R_{yuk} = R_{optimal} \Omega \text{ da } I_{yuk} > 0 \quad U_{yuk} > 0 \quad P_{yuk} = I \cdot U = P_{max} \text{ bo'ladi}$$

Quyosh elementining foydali ish koifsoni

$$\eta = \frac{I_{kz} \cdot U_{xx} \cdot FF}{W}$$

· 100 % formula asosida aniqlanadi.

Bunda: W – Quyosh elementiga tushayotgan quyosh nurining quvvati

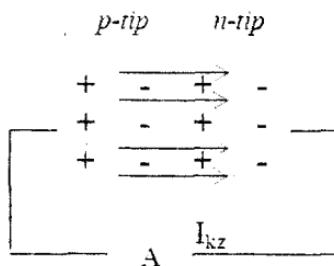
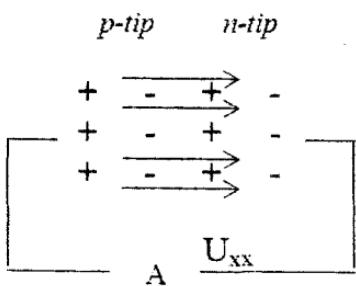
FF – VAT ning to‘ldirish koifsentini hisoblash ifodasi

$$FF = \frac{I_{\max} \cdot U_{\max}}{I_{kz} \cdot U_{xx}} \quad (7.31)$$

Tekshirilayotgan quyosh elementiga optimal qarshilik  $R_{yuk\ opt}$  ulanganda olish mumkin bo‘lgan maksimal tok  $I_{\max}$  va kuchlanishning  $U_{\max}$  ko‘paytmasi maksimal quvvat  $P_{\max} = I_{\max} \cdot U_{\max}$  ni qisqa tutashuv toki  $I_{kz}$  va salb yurish kuchlanishi  $U_{xx}$  ga bo‘lish orqali aniqlanadi. Son qiymati birdan kichik, odatda  $FF \approx 0.8$  bo‘ladi.

$h\nu \geq E$	$p$ -tip	$n$ -tip	
→	+	-	+
→	+	-	+
→	+	-	+
→	+	-	+
→	+	-	+
→	+	-	+
→	+	-	-

**7.19-rasm** Quyosh elementiga yorug‘ik nuri tushganda yorug‘lik elektr yurituvchi kuchining hosil bo‘lishi Quyosh elementini olish kerak bo‘lgan maksimal quvvat.



**7.20 rasm.** Quyosh elementi va uni olchash elektr sxemasi

**7.21 rasm.** Qisqa tutashuv tokini o‘lchash elektr sxemasi

*Metall – yarim o’tkazgich kontakti va p-n o’tish fizikasiga doir masalalar:*

1) Elektronlar konstentrasiyasi  $n = 5 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$  bo’lgan n-tur va kovaklar konstentrasiyasi  $p = 2 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$  bo’lgan p-tur kremniy materialida hosil bo’lgan p- n o’tish potenstial to’siq‘ining qiymatini aniqlang ( $T=300\text{K}$ ).

2) Elektronlar konstentrasiyasi  $n = 6 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$  va kovaklar konstentrasiyasi  $p = 5 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$  bo’lgan germaniy materialidagi p- n o’tish potenstial to’siq qiymatini hisoblang ( $T=300\text{K}$ ).

3) Elektronlar konstentrasiyasi  $n = 6 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$  va kovaklar konstentrasiyasi  $p = 5 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$  bo’lgan GaAs materialidagi p - n o’tish potenstial to’siq‘ining qiymatini hisoblang ( $T=300\text{K}$ ).

4) Nima uchun bir xil elektronlar va kovaklar konstentrasiyaga ega bo’lgan Si, Ge, GaAs kristallarida p- n o’tish potenstial to’siq qiymati juda katta farq qiladi? Tushuntirib bering.

5) Harorat pasayishi bilan p- n o’tish potenstial 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 konstentrasiyasi  $n = 5 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$  va kovaklar konstentrasiyasi  $p = 5 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$  bo’lgan diodda, hajmiy zaryad qalinligini hisoblang.

7) Elektronlar konstentrasiyasi  $n = 5 \cdot 10^{18}, 10^{19}, 2 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}$  va kovaklar konstentrasiyasi ham xuddi shunday mos ravishdagi qiymatlarga ega bo’lgan kremniy materialidan tayyorlangan diodning hajmiy zaryad qalinligini hisoblang va tushuntiring (bunda  $T = 300 \text{ K}$ ).

8) Elektronlar konstentrasiyasi  $n = 5 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$  va kovaklar konstentrasiyasi  $p = 5 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$  bo’lgan diodda n va p- turdagи hajmiy zaryad kengligini hisoblang ( $T=300 \text{ K}$ ).

9) Harorat  $T=300, 350, 400 \text{ K}$  bo’lganda, elektron konstentrasiyasi  $n = 10^{17} \text{ sm}^{-3}$  va kovaklar konstentrasiyasi  $p = 5 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$  bo’lgan kremniydagи p- n o’tish potenstial to’siq qiymatini hisoblang va olingang natijani tushuntirib bering ( $T=300\text{K}$ ).

10) Harorat  $T=300, 350, 400 \text{ K}$  bo’lganda, elektron konstentrasiyasi  $n = 10^{17} \text{ sm}^{-3}$  va kovaklar konstentrasiyasi  $p = 5 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$  bo’lgan kremniydagи p- n o’tish potensial to’siq qiymatini hisoblang va olingan natijani tushuntirib bering ( $T=300\text{K}$ ).

*Metall – yarim o’tkazgich kontakti va p-n o’tish fizikasiga 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 materialining hosil bo’lgan p- n o’tish potensial to’sig‘i 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-turli kremniy materialida hosil bo’lgan p-n o’tishning potensial to’sig‘ini aniqlaymiz:

*Berilgan:*

$$n_0 = 5 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}, p_0 = 2 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}, T = 300K, \varphi = ? n_i = 21,45 \cdot 10^{10} \text{ sm}^{-3}.$$

$$\begin{aligned}\varphi &= kT \ln \frac{n_n p_p}{(n_i)^2} = kT \ln \frac{5 \cdot 10^{15} \cdot 2 \cdot 10^{16}}{(21,45 \cdot 10^{10})^2} = kT \ln \frac{10^{32}}{4,6 \cdot 10^{22}} \\ &= kT \ln(2,17 \cdot 10^9) = kT \cdot 21,5 \\ &= 8,625 \cdot 10^{-5} \cdot 300 \cdot 21,5 = 0,56 \text{ eV}\end{aligned}$$

$$\varphi = 0,56 \text{ eV}.$$

10. Qisqa tutashuv toki 25 mA, erkin xolatdagi kuchlanishi 600 mV, VATning to’ldirish koefitsiyenti 70% va yuzasi  $1.5 \text{ sm}^2$  bo’lgan quyosh elementining FIK hisoblansin. Quyosh nurlarining quvvati 800  $\text{Vt/m}^2$  deb olinsin.

11. FIK 11%, VATning to’ldirish koefitsiyenti 65% va yuzasi  $0.8 \text{ sm}^2$  bo’lgan quyosh elementidagi qisqa tutashuv toki 21 mA, erkin holatdagi kuchlanish 600 mV bo’lsa, tushayotgan quyosh nurini quvvati topilsin.

12. Fotoelementning fototoki 100 mA, teskari to’yinish tok  $10^{-9} \text{ A}$  bo’lsa, uy va  $70^\circ \text{C}$  haroratida uning erkin xolatidagi kuchlanishi aniqlansin.

13. Erkin holatidagi kuchlanishi 600 mV va fototokini qiymati 25 mA bo’lgan quyosh elementining teskari to’yinish toki topilsin.

14. Fototokining qiymati 65 mA, teskari to’yinish toki  $6.5 \cdot 10^{-8} \text{ A}$  bo’lgan quyosh elementining harorati  $1^\circ \text{C}$  ga ortgandagi erkin xolatidagi kuchlanishini o’zgarishi hisoblansin. Fototok o’zgarishi hisobga olinmasin.

15. 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 galley arsenide, galley fosfidi va germaniy uchun ham bajarilsin.

16. 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.

17. Monokristall kremniy, germaniy, galley arsenid va indiy fosfidlari uchun kuchli yutiladigan to'lqin uzunliklarining oralig'i topilsin.

18. Agar tushayotgan fotonlarning boshlang'ich zichligi  $10^{20}$  sm<sup>-3</sup> bo'lsa, monokristall kremniy asosida yasalgan quyosh elementi bazalarining qalnliklari qanday bo'lganda, quyidagi to'lqin uzunliklari 0.25 mkm; 0.45 mkm; 0.65 mkm; 0.85 mkm; 1.05 mkm uchun to'la yutilish kuzatiladi.

19. Kremniy asosida yasalgan quyosh elementidagi asosiy bo'lmanan zaryad tashuvchilar, elektronning yashash vaqtisi  $10^{-6}$  s, kovakning yashash vaqtisi  $10^{-7}$  s, bo'lsa ularning diffuziyasining uzunliklari hisoblansin.

20. 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 energiyalar aniqlansin.

21. Kvant energiyasi, potensiallar farqi 4.3 V bo'lgan maydondan uchib o'tayotgan, elektron energiyasi bilan aniqlansin.

22. Rentgen va infraqizil nurlar uchun fotonlarning massasi va impulsi topilsin.

23. Fotonlarning massasi elektron protonning tinch holatidagi massasiga teng bo'lgan holat uchun nurlanishning to'lqin uzunligi va chastotasi topilsin.

24. Quvvati 100 Vt bo'lgan yorug'lik manbai, 1 sekund davomida  $5 \cdot 10^{20}$  ta foton chiqarayotgan bo'lsa, nurlanishi o'rtacha to'lqin uzunligi topilsin.

25. 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?

26. Quyosh har sekundda fazoga  $3.75 \cdot 10^{26}$  Dj ga yaqin energiya nurlantirib turadi. Shu munosabat bilan quyoshni massasi har sekundda qanchaga kamayadi?

27. Quyosh tashqi qatlami 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 turlanish odam tanasining haroratiga mos deb hisoblansin.

28. O'z bo'yingizni bilgan holda, soyangizni o'chab, atmosfera massasini aniqlang.

29. Qizil nur energiyasi, yashil nur energiyasidan qancha marotaba kichik?

### Nazorat savollari

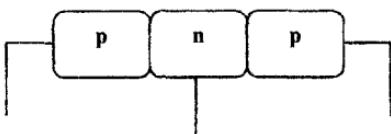
1. Quyosh elementi qanday materiallardan tayyorlanadi ?
2. Quyosh elementi qanday maqsadda ishlataladi ?
3. Quyosh elementining yuza va orqa omik kontaklarining tuzilish qanday bo'ladi ?
4. Quyosh elementida yorug'lik energiyasining elektr energiyaga aylanishi qanday sodir bo'ladi ?
5. Quyosh elementining qisqa tutashuv toki deganda nimani tushinasiz?
6. Quyosh elementining salt yurish kuchlanishini tushintiring?
7. Quyosh elementining foydali ish koifsentini tushintiring?
8. Quyosh elementining VAT ni tushintiring?
9. Quyosh elementining VAT sining to'ldirish koifsentini tushintiring?
10. Quyosh elementining tuzilishini tushintiring?
11. Chiqish ishi nima?
12. Yarim o'kazgichlarda chiqish ishining qiymati nimalarga bog'liq?
13. Metall – yarim o'kazgich kontaktlari necha turga bo'linadi va ular qanday hosil qilinadi?
14. Metall – yarim o'kazgich kontakt sohalar diagrammasi va VAT ini chizing va tushuntiring?
15. Omik kontakt hosil qilishning asosiy sharti nima?
16. p-n o'tish potensial to'sig'i harorat oshganda qanday o'zgarishi mumkin?
17. p-n o'tishning sohalar diagrammasini chizing va tushuntirib bering?
18. Shottki diodi qanday hosil qilinadi?
19. Shottki va p-n o'tish diodlarining asosiy farqi nima va ular qayerlarda ishlataladi?

## 8 - BOB TRANZISTORLAR

### 8.1 Bipolar tranzistorning tuzilishi

Bipolar tranzistor tuzilishining sxemasi 8.1-rasmda ko'rsatilgan.

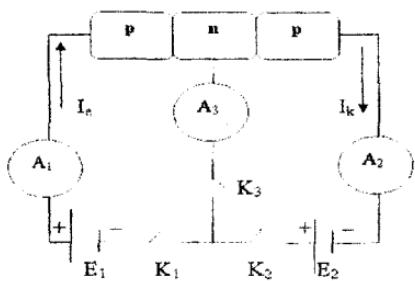
Emitter Baza Kollektor



### 8.1-rasm tranzistorning ekvivalent tuzilishi.

8.1-Rasmdan ko'rindiki transistor 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 transistor bazasi deyiladi chap tomonagi p soha emitter, o'ng soha kollektor deyiladi.

Tranzistorning ishlash prinsipi



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). 2-rasm Emmiter o'tishdan quyidagi yo'nalishda emitter toki  $I_e$  o'tadi.

### 8.2-rasm Tranzistorni tashqi elektr kuchlanishga ulanishi tartibi

" $+E_1$ "  $\rightarrow A_1 \rightarrow$  emitter  $\rightarrow$  baza  $\rightarrow A_2 \rightarrow K_2 \rightarrow K_1 \rightarrow -E_1$ "

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:

" $+E_2$ "  $\rightarrow K_3 \rightarrow K_2 \rightarrow A_2 \rightarrow$  baza  $\rightarrow$  kollektor  $\rightarrow A_3 \rightarrow -E_1$ "

Agar uchta  $K_1$   $K_2$   $K_3$  ulansa emitter o'tishiga to'g'ri kuchlanish berilgani uchun emitterdan bazaga kovaklar diffuzyalanadi (injeksiyalanadi). baza sohasi yupqa bo'lgani uchun bu kovaklar rekombinatsiyalnishga ulgurmasdan kollektor o'tishiga etib keladi va kollektor o'tishidagi elektr maydoni ta'sirida kollektor sohasiga tortib olinadi (ekstraktsiyalani). 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 diffuzyalanib o'tayotgan elektronlar soni emitterdan bazaga diffuzyalanib 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  $I_{en} \approx I_{ep}$ . Emitterning samaradorligi injeksiya koifsendi  $\gamma$  bilan belgilanadi.

$$\gamma = \frac{I_{ep}}{I_e} = \frac{I_{ep}}{I_{ep} + I_{en}} \underset{(1)}{\approx} \frac{I_{ep}}{I_{en}} \ll 1 \quad (8.1) \text{ bo'lgani uchun } \gamma \approx 0,999$$

ga teng

Emitter sohasidagi bazaga diffuzyalanib (injeksiyalanib) o'tgan kovaklar kollektor o'tishiga deyarli to'liq etib keladi juda kam qismigina baza sohasiga rekombinatsiya bo'ladi sababli kollektor tokini  $I_k$  emitter toki  $I_e$  ga taxminan teng deyish mumkin  $I_k \approx I_e$ . 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 tok tashuvchilar (elektron va kovak)ning baza sohasidagi rekombinatsiyaning ta'sirini baholash uchun tok tashuvchilarning emitter o'tishidan kollektor o'tishiga etib borish o'chish koifsendi  $\delta$  (koifsent perenosa) dan foydalilanadi

$$\delta = \frac{I_{kp}}{I_{ep}} \quad (8.4)$$

baza sohasi qancha yupqa va elektronlar kam bo'lsa  $\delta$ — koifsendi birga yaqin bo'ladi. Tranzistorlarning asosiy parametrleridan biri emitter tokining uzatish koifsendi bo'lib, u quyidagiga teng bo'ladi:

$$\alpha = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_e} \quad (8.5)$$

ya'ni  $\alpha$  emitter tokining  $\Delta I_e$  oshishi kollektor tokining qanch oshishini (kollektor o'tishiga berilgan kuchlanish o'zgarmas bo'lganda) ko'rsatadi. Odatda  $\alpha = 0,95 \dots 0,99$  qiymatlarga ega bo'ladi, α qancha katta bo'lsa tranzistorning kuchaytirish xossasi shuncha yuqori bo'ladi. Kollektor o'tishida emitterdan kollektorga etib kelgan kovaklar hosil qiladigan kollektor tokidan tashqari, kollektor o'tishining teskari toki  $I_{kbs}$  ham o'tadi:

$$I_k = \alpha I_e + I_{kbs} \quad (8.6)$$

Odatda  $\alpha I_e \gg I_{kbs}$  shuning uchun

$$I_k = \alpha I_e \quad (8.7)$$

bu ifodadan ko'rindaniki 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 to'tr xil holatda ishlatalish mumkin.

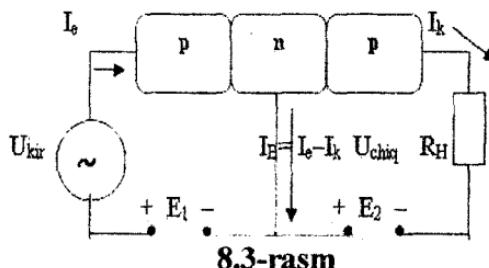
**Faol holat:** emitter o'tishiga to'g'ri kuchlanish kollektor o'tishiga teskari kuchlanish beriladi

**Otsetka holat:** emitter o'tishiga ham kollektro 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. Transistor chiqish zanjirida tok eng katta qiymatiga ega va kirish zanjiri toki bilan boshqarilmaydi. Tranzistor ochiq holatda bo'ladi.

### Tranzistorlarni ulash sxemalari.

I.Tranzistorni umumiy baza sxemasi bo'yicha ulash. 8.3-rasm



Sxemada kirish signali manbai ( $U_{kirish}$ ) dan emitter toki  $I_E$  o'tadi (anig'rog'I kirish signali manbaidan o'tadigan tok kirish toki deyiladi)  $I_{kirish} = I_E$ . Bu sxemada chiqish toki kollektor tokidir:  $I_{chqish} = I_{kirish}$ . Agar kirish signali  $I_{kirish}$  ta'sirida emitter toki  $\Delta I_E$  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 kaeffisiyenti bilan xarakterlanadi. Tranzistorni umumi baza sxemasi bo'yicha ulanganda bunday koeffisiyent sifatida emitter tokini uzatish koeffisiyenti xizmat qiladi

$$\alpha = \frac{\Delta I_{chqish}}{\Delta I_{kirish}} = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_E} \quad E_2 = \text{const.} \quad (8.9)$$

Emitter toki tranzistorning barcha toklaridan katta bo'gani uchun umumi baza sxemasida kirish tokining o'zgaruvchan tashkil etuvchisidan kirish qarshiligi kichik bo'ladi (to'g'ri kuchlanish berilgandagi emitter o'tish qarshilagi  $r_e$  ga teng)

$$R_E = \frac{\Delta U_{kirish}}{\Delta I_{kirish}} = \frac{\Delta U_{kirish}}{\Delta I_E} \approx r_E \quad (8.10)$$

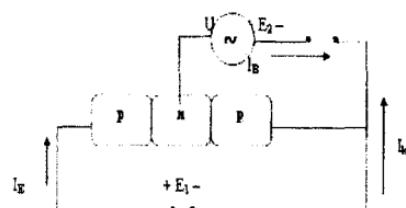
Umumi baza sxemasida kirish qarshiligining kichikligi uning asosiy kamchligidir, chunki ko'p kaskadli kuchaytirgichlarda bu qarshilik o'zidan oldingi kaskad yuklama qarshilligi uchun shuntlovchi qarshilik bo'lib qoladi va u kaskadning kuchlanish va quvvat bo'yicha kuchaytirishni kamaytirib boradi.

(8.4-rasm)

## II. Tranzistorni umumi emitter sxemasi bo'yicha ularash

Emitter elektrodi kirish va chiqish zanjirlari uchun umumiyo'dir.

Umumi emitter sxemasining afzalligi kirish tokini qiymati kichik bo'lgan baza tokiga teng bo'ladi,  $I_B$  kirish, chiqish toki esa kollektor toki  $I_k$  bilan aniqlanadi.



Tokni uzatish koeffisiyenti:

$$\beta = \frac{\Delta I_{\text{chiqish}}}{\Delta I_{\text{kirish}}} = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_B} \quad (8.11)$$

Umumiy emitter sxemasi bo'yicha ulanganda tranzistorning kirish qarshiligi, umumiy baza sxemasi bo'yicha ulangandagiga nisbatan katta bo'ladi: **8.5 rasm**

$\frac{\Delta U_{\text{kirish}}}{\Delta I_B} >> \frac{\Delta U_{\text{chiqish}}}{\Delta I_E}$ , (8.12) chunki  $\Delta I_B \ll I_E$  Shuning uchun tranzistorlarning umumiy emitter sxemasi bo'yicha ularash ko'proq qo'llaniladi

### III Tranzistorlarni umumiy kollektor bo'yicha ularash sxemasi

Tranzistor umumiy kollektor bo'yicha sxemasi bo'yicha ulanganda kirish signali baza kollektoriga beriladi. Kirish toki baza toki  $I_B$ , chiqish toki emitter toki  $I_E$ ,

$$\frac{\Delta I_E}{\Delta I_B} = \beta + 1 \quad (8.13)$$

Tok uzatish koifsentti

Tranzistorni umumiy kollektor sxemasi bo'yicha ularash kirish signalini kuchlanish bo'yicha kuchaytirish imkonini beradi, shuning uchun juda kam hollardagina ishlatalishi mumkin.

#### Tranzistorning statik xarakteristiklari

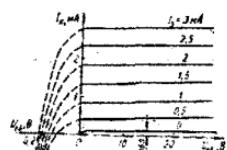
Tranzistorning statik xarakteristiklari kirish tokining kirish kuchlanishiga va chiqish tokining chiqish kuchlanishiga bog'liqligini ko'rsatadi.

#### Umumiy baza sxemasi bo'yicha ulanganda kirish statik xarakteristikasi (8.3-rasm)

Emitter toki ( $I_E$ ) ning emitter-baza orasidagi kuchlanishga  $U_{EB}$  bo'g'liqligini (kollektor-baza kuchlanishi o'zgarmas bo'lganda  $U_{KB} = \text{const}$ ):  $I_E = f(U_{EB})$ ,  $U_{KB} = \text{const}$

Rasmdan ko'rindiki kirish xarakteristikasi p-n o'tishning to'g'ri toki bilan bir xil  $U_{KB}$  kuchlanishi  $I_E$  tokiga kuchsiz ta'sir qiladi.

Tranzistorning chiqish tavsifsi kollektor toki  $I_E$  ning kollektor-baza kuchlanishi  $U_{KB}$  ga bog'liqligi (mitter toki o'zgarmas bo'lganda  $I_E = \text{const}$ ).



(8.6-rasm)

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 tshuvchilar kollektor o‘tishiga yetib kelib,  $I_K$  nihosil qiladi.  $I_E=0$  bo‘lganda tavsif koordinata boshidan boshlanadi va kichik qiymatga ega, ya’ni p-n-o‘tishning teskari tokiga mos keladi.  $I_K$   $U_{KB}$  kuchlanishini qutblarini o‘gartirilsa, ya’ni kollektor o‘tishiga to‘g‘ri kuchlanish berilsa,  $I_K$  toki keskin nolgacha kamayadi.

**Umumiy emitter sxemasi bo‘yicha ulanganda kirish statik tavsifi** Kollektor-emitter kuchlanishi o‘zgarmas bo‘lganda  $U_{KE} = \text{const}$ , baza toki  $I_B$  ning baza-emitter kuchlanishi  $U_{BE}$  ga bog‘liqligini ifodalaydi.

$$I_K = f(U_{KE}), I_B = \text{const.}$$

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 tavsifsining 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 bo‘g‘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 ishslash deyiladi. Bu holatda transistor elektrodlarida kuchlanish va tokning qiymatlari uzlusiz 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:

$$U_{KE} = E_K - I_K R_N. \quad (8.14)$$

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 qarshiligidagi mos kelgan) keltirilgan.

Statik tavsiflaridagi yuklama to'g'ri chizig'inining joylashishi mos ravishda tok manbaini kuchlanishi  $E_K$  bilan yuklama qarshiligi  $R_N$ dan aniqlanadi.Yuklama to'g'ri chizig'inining B nuqtasi kollektorga berilgan kuchlanish  $E_K$  ga teng bo'lган holatga mos keladi.Bunda kollektor toki nolga teng  $I_K=0$ ,u holda yuklama qarshiligidan tok o'tmaydi va kuchlanish tushishi nolga teng :

$$U_{RN}=I_K \cdot R_N = 0 \cdot R_N = 0 \quad (8.15)$$

Yukama to'g'ri chizig'inining A nuqtasi kollektor tokining

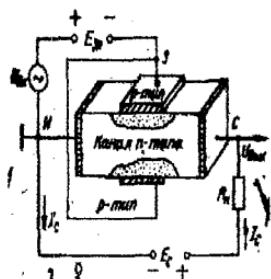
$$I_K = \frac{E_K}{R_N} \quad (8.16)$$

Qiymatga mos keladi,ya'ni tranzistorni qisqa tutashuv qilinsa kollektor toki  $I_K$  faqat yuklama qarshiligi  $R_N$  bilan cheklangan bo'ladi.

Yuklama to'g'ri chizig'inining A va B nuqtalaridan boshqa barcha nuqtalari kirish signalini berilganda transistor zanjiridagi mumkin bo'lган kuchlanish va tok qiymatlarini ifodalaydi.Har qanday baza toki  $I_B$  ga ma'lum qiymatdagagi kollektor toki  $I_K$  va kollektor kuchlanishi  $U_{KE}$  mos keladi (8.6 rasmida tashqi signal nol bo'lгanda  $I_{BE}$  tokka P-ishchi nuqta  $U_{KE}$  ishchi kuchlanish va  $I_K$  ishchi tokka mos keladi).

Kirish dinamik tavsifsi dinamik holatda kirish tokining kirish kuchlanishiga bog'liqligini ifodalaydi. Kirish dinamik tavsifni chizish uchun har bir kollektor kuchlanishiga chiqish dinamik tavsifsidan mos kelgan baza toklarini aniqlash kerak.So'ngra kirish statik tavsifsida shu nuqtalarni belgilab ( $A', P', B'$ ) bu nuqtalarni birlashtirsak kirish dinamik tavsifsi hosil bo'ladi (punktir chiziq)

### 8.3 Maydon tranzistorlari



Maydonli tranzistor deb uch eektrodli yarim o'tkazgichli asbobga aytildi. Unda tok bo'ylama elektr maydoni ta'sirida asosiy zaryad tashuvchilar tomonidan hosil qilinadi,bu tokni boshqarish uchun ko'ndalang elektr maydoni boshqaruvchi elektrodga berish orqali amalga oshiriladi.

Barcha maydonli tranzistorlar tuzilishi bo'yicha 2 guruhga bo'linadi:

1) p-n-o'tish maydonli tranzistorlar(kanalli yoki unipolyar tranzistorlar)

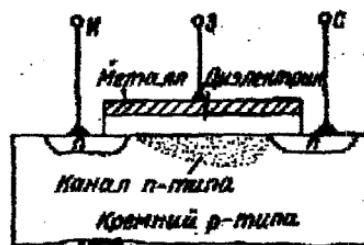
2) zatvori izolyatsiyalangan maydonli tranzistorlar (MDYa yoki MOYa-tranzistorlar)

**P-n-o'tish maydonli tranzistor.** Ikki tomondan p-n-o'tish bilan chegaralangan tor n-soha kanal deyiladi. Kanalni elektr zanjirga ulash ikki tomondagi omik elektrodlar orqali amalga oshiriladi. Bu elektrodlardan bittasi istok (U), ikkinchisi stok (S) deyiladi. P-soha elektrodi boshqaruvchi elektrod bo'lib,zatvor (Z) deyiladi.

Kanaldan oqayotgan tokning kattaligi istok-stok oralig'iga berilgan kuchlanish  $U_{sq}$  qiyomatining kattaligiga, yuklama qarshiligi  $R_N$  ga va yarim o'tkazgich plastinkasining istok-stok oralig'idagi qarshiligiga bog'liq.  $U_s = \text{const}$  va  $R_N = \text{const}$ ,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 yuzasi 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  $I_s$  ortaddi.  $E_{ZU}$  manbaga 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  $R_H$  dan o'tayotganda kuchlanish tushishi  $U_{ch}$  yuzaga keladi, bu kuchlanish kirish signali  $U_{kirish}$  o'zgarishiga mos ravishda o'zgaradi.

Zatvori izolyatsiyalangan maydonli transistor

strukturasi: metal - dielektik (oksid) - yarim o'tkazgich (MDYa yoki MOYa - tranzistor) dan iborat bo'lib Uning konstruksiyasi rasmida ko'rsatilgan.



Zatvori izolyatsiyalangan  
maydonli transistor

8.10-rasm

Tranzistorning asosi p-turli monokristall kremniy plastinkasi bo'lib, istok va stok sohalari plastinkaning kuchli legirlangan n-turli qismlaridir. Istok bilan stok oralig'i 1 mkm. Bu oraliq tor ensiz va qarshiligi katta n-turli kanaldir. Zatvor kanalning qalinligi 0,1 mkm bo'lgan dielektrik (oksid -  $SiO_2$ ) qatlam bilan izolyatsiyalangan metall plastinka.

Istokka nisbatan zatvorga berilgan kuchlanishning ishorasiga qarab ("+" yoki "-"), kanalda elektronlar ko'payishi yoki kamayishi mumkin. Zatvorga manfiy ("-") kuchlanish berilganda kanaldagi elektronlar yarim o'tkazgich (ichkarisiga) hajmiga tomon siqib chiqariladi. Bunda kanalda elektronlar kamayib ketadi va kanaldan oqadigan tok kamayadi. Zatvorga musbat ("+") kuchlanish berilganda yarim o'kazgich hajmidan elektronlar kanal sohasiga tortiladi va kanaldan oqadigan tok ortadi. p-n-o'tish maydonli tranzistorning chiqish voltamper tavsifsi(VAT), ya'ni bo'lganda, keltirilgan.

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 esa kanal ko'ndalang kesim yuzasining 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 to'yinish holatiga chiqadi. Stok toki to'yinish (o'zgarmas)ga chiqadigan  $U_S$  kuchlanishni to'yinish kuchlanishi  $U_{Sto'yin}$  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 stokozatvor tavsif 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 transistor kanali torayishi holatida ishlaydi, MDYa (yoki MOP) tranzistorlar kanali qarshiligi kamayishi (zatvorga musbat kuchlanish berilganda, elektronlar kanali boyiydi) va kanal qarshiligi ortishi (zatvorga manfiy kuchlanish berilganda, elektronlar kanali kamayadi) holatlarida ishlaydi. Shuning uchun stokozatvor tavsifsi [ $I_S=f(U_{ZI})$ ,  $U_S=\text{const}$ ] zatvor-istok kuchlanishi  $U_{ZI}$ ning musbat qiymatlarida ham mavjud

## 8.4 Maydonli tranzistorlarning asosiy parametrlari

$$\frac{\Delta I_s}{\Delta U_{ZI}}$$

Tavsifning egriligi  $S = \frac{\Delta I_s}{\Delta U_{ZI}}$ ,  $U_s = \text{const}$ . Bu parametr zatvorning boshqarish samaradorligini ifodalaydi.  $U_{ZUots}$ - kuchlanishi kanal to'liq yopiladigan kuchlanish.

Zatvor-istok orasidagi kirish qarshiligi  $R_{\text{kirish}}$  (zatvor-istok elektrodlari orasidagi mumkin bo'lgan eng katta kuchlanishda):

$$R_{\text{kirish}} = \frac{\Delta U_{Z \max}}{\Delta I_{Z \max}} \quad (8.17)$$

Chiqish qarshiligi  $R_{\text{chiqish}}$  (to'yinish holatida aniqlanadi):

$$R_{\text{chiqish}} = \frac{\Delta U_s}{\Delta I_s}, U_{ZU} = \text{const.} \quad (8.18)$$

Maydonli tranzistorlarning afzallikkлari:

1. Katta kirish qarshiligiga ega. (p-n-o'tishli maydonli tranzistorlarda  $10^6$ - $10^9$  om zatvori izolyatsiyalangan maydonli tranzistorlarda  $10^{13}$ - $10^{15}$  om.) bo'ladi.

2. Xususiy shovqin juda kam. Tok hosil qilishda faqat bitta turdagи zaryad tashuvchi ishtirok etadi, shuning uchun rekombinatsiya bo'lmaydi, rekombinatsiya shovqin yo'q.

3. Harorat va radiatsiya ta'siriga chidamli.

4. Integral sxemalarda juda katta zichlikda tranzistorlar hosil qilinadi (integratsiya darajasi yuqori).

8 - bobga doir sinov savollari:

1) Kinetik hodisa deganda nima tushuniladi?

2) Moddaning muvozanat holati nima va bu holatda qanday jarayon yuz beradi?

3) Relaksatsiya vaqt deb nimaga aytildi?

4) Zaryad tashuvchilarining harakatchanligi nima va unimalarga bog'liq?

5) Elektronning elastik va elastik bo'lgan sochilishi deganda nimani tushunasiz?

6) Zaryad tashuvchilarining zaryadlangan nuqsonlarda sochilishida qanday jarayon yuz beradi?

7) Boltzman tenglamasini yozing va uni tushuntirib bering?

*Yarim o'tkazgichlarda kinetik hodisalarga doir masalalar:*

- 1) 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.
- 2) Agar bir xil elektron va kovak konsentratsiyasiga ega bo'lgan  $n$  va  $p$  - turli GaAs kristallining  $T=300\text{K}$  da solishtirma qarshiligi nimaga teng bo'ladi?
- 3) Kremniy kristallida xona haroratida elektronlar  $\frac{\text{sm}^2}{V \cdot s}$  harakatchanligi  $\mu_n = 1400 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{sm}^2}$  bo'lsa, uning qiymati  $T=350, 400, 500\text{K}$  haroratlarda handay bo'ladi.
- 4)  $p$  - turli kremniyda  $T=300\text{K}$  da kovaklar harakatchanligi  $\mu_r = 500 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{sm}^2}$  bo'lsa,  $T=200, 100, 50$  va  $10\text{K}$  haroratlarda qanday qiymatlarga ega bo'ladi.
- 5) Elektron konsentratsiyasi  $n = 10^{16} \text{ sm}^{-3}$  ga teng bo'lgan kremniy materialida harorat  $T=250\text{K}$  dan  $400\text{K}$  o'zgarganda o'tkazuvchanlik qanday o'zgaradi. Olingen natijani tushuntirib bering.
- 6) Elektron konsentratsiyasi  $n = 4 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$  bo'lgan  $n$ -turli kremniy materiali, qanday haroratda xususiy o'tkazuvchanlikka ega bo'ladi.
- 7) Kovaklar konsentratsiyasi  $p = 2 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$  bo'lgan  $p$  - turdag'i kremniy materiali qanday haroratda xususiy o'tkazuvchanlikka ega bo'ladi.
- 8) Elektron va kovaklar konsentratsiyasi bir xil bo'lgan  $n$  va  $p$  - turdag'i Si materialining o'tkazuvchanligi qancha farq qiladi ( $T=300\text{K}$ )? Xuddi shunday masalani Ge va GaAs materiallari uchun ham yeching.
- 9) Relaksatsiya vaqtini formulasidan foydalaniib  $\tau$  ni metall (Au) va yarim o'tkazgich (Si  $n$  - turp  $\sim 10^2 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ ) uchun hisoblang. Nima uchun  $\tau$  qiymati materiallarda o'zgarmas ( $T$ ) va yarimo'tkazgichlarda uning qiymati haroratga, kirishma atomlari soniga o'ta bog'liq.

## **Nazorat savollari**

1. Tranzistorlarning turlari
2. Bipolyar tranzistorlarning turlari
3. Bipolyar tranzistorlarning ishlash asosi
4. Bipolyar tranzistorlarning ularash: umumiy baza, umumiy emitter, umumiy kollektor
5. Maydonli tranzistorlarning turlari
6. p-n o'tish maydonli transistor tuzilishi
7. p-n o'tish maydonli transistorning ishlash asosi
8. Zatvorli izolyatsiyalangan maydonli transistor tuzilishi
9. MDP- Tranzistorning tuzilishi
10. Bipolyar tranzistorlarning kirish va chiqish statik xarakteristlari
11. Maydonli tranzistorlarning kirish va chiqish statik xarakteristlari
12. Bipolyar tranzistorlarning asosiy parametrlari
13. Maydonli tranzistorlarning asosiy parametrlari

## **9 - BOB Mikroelektronikaning rivojlanishida texnologiyaning o'rni**

Yarim o'tkazgichli asboblar ishlab chiqarish texnologiyasi muttasil rivojlanishi natijasida integral sxema (IS)lar yaratildi. ISlarni ishlab chiqarish 1959 yillarda, taklif etilgan planar texnologiya asosida, boshlandi.

Planar texnologiya asosi bo'lib quyidagi bir qancha fundamental texnologik usullar xizmat qildi:

-1957 yilda kremniyga donor va aktseptorli kirishmalarini lokal diffuziya qilish (kiritish) uchun kremniy yuzasida termik o'stirilgan  $\text{SiO}_2$  qatlidan 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 sohalarini atrof-muxit ta'siridan himoyalashda  $\text{SiO}_2$  qatlidan foydalanish usuli yaratildi.

ISlarni tayyorlashda bajariladigan asosiy texnologik jarayonlar:

1. Kremniy slitkasidan plastinka qirqish, mexanik ishlov berish
2. Kimyoiy ishlov berish bilan plastinka sirtini tozalash.

3. Oksidlash yuli bilan kremniy plastinka sirtida  $\text{SiO}_2$  qatlam hosil qilish, bu qatlam lokal diffuziyalash jarayonida kirishmaga to'siq vazifasini bajaradi.

4. Kremniyli yoki boshqa materialli (masalan sapfir  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) plastinka yuzasida kremniy epitaksial qatlami o'tsirish.

5. Kremniy plastinkasida diffuziya va ionli legirlash usullari bilan kirishma kiritilgan sohalar hosil qilish.

6. Plastinka ishchi yuzasiga metall qatlamlari hosil qilish bilan omik tutashuv, elementlarni o'zaro ulash yo'lchalarini yaratish.

7. Lokal diffuziyaga  $\text{SiO}_2$  qatlarda darcha ochish va elementlarni o'zaro ulash yo'lchalarini yaratish uchun FL jarayonini bajarish.

8. Bitta plastinkada yaratilgan IS larni parametrlarini tekshirish va yaroqlilarini saralash.

9. Plastinkani kristallarga bo'lish va yaroqli IS larni qutilarga joylashtirish.

10. Mexanik mustaxkamligini harorat o'zgarishiga va namlikka chidamliligini texnologik sinash.

11. IS lar parametrlarini yakuniy tekshirish.

Katta va o'ta katta (KIS va O'KIS) IS larda elementlar 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 relefli shakl hosil qilinadi. Nitrid kremniy qatlami o'stiriladi. FL o'rniga rentgen nur litografiya va elektron nur litografiya usullari qo'llaniladi. Lokal yemirish uchun ion plazmali yemirish usullaridan foydalanish elementlar o'lchamini kichraytirish imkonini beradi.

Planar texnologiyani muxim jixati uning universalligida-  
dir. Texnologik jarayon 3 ta takrorlanib turuvchi operatsiyalar : kimyoviy  
ishlov berish, termik ishlov berish va FL lardan iborat.

### **IS larning afzallikkilari:**

-IS larning o'lchamlari kichikligi va massasining kamligi tufayli EXM larni yaratishda va aloqa tizimlarida (tezkorligi tufayli) keng qo'llaniladi.

-Tannarxining arzonligi va ekspluatatsion harakteristikalarining yaxshiligi tufayli IS lar o'ta murakkab sxemalarning sifatini oshirish imkonini beradi.

### **IS larning kamchiliklari:**

-Yuqori chastotalarda IS xarakteritsikalari yomonlashadi.

-Passiv elementlar haroratiy koiffisyentlari ancha katta qiymatlarga ega.

-Rezitsorlar qarshiligi 10-50 kOm, kondensatorlar sig'imi esa 200 pF dan kam.

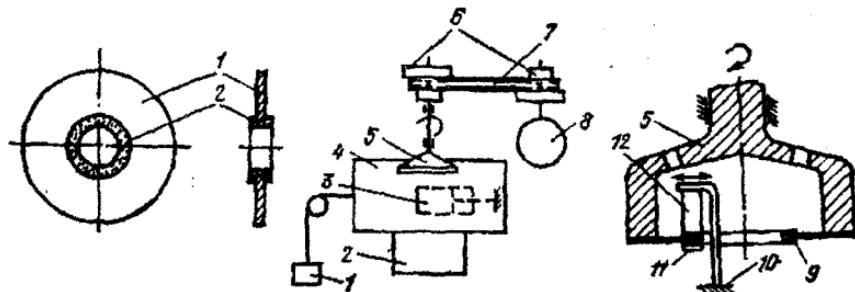
-Induktiv g'altaklarni IS larda yaratish juda murakkab.

## **9.1 Kremniyli taglikka mexanik ishlov berish**

IS lar asosan kremniy monokristalidan tayyorlanadi, bunga sabab nisbatan sodda usul bilan hosil qilinadigan  $\text{SiO}_2$  qatlami yuqori sifatlidir. Katta diametrli Si monokristalini olish texnologiyasi ancha arzon va yaxshi o'zlashtirilgan.

Kremniy monokristall slitkasidan qirqib olingan, ma'lum mexanik va kimyoviy ishlov berilgan plastinka IS tagligi deyiladi.

Kremniy slitkasidan plastinka qirqish uchun olmos kukuni surilgan metall diskdan foydalaniladi. Disk qalinligi 0,1- 0,15 mmni tashkil etadi.



9.1-rasm. Si ga mexanik ishllov berish

Qirquvchi uskunadagi kremniy slitkasini ushlagichining siljish tezligi 20-30 mm/min. Qirqilgan plastinka sirtida obraziv 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. IS hosil qilish uchun esa plastini sirtidagi notekislik 0,02 -0,1 mkm.dan oshmasligi kerak bu esa 14-sinf tozaligidan ham yuqori tozalikdir. Bunday tekislikka erishish uchun plastinkalar mikroporoshoklar yordamida maxsus yuqori aniqlikdagi aniqliklarda jilvirlanadi, (shlipovka), so'ngra sayqallanadi (polirovka). M14-M15 mikroporoshok yordamida shlipovka qilinganda shishali shlipovalnik ishlatalidi. Olmos pastasi yordamida polirovka qilinganda shlipovalnik sirti lattali bo'ladi.

Plastinkaning 2 tomoni shlipovka qilinadi. Polirovka esa faqat IS hosil qilinadigan yuzasi qilinadi. M14 - mikrokukunda kukunlar o'lchami 14-10 mkm, M10-mikrokukunda esa 10-7 mkm. ASM-3/2-sintetik almaz kukuni, 3/2 - kukunlari o'lchami, yiriklari 3 mkm, maydalari 2 mkm.

9.1 jadval Plastinka sirtining tozalik sinfi

Mikrokukun	Buzulgan 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'ogra plastinka sirti mikrokukun qoldiqlari va texnikdog'lardan tozalanadi.

Buning uchun eritkichlarda va kislotalarda kimyoviy tozalanadi. Ikkinci usul fizikaviy tozalash usuli, unda kremniy molekulalari bilan bog'langan kirishma molekulalariga qizdirish yoki ionli bombardirovka yordamida katta energiya berib, uchirib yuboriladi. Ultra tovushli uskuna yordamida kukun qoldiqlari uchxloretilen, toluol, to'rtxlorli uglerod eritgichlardan foydalanib tozalanadi.

Organik moddalarning molekulalaridan tozalash uchun sulfat kislota ( $H_2SO_4$ ) da qaynatiladi.

Metall atomlaridan tozalashga  $HSI$  va  $HNO_3$  da qaynatiladi, HF da yuviladi. Hamma vaqt eng oxirida ionlardan tozalangan (deionli) suvda yuviladi. Plastinka sirtining tozaligini tekshirish usullaridan biri sayqallangan sirtni 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'rindi.

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

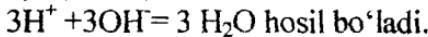
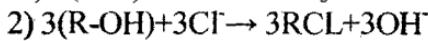
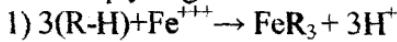
Plastinkani tozalash jarayonida har xil suvlar ishlataladi:

distillangan suv  $\rho = 200$  kOm sm vodoprovod suvini bug'latib va qayta sovitib olinadi.

bidistillangan suv  $\rho = 500$  kOm sm . Distillangan suvni bug'latib qayta sovitib olinadi.

Ionlardan tozalangan (deionli) suv  $\rho = 20$  mOm sm. Distillangan suvni ion almashuvchi smolalardan o'tkazish orqali olinadi. Bu smolalar 2xil bo'lib 1- kationlar (metal ionlarni yutadi) 2-anionlar (kislota qoldiqlari ionlarini yutadi). Kationlar ximyaviy formulasi : R-H ; anionlarniki: R-OH

Misol:  $FeSi_3$  dan tozalash quyidagicha bo'ladi:



(1) dagi  $Fe^{+++}$  ioni R bilan bog'lanib qoladi va  $N^+$  ioni hosil bo'ladi.

(2) dagi  $\text{Cl}^-$  ioni R bilan bog'lanib qoladi va  $\text{ON}^-$  ioni hosil bo'ladi.  
 $\text{H}^+$  va  $\text{OH}^-$  ionlari bog'lanib suv hosil 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 obraziv material yordamida ishlov berilayotgan material sirtidan birlik vaqtida qirib olingan miqdori bilan baxolanadi. Agar olmosning obrazivlik qobiliyati birga teng deb olinsa, u xolda bor karbidiniki-0,6; kremniy karbidiniki-0,5; monoqorundniki-0,25; elektroqorundniki-0,15 ga teng bo'ladi.

Yarim o'tkazgichli asboblar va IS larni ishlab chiqarishda quyidagi obraziv materiallar ishlataladi: Olmos - sanoatda grafitdan yuqori bosim va harorat hosil qilingan su'niy olmos ishlataladi.

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 rangachan bo'ladi. Qora rangligi qattiqligi kam bo'ladi.

Karbid bor - borning uglerod bilan kimyoviy birikmasi.

Elektroqorund- kristalli alyuminiy Oksidi.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oq modda. Sanoatda uch xil elekrokorund ishlab chiqariladi: Oq - 98,5 — 99,5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bor;

normal elektrokorund - 91- 96 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bor;

qora elektrokorund 65-75 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bor.

Xrom Oksidi - yashil rangli kukun (poroshok).

Aerosil - g'ovak ko'kimtir - oq kukun, toza kremniy ikki Oksidi.

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.

### Yarim o'tkazgichli plastinkalardan kristall qirqish

Yarim o'tkazgichli plastinkalardan qirqish usullari:

- Olmosli disk yordamida qirqish;

- metall simlari bilan obraziv material yordamida qirqish;
- ultratovush qurilmasida qirqish;
- olmos bilan chizib, so'ogra sindirish;
- elektron - nur dastasi bilan chizib, so'ogra sindirish;
- lazer nurida chizib, so'ogra sindirish.

Olmosli 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 mm. dan oshmaydi.

Sim yordamida obraziv material bilan qirqish usulini plastinkadan kvadrat va to'rtburchak shaklidagi kristallar qirqish uchun qo'llaniladi. Bu usul ikki xil ko'rinishga ega. Birinchi xolda sim maxsus vilkaga o'matilgan 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 yedirilshi uchun, Kesuvchi modda ishchi yuzaga uzlusiz yuborib turiladigan obraziv kukunning suv bilan qorishmasidir. Sim esa obraziv 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 afzallikkarga ega.** Qirqilayotgan plastinka kichik tezlik bilan simga yaqinlashtirsa, uning sirtida buzilishlar kam sodir bo'ladi, bu esa Au, Al, Ni, Cu va boshqa moddalarning qatlami bo'lgan plastinkani qirqishda yupqa qatlam ko'chib ketmaydi. Simni almashtirish ko'p vaqt talab qilmaydi. Bu usul bilan qirqilgan kristallarning eng kichik o'lchami  $0,5 \times 0,5$  mmni tashkil etadi.

**Yarim o'tkazgichli 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 generatordan 15- 70 kGts chastotali tok tebragichning elektr simiga beriladi. O'zgartirgich bu tokni mexanik tebranishga aylantiradi. Bu tebranish qirquvchi moslamaga uzatiladi. Qirquvchi moslama plastinka sirtiga tegib turgan sohaga uzlusiz obraziv qorishma berib turiladi. Abraziv zarralari ultratovush tebranishi ta'sirida harakatga kelib plastinkaning qirkuvchi moslama tegib turgan qismini qirqadi. Qirquvchi uskuna shakli qirqiladigan kristall shakliga o'xshash bo'ladi.

**Olmos bilan chizib sindirish** usuli plastinkadan kvadrat va to'rburchak shaklidagi kristallarni qirqishda ishlataladi. Yarim o'tkazgichli 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 sohalarda issiqlik ta'sirida mexanik kuchlanishlar yuzaga keladi. Plastinka egilsa shu sohalarda 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 sohalarda 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 qatlama 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 foquslangan 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, xatto yaxshi chizilgan plastinkalardan ham juda ko'p yaroqsiz kristall chiqishiga sabab bo'lib, kristalning qirralarini notejis, 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 uch usullarini ko'ramiz:

Birinchi usulda plastinkani yumshoq taglikka (rezina, parolon va boshqalar) chiziqni pastga qaratib qo'yiladi va plastinka ustidan rezinali valikni ikki o'zaro perpendikulyar yo'nalishda yurgiziladi. Valik o'q chiziqlari katta aniqlikda parallel bo'lishi kerak, aks xolda 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 kiristallar siljib ketmasligi uchun avval plastinka qog'ozga yoki polietilen qatlamiga kleyylanadi.

Ikkinci usul mexanizatsiyalashtirilgan usuldir. Plastinkani kleylagandan so'ng ma'lum egrilik radiusiga ega bo'lgan harakatlanayotgan ikkita lenta orasidan o'tkaziladi. Plastinka lentaning egirilgan qismidan o'tayotganda chizilgan joylardan bo'laklarga bo'linadi.

Uchinchi usulda chizilgan plastinka sferik sirtga ega bo'lgan linza sirtiga jipslashiriladi. Natijada plastinka bir vaqtda ikki yo'nalishda sinadi. Qurilma sferik linza va rezinalimembranadan iborat bo'ladi. Plastinka chiziqlarinipastga 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, unumdarligidir. Bu usul bilan plastinkani faqat kvadrat shakldagi

kristallarga bo'laklash mumkin. Har xil o'chamdagagi kvadrat kristallar uchun aloxida har xil egrilik radiusidagi sferik linzalar ishlataladi.

Sindirish sifati uchchala usulda ham egish kuchlanishiga bog'liq. Sindirish uchun zarur bo'lgan egish kuchlanishi quyidagi ifoda bilan aniqlanishi mumkin.

$$H = \frac{mh^2}{bl^2} = \frac{m}{b} \left[ \frac{h}{l} \right]^2 \quad (9.1) \text{ bunda } m - \text{egilish momenti}$$

h-chizilganda hosil bo'lgan chuqurligi

b- Kristall uzunligi l- Kristall qalinligi  $\left[ \frac{h}{l} \right]$  - sinish imkoniyati kattaligi deyiladi.

#### 9.4 Yarim o'tkazgichli plastinkani jilvirlash

Yarim o'tkazgichli slitkadan qirqib olingan plastinkada bir qancha quyidagi nuqsonlar mavjud bo'ladi:

- mexanik buzilgan qatlam;
- tomonlari tekis va parallel emasligi;
- eksi va qalinligi turli nuqtalarda har xil bo'ishi;

Bu nuqsonlarni yo'qotish uchun plastinkalar jilvirlanadi. Bunda yaxshi natijaga erishish uchun jilvirlashga quyidagi talablar qo'yiladi:

- jilvirlashni toza, changisiz xonadaamalga oshirish kerak;
- jilvirlovchi qurilmalar har xil abraziv materiallar uchun aloxida bo'lishi kerak;
- barcha abraziv materiallar aloxida germetik skafandrlarda saqlanishi kerak.

Jilvirlashda qo'llaniladigan disklar chuyan, shisha, po'lat, mis yoki latundan tayyorlangan bo'ladi.

Jilvirlash uchun ishlatalatidagan mikrokukunning o'chhami M14 dan M5 gacha bo'ladi. Jilvirlash yordamida 9-12 sinf tozalikka erishish mumkin. Jilvirlash jaryonini texnologik, kontsuktiv va abraziv material turiga qarab sinflanadi:

- texnologiyasiga qarab: oraliq va yakuniy jilvirlash;
- kontsuktiv 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 holatlari jilvirllovchi diskning aylanish tezligi va bosimi kattaroq bo'ladi. Abraziv mikrokukunning zarralari kattarog'idan (M14, M10) foydalaniлади. Yakuniy jilvirlash - jilvirlash diskining aylanish tezligi va bosimi kichikroq bo'ladi, mikrokukunning zarralari maydasidan (M7, M5) foydalaniлади. Maqsad - plastinkaning geometrik parametrlarini yaxshilash va sirtini tekislik sifatini oshirish.

Bir tomonini jilvirlash - plastinkaning bir tomoni maxsus moslamaga yopishtiriladi. Ikkinci tomoni jilvirllovchi disk bilan mikrokukun qorishmasi yordamida jilvirlanadi.

Ikki tomoni jilvirlash - ikkita jilvirllovchi diskka ega bo'lgan qurilmada amalga oshiriladi. Separatorga yarim o'tkazgichli plastinka joylashtirilib, ikkita jilvirllovchi disk o'rtasiga o'rnatiladi. Pastki jilvirllovchi disk odatda qo'zgalmas bo'ladi, yuqorisidagisi esa aylanadi. Plastinka jilvirllovchi disk aylanishi, separator aylanishlarining natijasida murakkab aylanma harakat qiladi. Abraziv qorishma yuqoridagi jilvirllovchi diskka beriladi va plastinkani hamma tomonini qoplab oladi. Jilvirlangan sirt juda ko'p chiziqlardan iborat bo'ladi. Chiziqlar chuqurligi abraziv material zarralarini o'lchamiga, jilvirllovchi disk bosimiga va jilvirlash tezligiga bog'liq bo'ladi. Jilvirlashni plastinkani bir tomonini va ikki tomonini jilvirllovchi qurilmada abraziv material qorishmasi yoki pasta yordamida amalga oshiriladi. Jilvirlash jarayonida abraziv material zarralari bir-biri bilan bog'lanmagan, erkin xolatda harakatlanadi.

Bog'langan abraziv materialida jilvirlashni sirtida olmos kukuni yopishtirilgan jilvirllovchi metall diskli qurilma yordamida amalga oshiriladi. Yarim o'tkazgichli plastinka maxsus moslamaga bir tomoni bilan yopishtiriladi va shu moslama bilan birga aylanma harakat qiladi. Jilvirllovchi 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. Jilvirllovchi disk va plastinka qizib ketmasligi uchun suv bilan sovitib turiladi. Agar jilvirllovchi disk aylanish tezligi kamaytirilsa sirt jilvirlanish sifati yomonlashadi.

## Yarim o'tkazgichli plastinkalarni sayqallash

Yarim o'tkazgichli 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 qoplanagan bo'ladi (duxoba, ipak, chit va xokazo). Abraziv material sifatida zarralar o'lchami 3 mkm.dan 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 turli material va zarralar o'lchami 1 mkm.dan kichik bo'lgan abraziv kukuni ishlatiladi.

Yumshoq sayqallagichlarning chidamliligi yuqori emas. Masalan batisli sayqallagichda 20-30 plastinkani sayqallash mumkin. Satinlisida - 50-70 ta plastinkani; zamshlida - 100 - 120 plastinkani, duxobada - 500 - 600 plastinkani. Sayqallash uch bosqichdan iborat;

-birinchi bosqich (oraliq sayqallash) abraziv qorishmasini tayyorlash va sayqallagichni tayyorlash. Shisha diskka yumshoq material (batis) qoplanadi. Abraziv zarralari bir tekis taqsimlanishi uchun, Batits sirti spirit yoki soat moyi bilan xo'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 disklarning har biri navbat bilan batits qoplanagan sayqallagichga suriladi va hamma olmos kukun batits sirtiga o'tkaziladi. Kremniy plastinkasi bir tomoni bilan maxsus moslamaga yopishtiriladi va sayqallovchi qurilmaga o'rnatiladi. Sayqallash jarayonida qizish kuchli bo'imasligi uchun sayqallagichning aylanish tezligi 30 - 40 ayl/min ortmasligi kerak. (qiziganda plastinka ko'chib ketishi va mexanik ta'sirlanishi mumkin).

- Ikkinci bochqich (oraliq sayqallash), sayqallagich materialining almashadirish va ASM1 olmos kukunidan foydalanish. Buning uchun shisha diskka boshqa yumshoq material (duxoba) qoplanadi, issiq suv yoki spirit 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 etiriladi. Ikkinci bosqichda sayqallagichning plastinkaga bosimi ko'paytiriladi, aylanish tezligi 25-30 ayl/ min gacha kamaytililadi.

- Uchinchi bosqich (yakuniy nozik sayqallash)da sayqallagich va abraziv material almashtiriladi. Sayqallagich materiali sifatida yangi batis 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. Kremniy ikki oksidi kukuni zarralarini o'lchami 0,1 mkmdan kam bo'ladi. Kremniy ikki oksidi kukuning 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 bosqichdag'i olmos zarralari sirdan ketkaziladi va mexanik buzilgan qatlama qalinligi keskin kamayadi va plastinkaning tozalik darajasi 13 - 14 sinfga to'g'ri keladi.

"V" markali ionlardan tozalangan suv tabiiy vodoprovod suvini distillyatsiya qilinib, so'ogra ionlardan tozalab olinadi. Solishtirma qarshiligi  $T=20^{\circ}\text{C}$  da  $1\text{MOm} \cdot \text{sm}$  bo'ladi.

"B" markali ionlardan tozalangan suvni "V" markali deionlashgan suvdan qayta deionlashtirilib, so'ogra g'ovakliklari o'lchami d 10 mkm bo'lgan inert filtrlovchi materialdan o'tkazib erimagan zarralardan tozalab olinadi. Solishtirma qarshiligi  $10\text{ MOm} \cdot \text{sm}$  ni tashkil etadi.

A" markali ionlardan tozalangan suvni "B" markali deionlashgan suvdan g'ovaklar o'lchami d 0,5 mkm bo'lgan maxsus filtrlovchi materiallarda filtrlanib olinadi. Solishtirma qarshiligi  $20\text{ MOm sm}$  ga teng bo'ladi.

## **Yarim o'tkazgichli plastinka sirtiga kimyoviy ishlov berish**

Sirdagi kirlar miqdori (kontsentratsiyasi) yarim o'tkazgichli asboblar va IS larning 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 (toza azot gazida);
- ionlar va elektronlar oqimi bilan bombardirovka qilish;

- plazma muhitida ionlar bilan ishlov berish;

- vakuumda yoki inert muhitda yuqori haroratda qizdirish.

**Kimyoviy tozalash usullari:**

- iflosliklarni eritib yuborish;
- kirlangan plastinkaning yupqa sirt qatlami eritib ketkazish.

## **Plastinka sirtidagi fizikaviy kirlar.**

Fizikaviy adsorbsiyalangan fizikaviy kirlar quyidagilar:

- Organik bo'lmagan kirlar: turli chang zarralari, obraziv materiallarning zarralari.
- Organik kirlar yog' qatlamlari, ion almashuvchi smolalar qoldiqlari, fotorezits zarralari, o'lchami 1-20 mkm oralig'ida bo'lgan mikro organizmlar va hokazolar.

Yarim o'tkazgichli material sirtiga kirlarning fizikaviy adsorbsiyasi molekulalar orasida Van-der -Vaals kuchlari yuzaga kelishi tufayli hamda elektrostatik qutblanish (zaryadlangan zarralarning Kulon kuchi bilan ta'sirlanishi) sababli bo'lib, qaytuvchi jarayonlardir.

Organik bo'lmagan kirlarni gidromexanik yo'l bilan yoki toza azot gaz oqimini purkash orqali tozalanadi.

Organik kirlar kremniy plastinkasiga termik ishlov berilganda uglerod atomini hosil qilib parchalanadi.

Organik kirlar qutbli va qutbsizga bo'linadi:

Qutbli organik kirlar: moylar, oqsillar, sirtdag'i faol moddalarni qoldiqlari. Bu moddalarning molekulalari sirt bo'yicha yo'nalgan bo'lib va o'zaro tortilib, kirlar yuzasining qisqarishiga olib keladi.

Qutbsiz organik kirlar: mineral yog'lar, parafinlar, vazelinlar. Bu moddalarning molekulalari sirt energiyasi katta bo'lib, katta yuzalarni qoplab oladi.

Suvda erimaydigan organik moy kirlar plastinka sirtini gidrofob holatga keltiradi, Ya'ni suv bilan ho'llanmaydi. Sirtni bir tekis tozalash uchun hidrofil xolatga keltirish kerak. Moy kirlardan tozalash orqali sirtni hidrofob holatdan hidrofil holatga o'tkazish yog'sizlantirish deyiladi.

Organik kirlar organik eritgichlarda yoki ularning bug'ida yuvib tozalanadi. Avval qutbsiz yoki kuchsiz qutbli eritgichlarda (benzol, toluol, to'rt xlorli uglerod, ayrim freonlarda) qutbsiz kirlar yuviladi, so'ngra spirt, atseton, uchxlor etilenda qutbli kirlar tozalanadi.

### **Plastinka sirtidagi kimyoviy kirlar.**

Kimyoviy kirlar yarim o'tkazgichli material sirtida kimyoviy adsorbsiya (xemosorbsiya) kuchlari bilan bog'langan bo'ladi. Xemosorbsiyada adsorbsiyalangan modda atomlari bilan yarim o'tkazgichli 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 yemiriluvchi eritmardan, sayqallovchi qorishma (suspenziya) lardan, qirquvchi, jilvirlovchi va sayqallovchi diskzlarning metall asoslaridan o'tadi.

**Atomli kirlar** kimyoviy refaollar tarkibida mavjud bo'lgan Au, Ag, Su, Fe atomlarining plastinka sirtiga mikromurtak shaklida o'tirishi yoki butun sirtni qoplashi, hatto mikroskopik qatlamlar hosil qilishidir.

Kimyoviy kirlarni kuchli oksidlovchi aralashmalarda, kompleks hosil qiluvchi eritmarda, sirtdagisi faol moddalarda, kislotalarda ketkaziladi.

Tozalashda birinchi navbatda organik kirlar va sirt bilankimyoviy bog'langan qatlamlar ketkaziladi, so'ngra-ionli va atomli kirlar ketkaziladi.

Turli kirlarning asosiy manbalari:

- Yarim o'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'limgan reagentlar;

- yuvishda ishlataladigan suv;
- kirlarning sezilarli manbai texnoog kiyimi, tanasi,kosmetikasi, bakteriyalar, viruslar, qo'llardagi moy qoldiqlari.

Tozalashda qo'llaniladigan usullar va moddalar tozalanuvchi yarim o'tkazgich materialiga nisbatan inert, yong'indan xavfsiz va zaharliligi kam bo'lishi kerak. Yarim o'tkazgichli plastinkalarni ifloslantirmasligi uchun kimyoviy refaollar, gazlar va suv yuqori darajada tozallikka ega bo'lishi kerak. Tozalashda ishlataladigan qurilmalar" cheksiz kamaytirilib 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 vaqtida teskari jarayon- tozalangan plastinka sirtiga moy molekulalari adsorbsiyasi ham bo'ladi,bu jarayonni kamaytirish uchun ketma-ket vannalarda yuvish usulidan foydalaniadi.

Kirlarni organik eritmalarda eritib tozalash juda samarador,lekin ko'p marta toza eritgichga solinishi tufayli organik eritgich isrofgarchiligi ko'p bo'ladi. Ayrim organik eritgichlar zaharli va yonish xavfi yuqori bo'ladi.

Yarim o'tkazgichli plastinkalarni organik eritgichlar bug'ida 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 spirit,freon -113, xlorlangan uglevodorod bug'larida bajariladi.Bulardan eng qulayi freon - 113: bo'lib, yonmasligi,zaharli bo'lmagan suyuqligi va qaynash harorati 47,6 °C, zichligi 1,57 g/sm<sup>2</sup> ni tashkil etadi. Eritgichlar bug'ida sovun, erigan moylar, tarkibida suv bo'lgan birikmalar yaxshi tozalanmaydi. Bu usul kamchiligi: bug'lanish hisobiga organik eritgichning ko'p isrof bo'lishi va qurilma yuqori darajada germetik - berk bo'lishiligi talab etilishidir.

**Kimyoviy yog'sizlantirishni** moy molekulalarini parchalovchi, lekin tozalanayotgan materialga ta'sir qilmaydigan aralashmalarda amalgaga oshiriladi. Shuning uchun aralashmada moy molekulalari yuk va tozalanayotgan sirtdan ularning desorbsiyasi bo'lmaydi.

Kimyoviy yog'sizlantirish uchun qaynoq ( $75 - 80^{\circ}\text{C}$ ) pereks ammiakli eritgichdan foydalaniladi. Bu eritgich pereks vodorod ( $\text{N}_2\text{O}_2$ ) va ammoniy gidrooksidi ( $\text{NN}_4\text{ON}$ ) ning suvdagi aralashmasidan iborat bo'ladi.



Eritgich qizdirilganda  $\text{N}_2\text{O}_2$ dan ajralib chiqqan atomlar kislород organik va organik bo'lmagan kirlarni oksidlaydi. Ammoniy gidrooksidi ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) pereks vodorod  $\text{H}_2\text{O}_2$  ning parchalanish reaksiyasini tezlashtiradi, moylarni sirtdan 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.

Sirtni metallarning atom va ionlaridan, oksid qatlamlari qoldiqlaridan, sulfidlaridan, 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.

### **Kremniyi yemirish**

Kremniy plastinkasini yemirish qattiq va suyuq muhit chegarasida amalga oshadi va 5 ta bosqichdan iborat bo'ladi:

- kimyoviy reagentning plastinka yuzasiga diffuziyalanib kelishi.
- reagentning adsorbsiyalanishi.
- kimyoviy reaksiyaga kirishish.
- reaksiya mahsulotlarining desorbsiyalanishi (tashqariga chiqarilishi).
- reaksiya maxsulotlarining plastinka yuzidan diffuziyalanib uzoqlashishi.

## **9.6 Yemirilish tezligi**

Fik qonuniga asosan Yemirilish tezligi kimyoviy reagentning plastinka sirtiga tomon diffuziyalanish tezligi:  $\delta$  - kimyoviy reagentning

kontsentratsiya gradiyenti mavjud bo'lgan eritgich sirtki qatlam qalinligi.

$$Fv_g = D \frac{(N_{\text{hajm}} - N_{\text{sirt}})}{\delta} \text{tezligi:}$$

$$v_g = D \frac{(N_{\text{hajm}} - N_{\text{sirt}})}{\delta} \quad v_p \Leftrightarrow (N_A)^a (N_B)^b \cdot \exp(-\frac{\Delta W}{RT}) \quad (9.2)$$

$N_A$ -  $N_B$ - o'zaro reaksiyaga kirishuvchi moddalar miqdori

$\Delta W$ -kimyoviy reaksiyaning amalga oshishi uchun zarur energiya

R- universal gaz doimiysi

a, b – kimyoviy reaksiya formulasida elementlar oldiga qo'yiladigan koeffisiyentlar

Faolatsiya energiyasi - bu molekulalarning o'rtacha energiyasiga nisbatan ortiqcha energiya bo'lib, molekulalar to'qnashganda shu energiya hisobiga kimyoviy reaksiyaga kirishadi.

Suyuqliklarda diffuziya tezligini belgilovchi faolatsiya energiyasi:

$$\Delta W_{\text{dif.}} = (1 - 4) \text{ kkal/mol ga teng bo'ladi.}$$

Har xil emirgichlardagi kimyoviy reaksiyani belgilovchi faolatsiya energiyasi esa  $\Delta W = (10 - 100) \text{ kkal/mol bo'lishi mumkin.}$

Agar  $\Delta W > \Delta W_{\text{dif.}}$  bo'lsa kimyoviy reaksiya ketadi.

Agar  $\Delta W < \Delta W_{\text{dif.}}$  bo'lsa diffuziya jarayoni sodir bo'ladi.

Shlipovka qilingan (jilvirlangan) sirt sayqallangan (polirovka qilingan) sirtga nisbatan kichik faolatsiya energiyasiga ega.

Faolatsiya energiyasini sirt notekisliklari, nuqsonlari va atomlarning joylashish zichligiga bo'g'liq bo'lib, ularning oshishi bilan kamayib boradi.

Har xil kristall yo'nalishlarida  $\Delta W$  har xil bo'lgani uchun yemirilish tezligi kristall yo'nalishiga bog'liq bo'ladi.

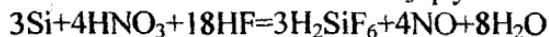
Bunday yemirgichlar selektiv yemirgichlar deyiladi va kristall strukturasini o'rganishda, sirt va hajmidagi nuqsonlarni tekshirishda ishlataladi. ( $\Delta W > \Delta W_{\text{dif.}}$ -kimyoviy reaksiya tezligi boshqariladi), haroratga kuchli bog'liq bo'ladi.

$\Delta W < \Delta W_{\text{dif.}}$  – sayqallovchi yemirish, sirt notekisliklariiga va nuqsonlarga bog'liq emas, haroratga kuchsiz bog'liq bo'ladi. Asosan diffuziya tezligiga ta'sir qiluvchi faktorlarga, masalan aralashtirib

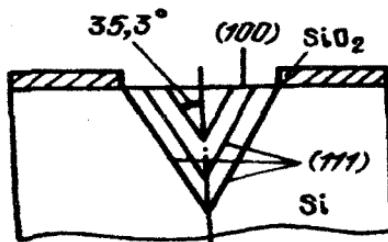
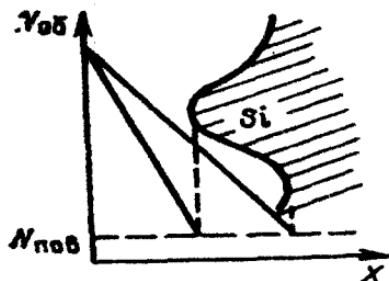
turishga, yemirgich yopishqoqligiga bog'liq. (Bunday yemirgichlarda diffuziya tezligi boshqarilib turiladi) bo'ladi.

Kremniy uchun sayqallovchi yemirgich HF va  $\text{HNO}_3$  aralashmasidir. Yemirilish kremniy erishingin elektro kimyoviy nazariyasini 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  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  hosil bo'ladi. Katodli sohalarda esa  $\text{HNO}_3$  qayta hosil bo'ladi:



Kremniyning HF va  $\text{HNO}_3$  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  $(\text{NH}_2)_2\text{H}_2\text{O}$  misol qilish mumkin. Bu yemirgichlar uchun faollashish energiyasi: suvdagi 10 % li eritmasi uchun 13 kkal/mol NaOH ni 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 IShlarni tayyorlashda izolyatsiyalangan sohalar hosil qilishda ishlataladi.

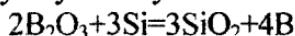
## Kremniyga kirishma kiritish.

Diffuziya usuli: diffuziya usulidan birinchi marta p-n-o'tish hosil qilishda foydalanilgan bo'lib, xozirgi davrga qadar bu usul nazariy va amaliy tomondan takomillashtirilib kelinmoqda. Bundan maqsad, diffuziya usuli bilan olingen qatlamlarning asosiy parametrlari - sirtqi qatlamdagagi kirishma miqdori va hosil qilingan qatlamning qalinligini - yuqori aniqlikda boshqarish imkoniyatlarini kengaytirish, texnologik jarayonlarning tan narxini pasaytirish.

Planar texnologiyasida ko'p qo'llaniladigan diffuziya usullaridan biri-tashuvchi gaz oqimida diffuziya qilish usullari. Bu xolda 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  $(400-1100) \pm 2^{\circ}\text{C}$  oraliqda boshqariladi.

Yuqori haroratda diffuzant bug'lanib, uning molekulalarini tashuvchi gaz (inert gazlar N<sub>2</sub>,Ar,) oqimi diffuziya sohasiga olib keladi.Qattiq diffuzant sifatida akseptorli kirishma uchun B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, donorli kirishma uchun P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> oksidlar ishlatiladi. Diffuziya sohasida quyidagi kimyoiy reaksiya sodir bo'ladi:



natijada elementar B yoki P va SiO<sub>2</sub> hosil bo'ladi. Reaksiya maxsulotlari: SiO<sub>2</sub> bilan B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yoki P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 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'yinganligiga
- tashuvchi-gaz tarkibiga
- tashuvchi-gaz oqish tezligiga  
bog'liq bo'ladi.

Bor angidridi B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> -700°C va fosfor angidridi P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> -200°C da intensiv bug'lana boshlaydi.

Tashuvchi-gaz tezligi odatda  $\sim 1500 \text{ sm}^3/\text{min}$ . bo'ladi.

Sirtqi qatlamdagagi 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'ları miqdorini, ya'ni bu moddalarini diffuziya uskunasiga joylashtirishdan oldin suv bug'laridan butunlay tozalashning iloji yo'q. Diffuzantlarda avvaldan suv bug'i mavjudligi esa 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 xolda diffuziya qurilmasi yagona yuqori haroratlari sohaga ega bo'ladi, suyuq diffuzantni bug'lantirish uchun  $(20-40)^{\circ}C$  harorat etarli bo'ladi. Eng ko'p ishlatalidigan galogen birikmalarini:

- uchxlorli fosfor  $PCl_3$
- xlorli fosforoksiidi  $POCl_3$
- uchbromli bor  $BBr_3$

kvars trubaga uch xil gaz oqimi yuboriladi:

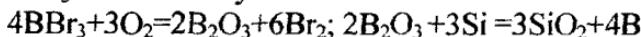
1)  $N_2$  yoki Ar dan iborat asosiy gaz oqimi: tezligi  $1000 \text{ sm}^3/\text{min}$ .

2) Shu gazning kuchsiz oqimi (tezligi  $10 \text{ sm}^3/\text{min}$ ) suyuq diffuzant orqali

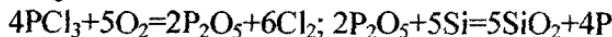
3) Kuchsiz ( $\sim 15 \text{ sm}^3/\text{min}$ ) kislород oqimi.

Suyuq diffuzant ishlataliganda tashuvchi-gaz tarkibidagi kislород kirishma oksidini hosil qilishi uchun kerak.

$BBr_3$  uchun reaksiya:



$PCl_3$  uchun:



$POCl_3$  diffuziya jarayonida parchalanadi va  $P_4O_{10}$ ,  $PSi_3$ ,  $Cl_2$  hosil bo'ladi. Bunda( $PCl_3 + O_2$ )- yuqoridagi reaksiyadan tashqari quyidagicha reaksiya bo'lishi mumkin:



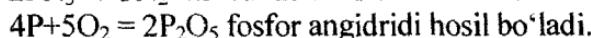
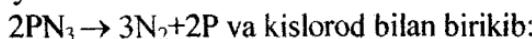
Bu reaksiyalarda Si sirtini yemirishi mumkin bo'lgan erkin xlor hosil bo'ladi. Agar  $O_2$  ko'p bo'lsa plastinka sirtida himoyalovchi  $SiO_2$  qatlam hosil bo'ladi.

Suyuq diffuzantlardan foydalanishning kamchiligi: diffuzantlar ham, kimyoiy reaksiya mahsulotlari ham zaharli moddalar hisoblanadi.

Gaz holatdagagi diffuzantlar-kirishma gidridlari (N bilan birikmalar), masalan  $PN_3$ -fosfin,  $B_2N_6$ -di boran,  $AsH_3$ -arsin.

Fosfin diffuzantidan foydalanilganda tashuvchi-gaz sifatida  $\text{PN}_3$ ,  $\text{Ar}$  va  $\text{O}_2$  aralashmasi ishlataladi.

Diffuziya kamerasida  $T \geq 440^\circ\text{C}$  haroratda fosfin ( $\text{PN}_3$ ) parchalanadi:



Kremniy sirtida:



Bu usulning afzalligi plastinka sirtida hosil bo'ladigan kirishma atomlarining miqdorini, inert gaz tarkibidagi gidrid miqdorini o'zgartirib, aniq boshqarish imkonini mayjudligidadir.

Kamchiligi- gaz holatdagi diffuzantlarning zaharlilikidir.

### Ionlarni kiritish yo'li bilan legirlash.

Ionli legirlash diffuziya usuliga nisbatan bir qator qulayliklarga ega bo'lgani uchun IS lar tayyorlash texnologik jarayonida keng qo'llaniladi.

Masalan:

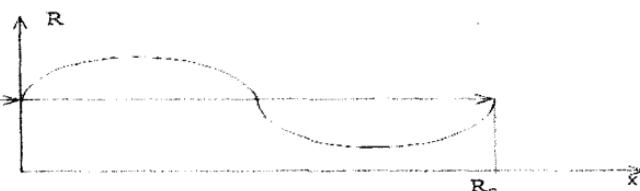
- kremniy plastinkalariga past haroratda kirishma kiritish.

- kirishma atomlari taqsimoti ionlar energiyasi bilan boshqariladi.

-kirishma atomlari miqdori birlik yuzaga tushayotgan ionlar soni bilan boshqariladi va cheklanmagan miqdorda kiritish mumkin

Ionli legirlashda kirishma atomlarining kirish masofasi kichik bo'lgani uchun ( $V$  va  $R$  uchun  $0,2+0,4$  mkm) diffuziya usuli bilan birgalikda olib boriladi.

Kremniy plastinkasi ionlar bilan bombardimon qilinganda ionlar Si atomining yadrosi va elektronlari bilan to'qnashish 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 masofasini proyeksiyasi  $R_p$ - yugurish yo'lini 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 sochilish juda kam bo‘ladigan ionlar oqimiga bo‘linadi. Tartibsiz sochilish bo‘lganda ionlarning kristalldagi taqsimoti Gauss funksiyasi bilan ifodalanadi:

$$N(x) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-R_p}{\Delta R_p}\right)^2\right] \pm N_0$$

Q- ionlarning plastinka sirtidagi nurlanish miqdoriningzichligi (dozasi) bilan aniqlanadi:  $D=elQ$

Bu erda: l- ion zayardini ko‘rsatuvchi butun son bo‘lsa, e- elektron zaryadi hisoblanadi.

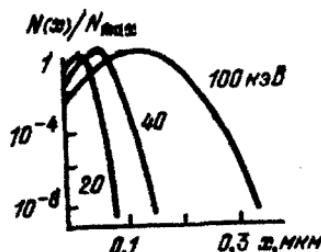
$R_p$  – o‘rtacha yugurish masofasining dastlabki yo‘nalish bo‘yicha proyeksiyasi.

$\Delta R_p$ - o‘rtacha kvadratik chetlashish.

$N_0$  - kiritilayotgan kirishmaning plastinkadagi boshlang‘ich miqdori.

Plastinkaga kiritilgan kirishmani eng katta miqdori  $N_{max}$  ga nisbatan kristall ichiga tomon kirishma taqsimoti  $N(x)/N_{max}$

$$N_{max} = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} = \frac{D}{\sqrt{2\pi}el\Delta R_p} \quad (9.3)$$



9.4-rasm Ioni legirlashda kristall ichida kirishma taqsimoti

$N_{max}$  - sirdagi kirishma miqdoriga to‘g‘ri kelmaydi (diffuzion usuldagidan farqli) va kristall ichida maksimumga erishadi. Ionlar energiyasi ortishi bilan  $N_{max}$  joylashgan nuqta yarim o‘tkazgich ichiga siljib va mos ravishda sirdagi kirishma 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 tashuvchilarini hosil qilmaydi. Shuning uchun kiritilgan ionlarning foydali qismini aniqlovchi koefisiyent (akseptorli kirishma kiritilganda) quyidagiga teng bo'ladi:

$$k_f = \frac{P_p + N_d}{N_a} \quad (9.4)$$

$P_p$  - ionlar kiritib elektr o'tkazuvchanligi o'zgargan sohadagi o'rtacha kovaklar miqdori.

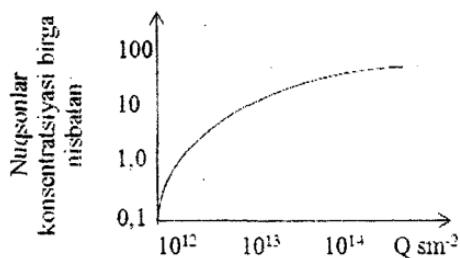
$N_d$  - kristaldagi dastlabki donor kirishma atomlarining miqdori.

$N_a$  - kiritilgan akseptor ionlarining miqdori.

Kiritilgan ionlarning hammasi faol holatda bo'lsa  $k_F = 1$  bo'ladi, ya'ni  $N_a = P_p + N_d$  elektroneytrallik 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 tashuvchilarining harakatchanligi kamayadi. Bu nuqsonlar rekombinatsiyalovchi energetik sathlar hosil qilib, tok tashuvchilarining yashash vaqtini kamayib ketishiga sabab bo'ladi.

Ionlar oqimining miqdori (dozasi)  $\text{atom/sm}^2$  ortishi bilan nuqsonlar chiziqli ortib boradi.

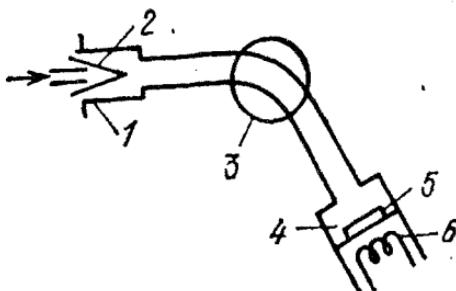


9.5 rasm. Nuqsonlar konentratsiyasining birlik yuzaga tushayotgan ionlar miqdori ( $Q$ ) ga bog'liqligi

Katta dozalarda to'yinish kuzatiladi, bunda ayrim nuqtaviy nuqsonlar qo'shilib, tartibsiz amorf qatlamlari hosil bo'ladi (kristal strukturaga ega bo'lмаган). Bu nuqsonlarning miqdorini kamaytirish maqsadida implantatsiyadan so'ng plastinkalarni qizdirilib haroratlari

ishlov beriladi. Qizdirish  $T = 400 - 700$  °C oralig‘ida  $k_f$  - koeffisiyent birga intiladi. Implantatsiya dozasi qancha katta bo‘lsa  $k_f=1$  bo‘lishi uchun shuncha yuqori haroratda qizdirish kerak.

## 9.7 Implantatsiyaning amaliy uslublari.



**9.6 rasm.** Ionli legirlash qurilmasi 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 gazini ionlashtiriladi. Bu modda qattiq yoki gaz holatda bo‘lishi mumkin. Masalan: fosfor ioni hosil qilish uchun  $P_2O_5$  - fosfor angidridi - (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:

$$r = \frac{1}{H} \cdot \left( \frac{2 MU}{e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9.5)$$

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. ISlarni tayyorlashda legirlash nuqtaviy bo'lishi kerak, buning uchun esa plastinka yuziga maska sifatida ionlar kam yutiadigan materiallar  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (dielektriklar) va Al, Ni, Au metal qatlamlari ishlataladi. Ionlar oqimining yuzasi  $4-5 \text{ sm}^2$ , ionlar energiyasi 200 keV bo'lganda  $\text{SiO}_2$  maska qalinligi bor ionlari uchun  $\sim 1 \text{ mkm}$  bo'lishi kerak. Energiyani 100 keV gacha kamaytirganda maska qalinligi 0,65 mkm bo'lsa yetarli bo'ladi. Xuddi shu energiyalar uchun mishyak ionlarida maska qalinligi 0,2 va 0,12 mkmni tashkil etadi. Maskalar Al bo'lsa 100 keV energiyali bor ioni uchun 0,4 mkm qalinlik yetarli. Maskalar sifatida Al ishlatalganda 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. Maskalar sifatida  $\text{SiO}_2$  ishlatsa  $800-900^\circ\text{C}$  gacha qizdirish mumkin, kirishma taqsimotini deyarli o'zgartirmaslik mumkin bo'ladi. Ionli legirlashda yon tomonlarga kirishma tarqalishi bo'lmagan uchun bipolyar IS tayyorlashda kichik yuza o'lchamli emitter sohasini hosil qilish mumkin. Ionli legirlashda qizdirish haroratlari kichik bo'lgani uchun n-p-n va p-n-p tranzistorlar asosida IS larni 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 tozaligining miqdorining katta aniqlikda boshqarilishi sababli bipolyar IS larning strukturasi va elektrofizik parametrlarini bir xilligini ta'minlaydi.

### **Implantatsiya qilingan qatlamlarning elektrofizik xossaiarini o'rGANISH USULLARI.**

Implantatsiya qilingan qatlamning asosiy parametrlari:

- qatlam qarshiligi;
- p-n-o'tish chuqurligi;
- qatlam sirtidagi kirishma miqdori.

Qatlam solishtirma qarshiligi to'rt zondli usul bilan tekshiriladi. Plastinka sirtida zondlar bitta to'g'ri chiziqda 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:

$$U = \frac{IR_s}{2\pi} \ln\left(\frac{2s}{s} - \ln\frac{s}{2s}\right) = IR_s \frac{\ln 2 - \ln 0,5}{2\pi} = IR_s \frac{1}{4,5324} \quad (9.6)$$

$$R_s = 4,5324 \cdot U/I$$

$R_s$ -qatlam qarshiligi,  $[Om/sm^2]$  – birlik yuzadagi qatlam qarshiligi o'chov birligi.

p- n-o'tish chuqurligini aniqlash usullaridan biri plastinkani ma'lum bir burchak ostida shlipovka qilib, shlipovka qilingan 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 elektro kimyoviy potensiali har xil bo'ladi. Kimyoviy rang berish usuli yordamida  $n^+ - n$ ,  $p^+ - p$ -o'tish chuqurligini ham aniqlash mumkin.

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha} = \frac{d_0}{x} \cdot \frac{x}{d} = \frac{d_0}{d} \text{ bunda } d_0 = d \cdot \operatorname{tg}\alpha \Rightarrow 1 - 5^\circ \sin\alpha = d_0/x \cos\alpha = d/x$$

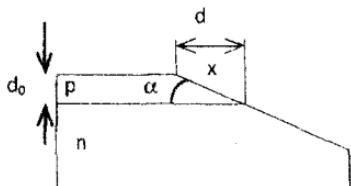
Ko'pincha kimyoviy rang berish uchun NF ga 0,1%  $HNO_3$  qo'shib tayyorlangan yemirgichdan foydalilaniladi. Bu yemirgich surilganda p-soha qorayadi, n- soha o'zgarmaydi. Agar yemirgich sifatida NF ning o'zi ishlatsa shlipovka qilingan yuza kuchli yoritiladi. Legirlangan qatlam sirt yuzidagi kirishma miqdorini aniqlash uchun to'rt zondli usul bilan sirtining solishtirma qarshiligi  $R_s$  va p-n-o'tish chuqurligi  $d_0$ -o'chanadi. Bo'lardan o'rtacha solishtirma elektr o'tkazuvchanlik topiladi:

$\sigma = 1 / R_s d_0$  buni bilgan holda sirt yuzidagi kirishma miqdorini quyidagicha hisoblanadi:

$$\sigma = \frac{1}{R_s d_0} = \frac{1}{d_0} \int_0^{d_0} c \cdot \mu(N) \cdot [N(x) - N_0] \cdot dx \quad (9.7)$$

$N(x)$  – legirlangan qatlamda kirishmalarni taqsimoti.

Ionlarni implantatsiya qilish orqali legirlangan qatlamlarda kirishma atomlarini 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.



**9.7 rasm.** Kirishma miqdorining qatlam bo'yicha taqsimoti.

## 9.8 Fotolitografiya.

Fotolitografiya (FL) ning asosi yarim o'tkazgichli plastinka sirtiga yupqa qatlam yorug'lik sezgir lak - fotorezis (FR) suriladi. FR qatlami quritilgandan so'ng plastinka ustiga fotoshablon (FSh) (plastinkaga ko'chirish kerak bo'lgan rasm hosil qilingan shisha fotoplastinka) qo'yiladi. FR surilgan yarim o'tkazgichli plastinkaning ustiga FSh qo'yib yoritilsa (binafsha, ultrabinafsha nur bilan), FR ning yorug'lik tushgan sohalari:

- negativ FR larda ochiltiruvchi (proyavitel)da erimaydigan bo'lib qoladi, yoritilmagan sohalari erib ketadi;
- pozitiv FR larda esa yoritilgan sohalari eruvchan tuzga aylanadi va ochiltiruvchida erib ketadi, yoritilmagan sohalari erimaydi.

FR qatlamida hosil bo'lgan darchalar orqali yarim o'tkazgichli plastinka yoki qatlamkimyoviy yemiriladi.

### Fotorezislar

Fotorezislar (FR) kislota va ishqorlarga chidamli, ma'lum to'lqin uzunligidagi yorug'likka sezgir moddalardir.

Yorug'lik ta'sirida eruvchanligi ortuvchi FR lar pozitiv FR lar deyiladi, aksincha yorug'lik ta'sirida erimaydigan holatga o'tuvchi FR lar negativ FR lar deyiladi.

Pozitiv FR dan foydalanylilda FSh dagi rasm yarim o'tkazgichli plastinkada xuddi shunday hosil bo'ladi.

Negativ FR dan foydalanylilda plastinkada rasmning aksi hosil bo'ladi.

Yarim o'tkazgichli IS lar texnologiyasida negativ FR sifatida polivinil sinnamat (PVS)- polivinil spirti murakkab efiri va qorishma kislotasi ishlatalidi. Bu FR yorug'likka sezgirlik sohasi ultra binafsha nurga to'g'ri keladi. U kukunsimon bo'lib oq yoki sariq randa bo'ladi. Organik eritgichlar toluol xlorbenzol, atsetat metilinglikol+metoksilol aralashmalarida eriydi.

FR qatlaming kislotaga chidamliligi HF va HNO<sub>3</sub> kislotalarida katta emas. Himoyalovchi FR qatlami qaliligi 0,5 mkm bo‘lganda kremniyda yemirish mumkin bo‘lgan chuqurlik 10 mkmdan, germaniyda 40 mkmdan oshmaydi.

Planar texnologiyada PVS markali FR ti SiO<sub>2</sub> qatlamni yemirgichdan himoya qilish uchun ishlataladi. Pozitiv FR sifatida 1,2-naftoxinandiazit (2)-5-novolak sulfo esfirining turli polimerlaridan iborat aralashma ishlataladi. Eritgich sifatida spirlar, ketonlar, aromat uglevodorodlar, dioksan ksilol ishlataladi. NXDA-naftoxinandiazit FR tining yorug‘likka sezgirligi ultra binafsha yorug‘likda PVS FR tiga nisbatan katta to‘lqin uzunligi tomonga silijydi. FR ning asosiy parametrlari:

- yorug‘likka sezgirligi: hosil qilingan shaklning aniqligi.

- ajratish qobiliyati: FR 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

FR markasi	FR turi	FR 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 FR qatlami mikrosxema topologiyasiga mos holda lokal yoritiladi.

FSh - ultra binafsha nurni yaxshi o'tkazuvchi ishchi yuzasiga mikrosxemaning ma'lum bir qatlami topologiyasiga mos keluvchi (yorug'likni o'tkazmaydigan) rasmni qatlamda hosil qilingan tekis shisha plastinka yoki egiluvchan polimer qatlamdir. FShni tayyorlash uchun optik borosilikat shishasi yoki polimer qatlami ishlatalidi.

Qatlamlili rasm hosil qilish uchun kumush-galoidli fotoemulsiyadan foydalanilsa metall FSh deyiladi va ko'rinvchi yorug'likni qisman o'tkazuvchi oksidlar yoki boshqa materiallarning qatlami foydalanilsa rangli FSh lar deyiladi.

FSh larni yarim o'tkazgich plastinkasiga tez-tez jipslashtirish natijasida u yediriladi. Emulsion FSh lar 20 ta operatsiyaga metall FSh lar esa 500 ta operatsiyaga yaraydi.

FSh tayyorlashning bir qancha usullari mayjud. Optik mexanik usul bilan FSh tayyorlash uchun oreginal rasmni 100-1000 marta kattalashtirib 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)  $50 \div 100$  marta kichraytirib fotoplastinkada rasmga olinadi. Hosil qilingan foto oreginal avtomat proyeksiyali fotoshtampga joylashtiriladi va foto originaldagagi rasm kerakli o'chamgacha kichraytirilgan holda foto shablonga tushiriladi va ko'paytriladi (multurlikatsiyalanadi). Hosil qilingan etalon FSh ning ishchi nusxasini kontaktli qayta chiqarish orqali tayyorlanadi. Etalon FSh dan 20-30 ta nusxa ishchi FSh tayyorlash mumkin.

Emulsiyali etalon FSh dan nusxa tayyorlash uchun optik shishaga xrom qatlami vakuumda uchirib hosil qilinadi (qalinligi  $\sim 1\text{mkm}$ ), FR suriladi va kontaktli pechat qilinadi (jipslashtirib yoritiladi). Eksponirlab va ochirilgandan so'ng kislotada xrom yemiriladi. Tayyor bo'lgan FSh mustahkamligini oshirish uchun  $100-150^{\circ}\text{C}$  da bir necha soat qizzdiriladi, bunda xrom qatlaming shishaga adgeziyasi (yopishqoqligi) ortadi.

## 9.9 Fotolitografiya jarayoni

FL jarayoni bir qancha operatsiyalardan iborat:

-plastinka sirtini tozalash. Buning uchun suyuq uch xlor etilenda ( $\text{C}_2\text{Cl}_3\text{H}$ ) yoki uning bug'ida yuviladi, azot kislotasida ( $\text{HNO}_3$ )

qaynatiladi. Yuvish uchun toluol ( $C_7H_8$ ), amilatsetat, atseton ( $S_3N_6O$ ) va etil spirti ishlataladi.

- FRni surish. Sentoфuga yordamida, purkash orqali, FR ga botirib va boshqa usullar bilan amalgalash oshiriladi.

- FR qatlami quritish.  $T=300\text{ K}$  da  $15\text{--}30$  minut, so‘ngra  $T=100\text{--}120\text{ }^{\circ}\text{C}$  da  $30\text{--}60$  minut oralig‘ida quritiladi. IQ nurda yoki vakuumda ham quritish mumkin.

- Eksponirlash. Kontaktli usul bilan amalgalash oshiriladi. Yoritilganda FR qatlaming xossasi o‘zgaradi.

- Ochiltirish negativ fotorezis ishlatsa yoritilmagan sohalar organik eritgichlar: toluol ( $C_7H_8$ ), uchxlor etilen ( $C_2Cl_3H$ ), xlorbenzol ( $C_6H_5Cl$ ) da eritib yuboriladi.

Pozitiv FR larda yoritilgan sohalari indenkarbon kislota eruvchan tuzlarga aylanadi va kuchsiz ( $0,3 - 0,4\%$ ) li ishqorli NaOH yoki uch natriy fosfat eritmasida eritiladi.

- Mustahkamlash - rasm hosil qilingan fotorezis qatlami mustahkamlash uchun ishlatalayotgan FR turiga qarab  $130\text{--}260\text{ }^{\circ}\text{C}$  dan gacha oraliqdagi haroratda bir soat davomida qizdiriladi.

- Hosil qilingan rasmning geometrik o‘lchamlarini mikroskop ostida tekshirish: FL jarayonida eng ko‘p hosil bo‘ladigan nuqsonlari rasm chetlarining notejisligi, FR qatlamlarida teshiklar hosil bo‘lishi.

-  $\text{SiO}_2$  qatlami yemirish. Bu qatlaming FR bilan himoyalananmagan sohalari  $30\text{gr } \text{NH}_4\text{F} + 60\text{ml } \text{H}_2\text{O} + 9\text{ml HF (48\%)}$  yemirgich yordamida yemiriladi. Tarkibida fosfor atomlari ko‘p bo‘lgan  $\text{SiO}_2$  qatlaming HF da yemirilish tezligi toza  $\text{SiO}_2$  da borli  $\text{SiO}_2$  qatlamanidan katta bo‘lgani uchun  $\text{SiO}_2$  qatlami HF da yemirish maqsadga muvofiq emas.

- Mustahkamlangan fotorezis qatlami ketkazish uchun sulfat kislotada ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) qaynatiladi yoki  $10\%$  li ishqor eritmasiga solinadi. Alyuminiy qatlami yemirish uchun negativ fotorezis bo‘lganda  $5\text{--}20\%$  li NaOH yoki KON ishlataladi. Yemirish uchun  $T=50\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$  gacha qizdirish kerak bo‘ladi va yemirish tezligi  $200 - 500\text{ A/min}$  ni tashkil etadi. Pozitiv FR bo‘lganda alyuminiyini yemirish uchun ortofosfor kislotasining  $50\%$  li eritmasiga solinib,  $T=60\text{--}70\text{ }^{\circ}\text{C}$  gacha qizdiriladi. Quyidagi yemirgichdan ham foydalanish mumkin:

$3.8\text{ l } \text{FeCl}_3 + 360\text{ ml 38\% li HSI}$

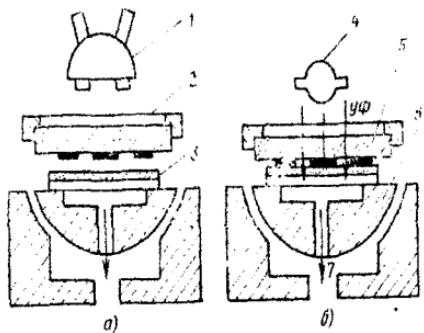
Xrom qatlami yemirish uchun pozitiv FR bo‘lganda kuchsiz HCl dan foydalanish mumkin. Yemirish tezligi katta bo‘ladi. Oltin qatlami

yemirish uchun pozitiv FR bo‘lganda  $1\text{HNO}_3 + 3\text{HCl}$  yemirgichdan foydalaniлади.

Tantal qatlami yemirish uchun negativ FR 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. Ikkinci fotolitografiyadan boshlab FSh dagi rasm bilan 1-FL da yarim o‘tkazgichli plastinka-taglikda hosil qilingan rasmni moslashtirish zarur bo‘ladi. Moslashtirishni eksponirlashni amalga oshiruvchi qurilmada mikroskopda kuzatib turib oldingi fotolitografiyada yarim o‘tkazgichli plastinkada hosil qilingan rasm bilan FSh dagi rasm FSh ni X va Y o‘qlari bo‘yicha siljitishtorqali moslashtiriladi.



### Qurilmanning asosiy qismlari quyidagilar:

- ikki sohani ko‘ruvchi mikroskop (1)
- FSh o‘rnataladigan ramka (2)
- FR surilgan yarim o‘tkazgichli plastinka(3)
- ultrabinafsha nurli lampa (4)
- fotoshablon (5)
- sferik asosga ega bo‘lgan stol (6)
- Havoni surib oluvchi tizim (7)

**9.8 rasm.** kontaktli eksponerlash qurilmasi. a) - moslashtirish,  
b) - yoritish

FSh bilan FR qatlami yedirilmasligi, chizilib ketmasligi va simmasligi uchun moslashtirish jarayonida FSh bilan FR oralig‘ida 10 - 30 mkm bo‘lgan mikrotirqish qoldiriladi. Moslashtirish aniqligiga bo‘lgan talab ortishi bilan kattalashtirish qobiliyati yuqori bo‘lgan ( $100 - 200^X$ ) mikroskoplar ishlataladi, bunda mos ravishda mikrotirqish kichrayadi. Ikki sohani ko‘rsatuvchi mikroskop yordamida bir vaqtning

o'zida yarim o'tkazgich plastinka yuzasida bir - biridan uzoq ikki sohani ko'rish imkonini beradi.

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 ishlataladigan shakllar moslashtiradi.

Moslashtirish bajarilgandan so'ng FSh bilan yarim o'tkazgichli plastinka vakuum yoki bosim yordamida jipslashtiriladi, yani mikrotirqish yo'qotiladi.

Yorug'lik manbai-lampadan chiqayotgan nur spektridan FR ning yorug'likka sezgirlik spektorini ajratib olish uchun yorug'lik filtrlaridan foydalilanildi.

Eksponirlashni bajarish jarayonida yarim - o'tkazgichli pilastinka yuzasidagi FR qatlaming butun yuzasi bir tekis yoritilish uchun yorug'lik nurlarining parallel oqimi 1-5 gacha kvars linzalaridan tashkil topgan kondensor yordamida hosil qilinadi.

Eksponirlash vaqtı elektromagnit bilan boshqariladigan yorug'likni tushgich yordamida  $0,05 \div 0,1$  sek tezkorlik bilan amalga oshiriladi. Eksponirlash vaqtı 1 sek dan 2 minutgacha bo'lgani uchun bu tezkorlik yoritish vaqtı aniqligi yuqori bo'lishini ta'minlaydi.

Kontaktli eksponirlashning kamchiliklari:

Emulsiyali FSh ning juda tez yedirilishi tufayli konveyerni tez-tez to'xtatib FSh ni almashtirib turish kerak bo'ladi. Bu esa kontaktli eksponirlash jarayonini avtomatlashtirish imkonini cheklaydi. FSh bilan yarim o'tkazgichli plastinka jipslashtirilganda FSh dagi chang zarralari shishaning mikrozarralari FR qatlamiga botadi. FSh ga FR zarralari yopishib qoladi. FSh bilan FR o'rtasiga tushib qolgan ultrabinafsha nurni o'tkazmaydigan har qanday zarra hosil qilinayotgan FR li maskada nuqsonlarni hosil bo'lishiga olib keladi.

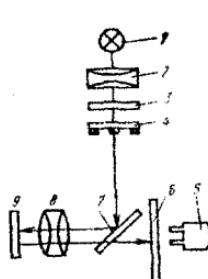
Amalda FSh bilan FR ni to'liq jipslashtirib bo'lmaydi, chunki yarim o'tkazgichli plastinka ayniqsa epitaksial qatlamlari egrilangan bo'ladi, ya'ni jipslashtiruvchi sirtlar ideal tekis bo'lmaydi. Jipslashtiruvchi sirtlar orasida begona zarralar mavjud. Yarim o'tkazgichli plastinka sirtidagi qatlamlar va FR qatlaming qalinligini bir tekis emasli ham nuqsonlar hosil bo'lishiga olib keladi.

FSh bilan yarim o'tkazgichli plastinkani jipslashtirganda ular orasida qisman havo bo'shliqlari qoladi. Bu esa yorug'likning

difraksiyalanishiga va FSh dan FR ga ko'chirilayotgan rasm o'lcamlarining kattalashishiga sabab bo'ladi. Shuncha kamchiliklarga qaramay kontaktli eksponirlash usuli texnologiyada keng qo'llaniladi Chunki yetarli darajada o'r ganilgan, narxi arzon va unum dorligi yuqori usul hisoblanadi. FSh bilan FR jipslashgani tufayli ko'chirilayotgan rasm aniqligi katta bo'ladi.

### 9.10 Proyeksiyali eksponirlash.

FSh dagi rasmning proyeksiyasi maxsus obyektivli optik tizim yordamida FR qatlamiga tushiriladi (yarim o'tkazgichli plastinka yuziga surtilgan). FSh bilan FR surilgan yarim o'tkazgichli plastinka bir biridan uzoq joylashgani uchun FSh yedirilmaydi. Proyeksiyali eksponirlash qurilmasi quyidagilardan iborat:



- 1- yorug'lik manbai
- 2- yorug'lik filtrlari
- 3- fotoshablon
- 4- optik tizim (kondensor)
- 5- Yarim shaffof shisha ko'zgu
- 6- proyeksiyalovchi obyektiv
- 7- FR surilgan yarim o'tkazgichli plastinka
- 8- mikroskop

### (9.9- rasm) Proyeksiyali eksponerlash qurilmasi tuzilishi

Yorug'lik nuri kondensorda yig'ilib, FSh ga tushiriladi. FSh dagi rasm yarim shaffof ko'zgu yordamida proyeksion obyektivga va undan yarim o'tkazgich plastinka yuzasidagi FR qatlamiga tushiriladi. Yarim o'tkazgich yuzasidan qaytgan nur obyektiv va shaffof ko'zgu orqali o'tib ekranga tushadi va mikroskop orqali kuzatiladi. Mikroskopda kuzatib turib yarim o'tkazgichda oldingi FL da hosil qilingan rasm bilan FSh dagi rasm moslashtiriladi. Bunda yorug'lik filtrlari yordamida FR ga ta'sir qilmaydigan nur bilan yoritiladi. So'ngra yorug'lik filtrlarini o'zgartirib FR qatlami eksponirlanadi.

Proyeksion eksponirlashning cheklangan holda qo'llanilishiga sabab:

- katta yuzaga proyeksiyalashda ishlataladigan yuqori ajratish qobiliyatiga ega bo'lgan obyektivlarni yaratishning murakkabligi.
- barcha texnologik jarayonlarda yarim o'tkazgichli plastinka sirtida tekislikni bidayt ta'minlab bo'lmaydi.
- FR qatlaming qalinligining bir tekislikda va qaytadan shunday qiymatga ko'p marotaba erishida yuqori talab qo'yiladi.

### **Planar texnologiyada himoyalovchi dielektrik qatlamlar.**

Himoyalovchi dielektrik qatlamlar yordamida:

- kirishma atomlarni lokal sohalarga diffuziya qilinadi.
- ISlarning elementlarini bir-biridan izolyatsiyalanadi.
- p-n o'tishlarni tashqi ta'sirlardan himoyalananadi.

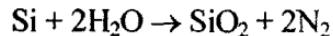
Himoyalovchi dielektrik qatlamlarga quyidagi talablar qo'yiladi:

- Yarim o'tkazgichli plastinka - taglikka diffuziya qilinayotgan kirishma atomlarining himoyalovchi qatlamdan o'ta olmasligi zarur.
- bu qatlam kimyoviy ta'sirlarga mustahkam bo'lishi kerak va vaqt o'tishi bilan mustahkamligi saqlanishi kerak.
- bir jinsli va nuqson siz bo'lishi kerak.
- solishtirma qarshiligi yuqori va elektr maydoniga mustahkam bo'lishi kerak.
- mexanik ta'sirga mustahkam bo'lishi kerak.

$\text{SiO}_2$  va  $\text{Si}_3\text{N}_4$  dielektrik qatlamlarigina bu talablarga to'liq javob berib, sanoatda keng qo'llanilmoqda.

### **Yuqori haroratda suv bug'i muhitida kremniyi oksidlash.**

Oksid qatlaming hosil bo'lishi suv molekulasingin  $\text{SiO}_2$  qatlamdan diffuziyalaniib o'tib, kremniy sirtiga yetib kelishi va kremniy bilan kimyoviy reaksiyaga kirishishi natijasida amalgalashadi:



( $\text{SiO}_2$ :  $\epsilon=4$  dielektrik singdiruvchanlik,  $\rho=10^{14}$   $\text{Om}\cdot\text{m}$ )

$\text{SiO}_2$  qatlaming strukturasini shakllanishiga reaksiya natijasida hosil bo'lgan vodorod ta'sir qiladi. Vodorod molekulasingin diffuziya koeffisiyenti ( $2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{sm}^2}{\text{sek}}$ ,  $T=1050^0\text{C}$ ) suv molekulasingin diffuziya koeffisiyenti ( $9 \cdot 10^{-10} \frac{\text{sm}^2}{\text{sek}}$ ,  $T=1050^0\text{C}$ ) dan sezilarli katta bo'lgani uchun  $\text{SiO}_2 - \text{Si}$  chegarada gidroqsil guruhining ( $\text{ON}^-$  yoki  $\text{N}_2\text{O}$ ) hosil bo'lishi nafaqt suv molekulalarining mavjudligi bilan balki, vodorodning mavjudligi bilan ham bog'liq bo'ladi.

$T=1100^{\circ}\text{C}$  dan yuqori haroratlarda oksidlanish jarayoni parabola qonuniyati bo'yicha bo'ladi:  $X^2=Vt$ .

X – oksid qatlam qaliligi

t – oksidlanish vaqtı

$$V=2\cdot(a)\cdot S_1\cdot V\cdot D, \left[ \frac{\text{mkm}^2}{\text{soat}} \right], a=\text{natural son}, 0 < a < 1$$

$S_1$  – oksidlovchi atomlar miqdori, [ $\text{cm}^{-3}$ ];

V – oksid qatlam xajmi, [ $\text{cm}^3$ ];

D – oksidlovchi atomlarning oksid qatlamdagi diffuziya koefisiyenti, [ $\text{cm}^2/\text{cek}$ ].

$T_{\text{oksid}} < 1100^{\circ}\text{C}$  da oksid qatlam hosil bo'lish qonuniyati paraboladan farq qiladi:

$$X^2 + AX = Vt \quad (9.8)$$

$A=2D(1/k + 1/\delta)$ , [ $\text{mkm}$ ]; k – oksidlanish reaksiyasi tezligi doimiysi [ $\text{cm/sec}$ ];

$\delta$  – oksidlovchining oksid qatlamda erish tezligi doimiysi, [ $\text{cm/sec}$ ];

Oksidlanish jarayoni past haroratlarda chiziqli qonuniyatga yaqin o'zgaradi:

$$X_0 = \frac{Vt}{A} \quad (9.9)$$

Oksidlanish tezligini chiziqli o'zgarishi uchun oksidlansh tezligi oksidlanish kimyoviy reaksiyasi tezligiga bog'liq bo'ladi va (oksidlovchining diffuziyalanish tezligiga bog'liq bo'lmasdan). Bu qonuniyat esa past haroratlarda to'laroq bajariladi.

Kimyoviy reaksiya tezligi kremlniydagи bo'sh bog'lar soniga bog'liq. Chunki bo'sh bog'lar suv molekulasi bilan ta'sirlashib  $\text{SiO}_2 - \text{Si}$  chegarada  $\text{SiO}_2$  hosil qiladi.

Taglikda (plastinkada) kirishma atomlarining ko'p bo'lishi kimyoviy reaksiya tezligiga yoki oksidlovchi diffuziya koefisiyentiga ta'sir qiladi.

$T = 600 \div 1100^{\circ}\text{C}$  harorat oralig'ida fosfor kontsentratsiyasi ko'p bo'lgan plastinka sirtini oksidlanish tezligi sezilarli katta bo'ladi.

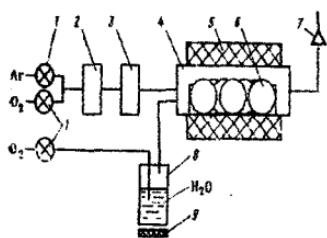
Oksidlanish jarayonida o'sayotgan oksid qatlamdan fosfor kremlniyi ichkari tomonga siqib chiqaradi. Bor kirishmasi uchun aksincha: o'sayotgan oksid qatlam bor atomlarini tortib oladi. Bu esa kremlniyda oksidlovchi atomlari diffuziyasini tezlashtirishga olib keladi

(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 bog'liq bo'ladi (past haroratlarda (parabolik qonuniyatga bo'ysunmaydigan holda).

### Kremniyi kislород muxитида qizdirib Oksidlash

Quruq kislород muhitida oksidlash jarayonida o'sayotgan oksid qatlamdan diffuziyalanib o'tuychi modda kislород ionlaridir. Kislородning  $\text{SiO}_2$  qatlamdagи diffuziya koeffisiyenti ( $2,8 \cdot 10^{-14} \text{ sm}^2/\text{sek}$ ,  $T=1050^\circ\text{C}$ ) vodorod va suvnikiga nisbatan ancha kichik. Shuning uchun, bir xil sharoitda suv bug'idagiga nisbatan quruq kislородда oksid qatlam o'sish tezligi sekin bo'ladi. Oksidlanish jarayoni faollik energiyasining kattaligi va gidroksid guruhi (ON) ning yo'qligi kislородning kremniy atomi bilan mustahkam bog' hosil qilishiga va o'stirilgan oksid qatlarnig strukturasini mukammal bo'lishiga olib keladi. Past haroratlarda oksidlanish kinetikasi ko'proq  $\text{Si} - \text{SiO}_2$  chegarasida sodir bo'ladigan oksidlanish reaksiyasining tezligiga bog'liq bo'ladi (kislородning diffuziyasidan ko'ra).

$T < 1000^\circ\text{C}$  lardan boshlab  $\text{SiO}_2$  o'sish qonuniyati chiziqli bo'lib boradi.



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 platsinkalari 7 – havoni so'ruchchi (ventilyatsiya) 8 – namlatgich 9 – qizdirgich

**9.10 rasm** Kremniyi qizdirib oksidlash qurilmasi.

### 9.11 Nam kislородли muhitda kremniyi qizdirib oksidlash

Bu usul quruq kislород va suv bug'i muhitida qizdirib oksidlashning oraliq holatidir.

Quritilgan va kirishmalardan tozalangan  $\text{O}_2$  suv orqali o'tkazilganda issiq suv bug'lari bilan to'yinadi va uni ishchi kameraga

yuboriladi. Kislород гази тарқибидаги намлиқ миқдори сувнинг гарорати ва газ оқимининг тезлигига, кремний пластинкасининг сиртни оқсидланиш тезлиги esa газ тарқибидаги намлиқ миқдорига bog'liq bo'ladi.

Oқсидланышни жарояни сеқинлатиш учун кислород орнига аргон ёки азот газ оқимидан фойдаланиш мумкин (сувнинг гарорати хона гароратидаги бо'лиши керак).

Оқсидланышни фаоллашиби энергияси суроқ кислородда 1,3 eV bo'lib, сув буг'ида 0,8 eV ga teng. Нам кислородда намлиқ миқдори ортishi билан бу энергия 1,3 eV dan to 0,8 eV gacha камайиб боради.

Sanoatda оқсидлашнинг уч босқичли usuli qo'llaniladi:

- birinchi босқичда суроқ кислородда
- ikkinchi босқичда нам кислород ёки сув буг'ида
- uchunchi босқич суроқ кислородда

Bu usulning afzalligi 1-bosқичда мұфассал структуралы yupqa оқсид қатлам о'sтирилади, 2-bosқичда оқсид қатламнинг o'sish тезлиги оширилади ва 3-bosқичда яна оқсид қатлам үзасы мұфассал структуралы bo'lishiga erishiladi.

Termik qizdirish usuli билан 1-1,5 mkm qalinlikgacha оқсид қатлам о'sтириш имкони mavjud.

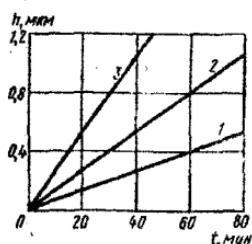
Planar texnologiyada himoyalovchi maska сифатида qo'llaniladigan оқсид қатлам qalinligi 0,2-0,8 mkm bo'ladi. Оқсид қатламни 0,8 mkm dan qalin olish, uni lokal emirganda hosil bo'ladigan yon томонларга yemirilishi (klin) kattalashib ketib, FL da kerakli o'lchamdagи shaklini hosil qilishda aniqligi камайади. Оқсид қатлам qalinligi 0,2 mkm dan kam bo'lsa undagi kovakliklardan kirishma atomlarining o'tib ketish ehtimolligi ortadi.

### **Piroлиз yo'li bilan kremniy oksid qatlami o'stirish**

Nisbatan sodda va texnologik jihatdan qulay оқсид o'stirish usuli turli xil кремний органик бирікмаларини parchalab,  $\text{SiO}_2$  қатлами кремний пластинкасында, унинг ishtirokisiz, o'stirishdir. Bu usul afzalligi taglikdagi kirishma atomlarini оқсид қатламга o'tmasligi, ya'ni, taglik faol va passiv sohalarini geometrik o'lchamlari va elektr parametrlarini saqlanishidir. Оқсид қатлам o'stirish nisbatan past гароратда amalgama ошади.

## 9.12 Tetraetaksisilan $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ ning termik parchalanishidan oksid qatlami o'stirish

Tetraetaksisilan  $T=700\text{-}750^{\circ}\text{C}$  da parchalanib,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiO}$ ,  $\text{CO}_2$  va organik radikallarga gaz holatida ajraladi. Parchalanish reaksiyasida kislorod manbai bo'lib tashqi manba emas, tetraetaksisilanning o'zi ishtirok etadi.



**9.11-rasm.** Oksid qatlami qalinligi  $h$  ning oksidlanish vaqtiga bog'liqligi:

Agar parchalanish reaksiyasi taglik joylashgan kamerada amalga oshsa u holda taglik harorati  $T_{\text{tag}}$  parchalanish harorati  $T_{\text{parch}}$  bilan bir xil bo'ladi. Agar taglik boshqa kameraga o'rnatilsa, uning haroratini sezilarli darajada past olish mumkin.

- 1- parchalanish harorati  $T_{\text{parch}} = 700^{\circ}\text{C}$
- 2- parchalanish harorati  $T_{\text{parch}} = 725^{\circ}\text{C}$
- 3- parchalanish harorati  $T_{\text{parch}} = 750^{\circ}\text{C}$

## Kremniy nitrat qatlami kimyoviy o'stirish texnologiyasi

Kremniy nitrat ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) qatlami kremniy ikki oksidi qatlami ( $\text{SiO}_2$ ) ga nisbatan kirishma atomlarining diffuziyalanishiga kuchliroq qarshilik ko'rsatadi. Shuning uchun to'siq sifatida foydalanishda  $\text{Si}_3\text{N}_4$  qatlami  $\text{SiO}_2$  ga nisbatan yupqaroq olish mumkin. Bu esa, fotolitografiya jarayonining ajratish qobiliyatini oshirish imkoniyatini beradi.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  qatlami kimyoviy o'stirishning bir qancha usullari mavjud:

### Kremniyning azot bilan ta'sirlanish reaksiyasi

Kremniy bilan azotni ta'sirlanish reaksiyasi  $1100\text{-}1300^{\circ}\text{C}$  da amalga oshadi: bunda  $3\text{Si} + 2\text{N}_2 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4$ . reaksiyasi sodir bo'ladi  $\text{Si}_3\text{N}_4$  qatlami ochiq truba usuli bilan olinishi mumkin. Ishchi kameraga Si platsinkasi o'rnatiladi va truba orqali azot gaz oqimi o'tkaziladi.  $T=1200^{\circ}\text{C}$  va azot gaz oqimi  $300 \text{ sm}^3/\text{ min}$  bo'lganda kremniy platsinkasi yuzasida  $\text{Si}_3\text{N}_4$  qatlam hosil bo'ladi.

## 9.13 Bipolyar ISlarni tayyorlash texnologiyasi

Bipolyar IS elementlari bir-biridan va taglikdan izolatsiyalangan sohalarda-hosil qilinadi. Ko'pgina IS lar uchun datslabki material sifatida yashiringan  $n^+$  - sohalarga ega bo'lgan epitaksial qatlamli yarim o'tkazgich platsinkalari ishlataladi. 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  $\text{SiO}_2$  qatlami hosil qilinadi.  $\text{SiO}_2$  qatlam akseptorli kirishmalardan faqat bor (B) atomlari uchun to'siq bo'lishi mumkin. Al, In va Ga  $\text{SiO}_2$  qatlamda tez diffuziyalanadi. Bu atomlar uchun to'siq vazifasini nitrat kremniy ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) qatlami bajaradi.

Donorli aralashmalardan ko'pincha fosfor ishlataladi. U surma va mishyakka nisbatan katta diffuziya koeffisiyentiga ega va surmaga nisbatan kremniydag'i eruvchanligi katta.

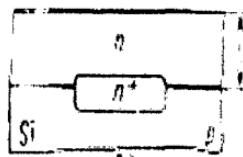
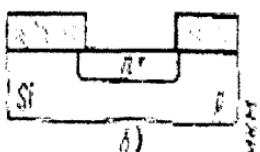
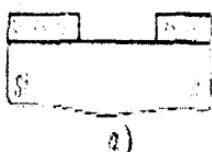
Akseptorli aralashmalarga nisbatan donorli aralashmalar kremniyda sekinroq diffuziyalanadi va bir tekis taqsimlanadi. Shuning uchun kremniyli  $n^- p-n$  tranzistorlar  $p-n-p$  ga nisbatan ko'proq tarqalgan. Emitter sohalarini hosil qilish uchun fosfordan foydalaniladi, chunki fosforni eruvchanligi katta bo'lganligi uchun ( $10^{21} \text{ sm}^{-3}$ ) injeksiya koeffisiyenti yuqori bo'ladi.  $n^+$  - emitter sohalarini hosil qilish bilan bir vaqtida 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 IS texnologiyasi

Epitaksial qatlamning butun qalinligiga diffuziyon usul orqali izolyatsiya hosil qilinadi. Diffuziya natijasida tagidan va yon tomonlaridan p-n-o'tish sohasi bilan chegaralangan cho'ntaklar hosil bo'ladi. Mikrosxema 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.) o'zaro va taglikdan izolyatsiyalangan bo'ladi.

Texnologik jarayon 2 bosqichdan iborat:

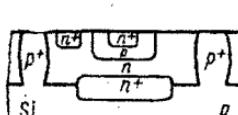
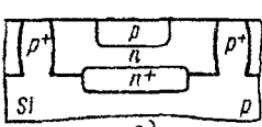
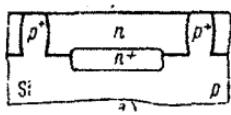
-  $n^+$  -sohali epitaksial struktura tayyorlash



(9.12- rasm)

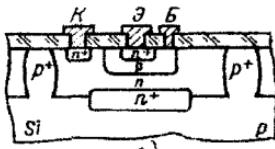
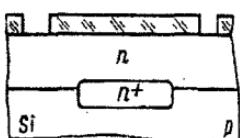
- a) p-Si taglikda termik oksidlash usuli bilan  $\text{SiO}_2$  qatlam hosil qilish va FL yordamida  $\text{SiO}_2$  qatlamda darcha ochish
- b) Diffuziya yorda- mida darcha bor yemirib joylarda  $n^-$  sohani hosil qilish
- d)  $\text{SiO}_2$  qatlamni epitaksial Si qatlami ( $n_e$ ) o'stirish.

### -hosil qilingan strukturada bipolyar IS tayyorlash



(9.13- rasm)

- s) Epitaksial qatlam ( $n_e$ )ning butun qalinligi bo'yicha akseptorli aralashma darcha ochilgan joylarda diffuziya bo'lib,  $p^+$ -sohalar hosil qiladi. Nati-jada p-n-o'tish bilan o'ralgan cho'ntak hosil bo'ladi.
- g) Hamma cho'ntak-larda bir vaqtida qatlam hosil qilib, FL tranzistor hosil qilish. Buning uchun termik oksidlab  $\text{SiO}_2$  qatlam hosil qilinadi va FL yordamida darcha ochiladi. Diffuziya ochiladi hamda akseptorli kirishma atomari diffuziya qilinib bipolyar tranzistorning bazasi (p-soha)ni hosil qilinadi
- m). Termik oksidlab  $\text{SiO}_2$  qatlam hosil qilib, FL yordamida emitter va kollektor kontakt sohalari uchun donor aralashmasini diffuziya qilish uchun yordamida darcha ochiladi. Diffuziya ochiladi hamda jarayonida  $n^+$  - emitter va  $n^+$  - kontakt sohasi hosil bo'ladi.



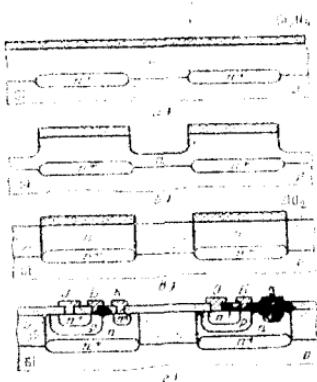
(9.14- rasm)

- n) Strukturada termik oksidlash usuli bilan  $\text{SiO}_2$  qatlam qilish.FL yordamida  $\text{SiO}_2$  qatlamda qizdirib uchirish usuli bilan Al qatlami hosil qilinadi. FL yordamida Al qatlami faqat "E","B","K" sohalarida. tok oquvchi yo'chchalarda va kontakt maydonchalarida qoldirib, qolgan joylardagi Al qatlami yemirib tashlanadi.

### Kombinatsiyalari izolyatsiyalangan bipolar IS

Kombinatsiyalangan izolyatsiya cho'ntakning tagini p-n- o'tish bilan va yon tomonlarini dielektirk qatlam bilan izolyatsiyalash tushuniladi.

"Izoplanar -1" 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 ( $\text{SiO}_2$ ) o'stirish jarayoni juda sekin bo'ladi: 1mkm qalinlikgacha oksid qatlam tez o'sadi (chiziqli), so'ngra sekin o'sadi (parabola qonuniyatiga bo'yicha).



Cho'ntakning pastki qismida izolyatsiya yashiringan  $n^+$ -soha bilan p-Si taglik o'rtaсидаги  $n^+$ -p-o'tish sohasi hisobiga bo'ladi. Kremniyi lokal yemirish va oksidlashda bitta  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -foydalananiladi. Bu esa texnologik operatsiyalar sonini kamaytirishga yordam beradi:

- a)  $\text{Si}_3\text{N}_4$  qatlamni mexanik o'tkazish
- b) Fotolitografiya va local yemirish
- d) Lokal termik oksidlash
- c)  $\text{Si}_3\text{N}_4$  maskani olib tashlash, cho'ntaklarda, bipolyar transistor hosil qilish va metallash

(9.15 - Rasm) "Izoplanar-II"

"Izoplanar-II" - jaryonida bipolyar tranzistorning emitter sohasi yon tomondagi izolyatsiyalovchi  $\text{SiO}_2$  qatlamga chiqadi. Kollektor sohasining kon-takt osti  $n^+$ -sohasi aloxida cho'ntakda joylashgan bo'lib, emitter-baza joy-lashgan 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  $\text{SiO}_2$  qatlamga surish mumkin, aralashma  $\text{SiO}_2$  qatlamga diffuziyalanmaydi. Baza sohasini hosil qilish uchun diffuziyani cho'ntakning hamma yuzasiga 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 notejis taqsimotidan qutilish mumkin, strukturalar faol sohalari o'rtasidagi parazit sig'implarni kamaytirish mumkin bo'ladi. Bunda izolyatsiya sifati va IS integratsiya darajasi ortadi.

## **9.14 Metall - Oksid - Yarim o'tkazgich (MOYa) - strukturali asosidagi ISlarni texnologiyasi**

MOYa- IS planar va epitaksial - planar texnologiya yordamida tayyorlanadi. MOYa tranzistorlar konsruksiyasi sodda va elementlari o'z - o'zidan izolyatsiyalangan bo'lgani uchun umumiyligi texnologik jarayonlar soni, bipolyar IS lar texnologiyasidagiga nisbatan kam bo'ladi. Bu esa ishlab chiqarish unumdorligi oshishiga (yaroqsiz IS larni soni kamayishiga) va IS lar narxining arzonlashuviga olib keladi.

MOYa IS larining texnologiyasida eng murakkab va muhim jarayonlar:

- Zatvor osti oksidini hosil qilish,
- Zatvor bilan kanalni aniq moslashtirish,
- Kanali juda qiska bo'lgan MOYa IS lar tayyorlash.

Zatvor osti oksidi-MOYa IS arning faol elementining asosiy qismi bo'lib, unga qo'yiladigan talab to'siq sifatida ishlataladigan oksid qatlama  $\text{SiO}_2$  ga quyiladigan talabdan ancha yuqori bo'ladi, masalan:

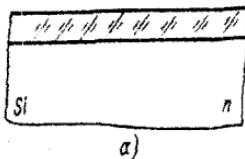
- Elektr maydonga chidamliligi katta bo'lishi kerak
- $\text{SiO}_2$  hajmida va Si -  $\text{SiO}_2$  tizim chegarasida zaryadlar miqdori kam bo'lishi kerak.

-Xossalari o'ta turg'un bo'lishi kerak va boshqalar.

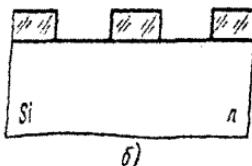
Kremniyga odatda  $<100>$  kristall tekisligida sirt zaryarlar zichligi:  $1.4 \cdot 10^{-8}$  kl/sm<sup>2</sup>, ga  $<111>$  da  $8 \cdot 10^8$  kl/sm<sup>2</sup> ga teng bo'ladi. Shuning uchun, Si li MOYa - IS ni  $<100>$  tekislikda hosil qilish maqsadga muvofiqdir. Zatvor istok va stok sohalarini qoplamasligi kerak, aks holda parazit sig'implar hosil bo'lib IS ning tezkorligini pasaytiradi. Agar zatvor uzunligi kanal uzunligidan kalta bo'lsa istok - stok zanjiri uzilib qo'yadi. Kanal uzunligiga tok tashuvchilarning istokdan stokga borish vaqtin, ya'ni MOYa-ISning tezkorligiga bog'liq bo'ladi. MOYa-IS lar tezkorligi oshsa ularning qo'llanish sohasi ko'payadi va bitta element egallagan joyning kamayishi, texnologiyaning soddaligi IS integratsiya darajasini keskin orttirish imkonini beradi. MOYa-strukturalar katta va o'ta katta IS larning asosini tashkil qiladi.

### **Qalin oksidli p- MOYa-IS va n-MOYa-ISlarni tayyorlash texnologiyasi**

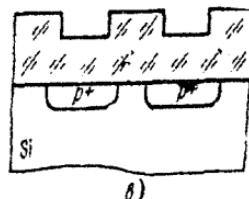
p-kanalli MOYa-IS lar planar texnologiya asosida tayyorlanadi. Lokal diffuziya va qalin oksid qatlama o'stirishni bir vaqtida yoki alohida - alohida bajarish mumkin. Ikkinchchi holda oksid qatlama bug'-gaz muhitida o'stiriladi.



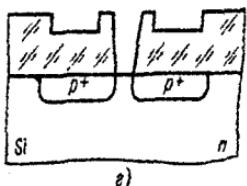
a) To'siq vazifasini  
bajaruvchi  
oksid dan so'ng  
o'stirish



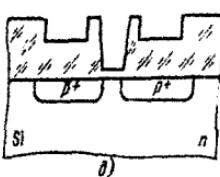
b) Fotolitografiya



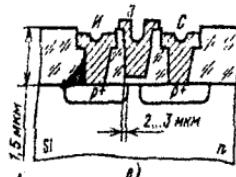
c) Lokal difuziya  
qalin oksid qatlama  
o'stirish



d) Yupqa zatvor osti oksidini o'stirish



g) Fotolitografiya



e) Metallash

### 9.16 rasm p kanalli MOYaO-IS texnologiyasi

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-FL) va qalin oksidni qatlamni yemirish (3-FL) hisoblanadi. Metall qatlaming tagida qalin oksid hosil bo'lgani uchun IS 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 bu erda FL bilan bajariladi va

- 1) istok va stok yon tomonlaridagi r-n-o'tish sohalari o'mi noaniq
- 2) qalin oksid qatlami yemirishda aniqlik yo'qoladi ( 2-FL).

Zatvor osti oksidining qalinligi 0,1 mkm bo'lganda kanal bilan zatvorning qoplanishi 2-3 mkm bo'ladi. Bu murakkabliklarga qaramay p-MOYa-IS larni tayyorlash texnologiyasi nisbatan oddiy, yaroqsiz ISlarni chiqishi kam, tannarxi arzon hisoblanadi. p-MOYa-IS lar kalkulyatorlarda ko'p ishlataladi.

Unga nisbatan n-MOYa-IS larni tayyorlash texnologiyasi murakkabroq. Chunki, hosil bo'ladigan n-invers sohalar elementlarning o'zaro izolyatsiyasiga va tranzistorlarning ostona kuchlanishi (porogovoe napr.)ga ta'sir qilmasligi uchun maxsus choralar ko'rildi.

n- MOYa-IS texnologiyasining p-MOYa-IS nikidan farqi, istok va stok sohalar hosil qilingandan so'ng, ularning sirt tomonidan bor ionlari implantatsiya qilinadi.Qalin oksid qatlami o'stirish jarayonida bor ionlari faollashib n<sup>+</sup>-soha hosil qiladi.Bu soha oksid qatlam ostida p- invers sohanini hosil bo'lishiga yo'l qo'ymaydi va elementlar bir-biridan izolyatsiyalanib turadi.

## 9.15 Komplementar MOYa-KNS-IS

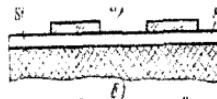
Bunday strukturali IS larda parazit sig‘imlar va sizib o‘tuvchi toklar kichik bo‘ladi.

Elementlar o‘lchamining va ichki sig‘imlarning kamayishi IS larning tezkorligini, radiatsiyaga chidamliligini, integratsiya darajasini keskin oshiradi, quvvatning sochilishini kamayishiga olib keladi.

Taglik sifatida ishlataluvchi sapfir bilan epitaksial qatlama bo‘lgan kremniy strukturalari bir-biriga mos kelmaganligi tufayli, sapfir yuzasiga epitaksial qatlama o‘stirishdan oldin yaxshilab ishlov beriladi. Kremniyli tagliklardan farqli ravishda sapfirlar tagliklar yuqori haroratlarda ishlov berilganda deformatsiyalaridan maydi. Hamda ularning yaroqsiz bo‘lganlarini qayta ishlash mumkin.

**Sapfirlar taglikda kremniy epitaksial qatlami o‘stiriladi (geteroepitaksial struktura KNS)**

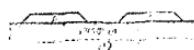
Kremniy sapfir ustida struktura yuzasida p- va n-Si li orolchalar hosil qilinib, bu orolchalarda n-va p-kanalli MOYa tranzistorlar yaratiladi: **9.17 rasm KNS-MOYaO‘-IS texnologiyasi**



a) Kremniy sapfir ustida - struktura (yuzasi tozalanadi).

b)  $\text{SiO}_2$ -to‘siq hosil qilish.

v) Epitaksial p-Si ni lokal yemirish va  $\text{SiO}_2$  - to‘signi tozalash

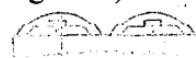


g) Orolchaning biriga to‘siq hosil qilish va ikkinchisiga fosfor diffuziya qilish (yoki ionli legirlash)

e) To‘signi olib tashlash



d) Yupqa zatvor osti oksidi o‘stirish ( $\text{SiO}_2$ ) va polikristall kremniy qatlami hosil qilish.



j) FL qilish, FS va BS shisha surish.

z) Diffuziya qilish va shishani tozalash.



k) Oksid qatlama o‘stirish, FL bilan darcha ochish, metallash

KMOP- KNS -IS (kremniy metal-oksid-yarim o'tkazgich tranzistori sapfir taglik ustida hosil qilingan integral sxema) larning keng qo'llanilishiga to'sqinlik qiluvchi asosiy faktorlar:

- sapfirning narxining qimmatligi
- taglik qattiq bo'lgani uchun mexanik ishlov berishning murakkabligi.

-kristall strukturasi Si nikidan farq qilgani uchun epitaksial qatlari o'stiradigan yuzasini tayyorlashga qo'yiladigan talablarni juda yuqoriligi.

Shuning uchun amorf tagliklarda kremniy epitaksial qatlami strukturalar yaratiladi.

### Integral sxemalarni metallash

Yarim o'tkazgichli strukturalarni yaratishning oxirgi jarayoni metallash bo'lib, xozirgi davrda ishlab chiqarishda qo'llaniladigan metallash jarayonini quyidagi turlarga bo'lish mumkin:

- bir qatlamlari
- ko'p qatlamlari
- ko'p qavatlari

Bir qatlamlari Al ni metallash kichik va o'rta integratsiya darajasiga ega bo'lgan, kam quvvatli,-1 GGts chastotagacha ishlovchi, chidamliligi katta bo'limgan IS larda qo'llaniladi. Boshqa metallarga nisbatan Al metallashga quyiladigan talablarga ko'proq javob beradi. Al yuqori elektr o'tkazuvchan-likka ega, p - va n<sup>+</sup> - Si ga qarshiligi kichik bo'lgan kontakt hosil qiladi, Si ga adgeziyasi yaxshi ( $\text{SiO}_2$  ga ham). Ishlatish qulay, arzon, egiluvchan bo'lib harorat o'zgarishiga chidamli. Al metalli IS lar radiatsiyaga chidamli hisoblanadi.

Al li metallash texnologiyasi jarayoniga quyidagilar kiradi:

Al - qatlami hosil qilinadi, FL qilinadi va qatlari ustiga himoyalovchi qatlari hosil qilinadi. Al qatlami o'chirishda avval hosil qilingan struktura ustida  $\text{SiO}_2$  - to'siq o'stiriladi, bu to'siqda darchalar ochiladi( kontakt qilinadigan sohalarda). Al qatlami olish uchun vakuumda qizdirib o'chirish, magnetron changlatish, bug' - gaz muhitidan o'stirish usullaridan foydalinish mumkin.

Vakuumda qizdirib o'stirish usuli bilan sifatli va toza Al qatlami hosil qilish qiyin. Al- metalining 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 o'suvchi birikmalar hosil qiladi.

Elektron - nur bilan bug'latib hosil qilingan Al- qatlami nisbatan toza bo'lib, mehnat unumdorligi oshadi, lekin qurilmaning konstruksiyasi murakkablashadi. Tigel sifatida ishlatiluvchi materiallardan bor nitrati (BN), alyuminiy nitrati va bor titan asosida 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 bu usuldan davrda keng qo'llanilmoqda .

Al-qatlami bug'-gaz muhitida o'tkazishni 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  $\text{SiO}_2$  - qatlamda elektr zaryadi eng kam bo'lishi talab etiladi. Si-SiO<sub>2</sub>-Al tizimda mexanik kuchlanishlarni eng kam bo'lishiga erishish kerak .

Al-qatlamidan fotolitografiya yordamida faol sohalarga kontakt maydonchalarini va tok oquvchi yo'lchalarining topologiyasini hosil qilishda keng foydalaniлади.

Fotorezisli to'siqni olib tashlash uchun kislotalardan foydalanish mumkin emas.Fotorezisni qaynoq dimetil formamidda yoki kislorod plazmasida olib tashlanadi.Alli metallashning kamchiliklari:

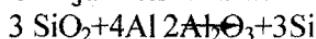
-qattiq fazada kremniy Al da ko'p eriydi ( $T=500^{\circ}\text{C}$  da-1% gacha), sovitilganda erigan kremniy atomlari kontakt chegaralaridagi sohalarga o'chirib, kontaktning mexanik mustahkamligini kamaytiradi.

-past evtektika haroratiga ega Al-Si,577 C.

-yumshoqligi tufayli mexanik mustahkamligi past.

Al ning chiziqli kengayish harorat koeffisiyenti Si ga  $\text{SiO}_2$  nikidan katta.

-45<sup>0</sup>C dan boshlab  $\text{SiO}_2$  bilan kimyoviy ta'sirlasha boshlaydi va 500<sup>0</sup>C da juda tezlashadi:



-kislota va ishqorlarga chidamliligi past,korroziyalanadi.

-yuqori haroratlarda Au bilan mo'rt intermetall birikmalar  $Au_2Al$ ,  $AuAl_2$  hosil qiladi. Bu birikmalarni hosil bo'lish jarayonida Al oltin ichiga Au alyuminiy ichiga diffuziyalangandan ko'ra tezroq diffuziyalanishi natijasida bo'shliqlar va yoriqlar hosil bo'ladi. Bu esa Al-kontakt maydonchasiga oltin simini kovsharlangan joylar mustahkamligini yanada susaytiradi. Au ning Al bilan hosil qilgan intermetall birikmalari Si ni eritadi.

- Al qatlamiya metal simlarni payka qilib bo'lmaydi.
- Al qatlami elektroliz usuli bilan olib bo'lmaydi.

### Ko'p qatlamli metallash

Kontakt qatlami-kremniyda hosil qilinadigan birinchi qatlam bo'lib, bu qatlam kremniyga kam kiradigan, kremniy bilan maqsadga muvofiq bo'lmagan ta'sirlashuvda bo'lmaydigan, kremniyda kam eriydigan va diffuziya koeffisiyenti 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 ishlov larga chidamli, xossalari o'zgarmas bo'ib, bunday birikmalarni hosil qilish IS larni tayyorlash texnologiyasi bilan mos tushadi.

Silitsid birikmalar qatlami quyidagi usullar bilan olinadi.

- silitsidli nishonni katodli changlatish bilan
- vakuumda bir vaqtida metall va Si ni qizdirib uchirish bilan
- bug'-gaz muhittidan 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 IS oyoqchalariga sifatli va mustahkam ulanishini ta'minlash kerak. Bu qatlam uchun mis, alyuminiy, oltin ishlatiladi.

Ikki qatlamli tizimlarda Al li metallash qatlami eng katta tok zichligi va ishlash vaqtining ko'pligi bilan, bir xil sharoitda ishlatilgan boshqa xil qatlamlardan farq qiladi.

Ajratuvchi (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. Bir qatlamdagi metallning ikkinchi qatlamga diffuziyasiga to'siq vazifasini ham bajaradi. Chunki bunday diffuziya kontaktning qarshiligini o'zgarishiga va mexanik mustahkamligining kamayishiga sabab bo'ladi. Ajratuvchi qatlam sifatida kumush, oltin, molibden, volfram, nikel, palladiy ishlataladi. Oxirgisi eng yuqori xususiyatlarga ega.

### Ko'p qavatli metallash

Bu usul katta va o'ta katta IS larni olish texnologiyasida qo'llaniladi. IS larda 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 metal qoplamlari bir qatlamli va ko'p qatlamli bo'lishi mumkin va bir qavatli tizimlarning talablarga javob berishi kerak.

Izolyatsiyalovchi dielektrik qatlamlar katta teshilish kuchlanishiga chidamli 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 pastgi qavat bilan ustki qavatni tutashtiruvchi darchalar ochish,

-ikkinchi qavat metallashni hosil qilish va hokazo. Ko'pgina katta IS larda Al li metallash ishlataladi, izolyatsiyalovchi qatlam sifatida  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  va boshqalar ishlataladi.

Al-  $\text{SiO}_2$ -Al metallash IS larni tayyorlash texnologiyasiga yaxshi moslashadi.

Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> -Al-metal qatlam mustahkam bo'ladi. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> qatlami izolyatsiyalovchi xususiyatlari yaxshiroq bo'lib, natriy ionlarini o'tkazmaydi, atmosfera ta'siriga ya'ni, suv bug'lari va radiatsiyaga chidamli hisoblanadi.

$\text{Al}_2\text{O}_3$  qatlami  $T=300$  K da Al qatlami anodli oksidlash asosida hosil qilinadi.

### Hajmiy kontakt oyoqchalar

Bir vaqtini o'zida elementlarning faol sohalariga kontaktlar va kontakt oyoqchalar vazifasini bajaradi, ya'ni kontakt maydoncha va kontakt oyoqcha yaxlit bitta bo'ladi. Hajmiy kontakt oyoqchalari gibriddarlar hosil qilinadi.

### 9.16 Gibriddarlar tayyorlashning texnologik jarayonlari

Qatlamli IS lardagi elementlar dielektrik taglikda yupqa qatlamlar hosil qilib tayyorlanadi. Taglik IS ning mexanik asosi bo'lib xizmat qiladi.

Hozirgi davrda yupqa qatlamli texnologiya asosida faqat passiv elementlar ya'ni, IS ning rezistorlari va kondensatorlarini tayyorlanadi. Qatlamli IS larni tagligiga diskret faol elementlar diod, tranzistor, yarim o'tkazgichli IS lar o'rnatilsa, bunday qatlamli IS larni gibriddar integral sxema (GIS) lar deyiladi. Gibriddarlarining passiv (rezistor, kondensator) va faol (dirod, tranzistor, yarim o'tkazgichli IS) elementlari bir-biriga bog'liq bo'lmagan alohida texnologik jarayonlarda tayyorlanadi. Bu gibriddarlarining (GIS) 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 yarim o'tkazgichli IS lardan foydalanish, passiv elementlarni ko'p qavatli joylashtirish tizimidan foydalanish va ularni yaratish imkoniyatlarini kengaytiradi.

### Taglik sifatida ishlataluvchi materiallar

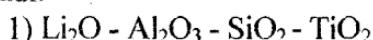
Taglik materialining xossalari qatlamli elementlarning parametrlari va tavsiyflariga ta'sir qilmasligi kerak. Taglik sifatida ishlataladigan materiallar:

1. Borsilikatli shisha- $\text{SiO}_2$ (80%),  $\text{B}_2\text{O}_3$ (12%) va boshqalar ( $\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O}, \text{Al}_2\text{O}_3$ ).

2. Alyumosilikatli shisha  $\text{SiO}_2$ (60%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$ (20%), va boshqa oksidlari ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ).

3. "Polikor" turidagi alyumooksid keramika- $\text{Al}_2\text{O}_3$  (99,8%),  $\text{B}_2\text{O}_3$  (0,1%),  $\text{MgO}$  (0,1%).

4. Berilliy keramikasi -  $\text{BeO}$  (98% - 99,5%). Sitallar - shisha keramik materiallar bo'lib, shishaga harorat ishlov berish (kristallah) asosida orqali olinadi. Sitallarning tarkibi quyidagi oksidlardan iborat bo'ladi:



2)  $\text{RO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{TiO}_2$ ; ( $\text{RO}$  -  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  yoki  $\text{BaO}$  lardan biri).

Sapfir -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ning  $\alpha$ - modifikatsiyasi toza monokristall bo'lib, materiallarni boshqa taglik materiallaridan farq qiladi 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 maydoni qo'yilganda ko'chib yuradigan ishqoriy metall ionlari hosil bo'lishi mumkin. Bu ko'chib yuruvchi ionlar taglikning hamda IS 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 qatlamlı IS lar uchun zarur bo'lgan sillik sirtini olishda (mikrorelef) qiyinchiliklar mavjud. Shuning uchun ko'proq qalin qatlamlı IS larga taglik sifatida ishlatalidi.

Sitallar mexanik mustahkamligi shishadan  $2 \div 3$  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 mikrorelef, kimyoviy ta'sirga chidamliligi bo'yicha yupqa qatlamlı IS lar uchun eng yaxshi taglik materiali sitallar, qalin qatlamlı IS lar uchun esa 96% li alyumooksid keramikasi hisoblanadi.

## **Yupqa qatlamlı IS larda yupqa qatlami olish uchun ishlatiladigan materiallar**

Yupqa qatlamlı rezistorlar tayyorlash uchun ishlatiladigan materialarni uch guruhga bo'lish mumkin:

- metallar
- metall qotishmalar
- metall-dielektrik aralashmalar – kermetlar.

Yupqa qatlamlı metalli rezistorlarni tayyorlashda Sr va Ta ishlatiladi. Tantalning ko'p qo'llanilishiga sabab kimyoviy anodlash usuli bilan oson oksidlashi mumkin. Tantal qatlami qisman oksidlab rezistor qalinligini kamaytirish va bir vaqtida himoyalovchi qatlam sifatida foydalanish mumkin. Ayrim aralashma atomlari kiritilganda tantal qatlami elektr qarshiligi keskin ortadi va elektr qarshilikning harorat koeffisiyentini qiymati kichikligicha qoladi. Aralashma sifatida azot ishlatilganda yaxshi natija beradi.

Yarim o'tkazgich materiallar qatlamlarining elektr qarshiligini harorat koeffisiyenti katta manfiy qiymatga ega bo'lgani uchun qatlamlı rezistorlarni yaratishda ishlatilmaydi. Qatlamlı rezistor yaratishda solishtirma qarshiligi katta bo'lgan metall qotishmalardan nikel bilan xrom qotishmasi - nixrom ( $\rho \approx 10^{-4}$  Om·sm) va nixromga boshqa materiallar qo'shilgan qotishmalar masalan Ni (74 %), Cr (20%), Fe (3%), Al (3%) qotishmalari ishlatiladi ularni solishtirma qarshiligi  $\rho \approx 1,3 \cdot 10^{-4}$  Om·sm ga teng bo'ladi.

Kermetlar sifatida ishlatilishda quyidagi aralashmalar tekshirilgan va yaxshi natijalar olingan: Cr - SiO, Al - SiO<sub>2</sub>, Pt - Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, bularning ichida eng yaxshisi Cr - SiO hisoblanadi.

## **Yupqa qatlamlı kondensatorlar uchun materiallar**

Yupqa qatlamlı kondensatorlarning parametrлари asosan dielektrik qatlam materialining xossasi bilan aniqlanadi. Dielektrik materialning asosiy xossalariiga

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 nuqson siz qatlam olish qiyin bo'lgani uchun yupqa qatlamli kondensator yuzasining o'lchami cheklangan bo'ladi. Yuzani kichikligi hosil qilish kerak bo'lgan sig'im qiyomatining qanday aniqlikda olinishiga bog'liq bo'ladi. Dielektrik qatlamning eng kichik qalinligiga ham cheklanish mayjud bo'lgani uchun (qatlamdagi teshiklar elektr maydonini qiyamatiga chidamliligi bo'lishida ta'sir qiladi), dielektrik qatlam materialining dielektrik singdiruvchanligiga ma'lum talablar quyiladi. Qatlamni eng kichik qalinligi  $h=0,1$  mkm va maksimal yuzasi.  $S=10 \text{ mm}^2$  bo'lsa  $10^6 \text{ pf}$  sig'im olish uchun dielektrik materialning dielektrik singdiruvchanligi 10 dan katta bo'lishi kerak. Dielektrik materialning elektr mustahkamligi teshilish kuchlanishi qiyati bilan aniqlanadi. Ya'ni  $U_d = E_d \cdot h$ , formula asosida eng katta ishchi kuchlanishi aniqlanadi.

Dielektrik qatlam olish uchun metall va yarim o'tkazgich oksidlari ishlatiladi. Masalan:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiO}$ ,  $\text{GeO}$  (dielektrik singdiruvchanligi katta).  $\text{SiO}_2$  qatlamli kam ishlatiladi, chunki, dielektrik singdiruvchanlik kichik va vakuumda qizdirib o'chirish usuli bilan qatlami hosil qilish qiyin  $T=1600^\circ\text{C}$  da bug'larining bosimi  $\text{SiO}$  nikidan taxminan  $10^5$  marta kichik bo'ladi.

Qiyin eruvchi metall oksidlari  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$  boshqa metall oksidlardan ancha yuqori dielektrik singdiruvchanlikka ega.  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  qatlami 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 IS larda 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
- kovsharlash yoki payka
- kimyoviy inert bo'lishi.

Yuqori elektr o'tkazuvchanlikka ega metallar: oltin, kumush, alyuminiy, mis va boshqa materiallar hisoblanadi. Lekin bular yuqoridagi talablarni to'liq bajarmaydi. Masalan: Au va Ag taglikka adgeziyasi yomon. Al – kovsharlash va payka qilish qiyin. Cu – tez oksidlanadi. Shuning uchun yupqa qatlamli tok o'tkazgichlar hosil qilish uchun yupqa qatlamli kompozitsiyon materialardan foydalilanildi. Bu kompozitsiyon qatlamli materiallarning xususiyatlari quyidagi laniborat:

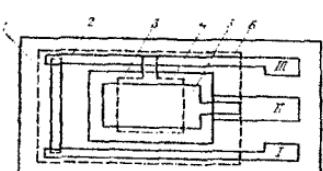
– pastki qatlam qalinligi  $(1 \div 3) \cdot 10^{-2}$  mkm, taglikka yaxshi adgeziyalanadigan tanlab olinadi.

– o'tkazuvchi qatlam elektr o'tkazuvchanligi katta bo'lgan materialdan  $0,4 \div 0,8$  mkm qalinlikda olinadi.

– himoyalovchi qatlamni kovsharlash 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 qarshiliqi, 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 IS lar tayyorlashni texnologik marshruti Yupqa qatlamli RS-IS strukturasini tayyorlash.



9.18 rasm Yupqa qatlamli RC-IS topologiyasi:

1- rezistor R(xrom) 2- tok o'tkazuvchi yo'lchalar va kontakt maydonchalari (mis, tagida xrom qatlami)

3- kondensatorning pastki qoplamasasi (Al)

4- kondensatorning dielektrik qatlami (germaniyl monooksidi GeO) 5- kondensatori ustki qoplamasasi (Al)

6-himoyalovchi qatlam(kremniyl monooksidi SiO).

Yupqa qatlamli RC- strukturani to'siq (maska) yordamida tayyorlashni 2 bosqichga bo'lish mumkin:

## Prinzipial elektr sxemasi:

R

C

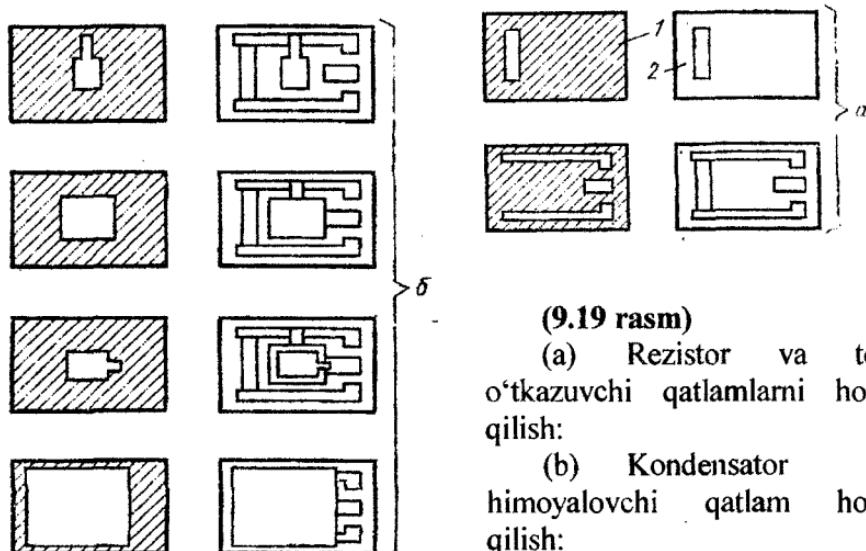
I. Rezitsiv va tok o'tkazuvchi qatlamlarni hosil qilish vakuum kamerasida uzlusiz jarayonda amalga oshiriladi.

Xrom qatlami uchirib hosil qilish jarayonida qoldiq kislorod bilan ta'sirlashib, hosil bo'lgan Cr qatlaming solishtirma qarshiligi ortadi. Taglik harorati 200-250 °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 olib tashlanib 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).

Xrorndan farqli holda mis moddasi suyuq holatdan uchiriladi. Mis qiyin eruvchi metallar bilan o'zaro ta'sirlashmaydi. Qiyin eruvchi metallardan uchiruvchi sifatida molibden ishlataladi, chunki mexanik ishlov berish nisbatan oson va issiklikni yaxshi o'tkazadi. Misni qizdirish jarayonida, uning sochilishi bo'lmasligi uchun bosqichma - bosqich olib boriladi: avval eritib olinadi, so'ngra uchiruvchidan o'tayotgan tokni sekin asta oshirib boriladi to kerakli uchirish haroratiga erishguncha so'ngra to'siq ochiladi va taglikda mis qatlami hosil qilinadi (tok o'tkazuvchi qatlam va yo'lchalar).

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 imkonini mavjud bo'ladi.

Himoyalovchi SiO - monooksid qatlami 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.



**(9.19 rasm)**

(a) Rezistor va tok o'tkazuvchi qatlamlarni hosil qilish:

(b) Kondensator va himoyalovchi qatlam hosil qilish:

### Kristallni qutiga o'rnatish va undan ulovchi simlar chiqarish

Yarim o'tkazgichli asboblar va IS larni qutiga joylashtirishda kristall yoki taglik quti asosiga joylashtirilib, undan ulash uchun simlar chiqariladi. Simlar kristalldagi metall qatlam hosil qilingan -kontakt maydonchalariga ularadi.

Bunday ulashlarning murakkabligi metall qatlamlar yupqaligi (0,25-2,0mkm) va adgeziyasingin 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 qatlami qalinligi bilan ulanuvchi sim qalinligi orasidagi nisbat 1:100 bo'lgani uchun kontakt maydonchasi qatlami qizib ketadi yoki ulanuvchi sim yetarlicha qizimaydi natijada ulanish mustahkam bo'lmaydi.

Kley yordamida ulashda 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 koeffisiyenti bir-biridan keskin farq qilishi;

8) kleylanuvchi sirt yuzasining kattaligi( $0,2\text{--}0,3\text{ mm}^2$ ).

Qalaylash- ikki metallni qattiq holatda orasidagi bo'shliqlarni qalay bilan to'ldirib amalga oshiriladi. Qalaylashda ulanuvchi metal 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  $183\text{--}194^\circ\text{C}$  ni tashkil etadi.

2) Agar kontakt maydonchasidagi metall qatlama qalayda kuchli erisa,u holda PS,OS3-58 [3%Ag; 0,5%Sb; 57,8%Sn; 38,7%Pb] qotishmadan foydalaniladi.

3)Issiqlikka chidamsiz bo'lgan qismlar erish harorati past bo'lgan ( $142\text{--}145^\circ\text{C}$ ) qotishma POSK 50 [50% Sn; 18% Cd; 0,2% Sb; 0,008% Cu; 31,792% Pb ]bilan qalaylanadi.

Mettallni va qalayli qotishmani oksidlashdan asrash uchun passiv flyuslardan foydalaniladi yoki flyussiz qalaylanadi. Flyuslar yordamida qalaylangandan so'ng yuvish zarurati bo'ladiganlari sababli qalaylangan sirt tozalab ishlanadi.

Flyuslarni turlari:

1. FKS<sub>p</sub> ( konifol- 10 ÷ 60% massali; etil spirti 90 ÷ 40% massali)

2. FPE (poliefir smola 15÷20 % massali ; metil etilketon yoki etilatsetat 80÷85%massali )

Qalaylash kam quvvatli ( $U=6\text{V}$ ,  $P=6\text{Vt}$ ,  $T=260^\circ\text{C}$ ) elektrik mikropayalnik yordamida  $t=2\text{--}3$  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 gat eng bo'ldi.

Bu usulning kamchiligi:

- 1) Ulasnish puxta bo'lmaydi.
- 2) Ulanish yuzasi nisbatan kattaligi;
- 3) Ayrim metallnigina qalaylash mumkinligi;
- 4) Ulash tezkorligini pastligi;

Kiritish mumkin bo'lib bular qalaylab ularshdan foydalanishni cheklab qo'yadi.

Qalaylash ko'proq kristall yoki taglikni quti asosiga mahkamlashda qo'llaniladi.

Yumshoq qotishmalar yoki yevtektik qotishmalardan foydalanib qalaylash quyidagi talablarga javob beradi:

1) Ulanish sohasining qarshiligi kichik bo'ladi;

2) Quti materiali bilan qotishma harorat chiziqli kengayish koeffigiyenti bir-biriga yaqin bo'lib, hosil bo'ladigan mexanik kuchlanishlar kichik bo'ladi;

3) Issiqlik o'tkazuvchanligi yaxshi va texnik mustahkam bo'ladi.

Bunday qotishmalarga erish harorati  $T=280^{\circ}\text{C}$  bo'lgan Au-Sn va  $T=300^{\circ}\text{C}$  bo'lgan Rv-Sn-Ag qotishmalar kiradi. Kristall-ning qutiga maxkamlanadigan sirti xrom va uning ustidan Au, Ag yoki Ni qatlami bilan qoplanadi. Quti asosi Ni yoki Ag bilan qoplanadi. Kristall bilan quti asosi orasiga erish harorati  $T=370^{\circ}\text{C}$  bo'lgan evtektik qotishma Au-Si (94 va 6% massa) yupqa dumaloq tugmacha shaklida quyiladi. Ulanish mustaxkam bo'lishi uchun qizdirish haroratini  $T=390\div420^{\circ}\text{C}$ , bosim  $1\div3 \text{ n/mm}^2$  bo'lgan xolda  $t=3\div5$  sek ushlab turish kerak. Shisha bilan ularash faqat kristallarni qutiga maxkamlashda ishlataladi. Engil eruvchi S84-1, S88-1, S89-3, S90-1 shishalarning chiziqli kengayish harorat koeffigiyenti  $(8.4\div9.0)\times10^{-6} \text{ K}^{-1}$  va yumshash harorati  $T=550^{\circ}\text{C}$  dan katta bo'lmaydi. Shishadan foydalanilganda kristall qutidan izolyatsiyalangan bo'ladi.

### **Kovsharlash usullari**

Mikrokavsharlash - deganda ulanuvchi qismlarni eritish yoki deformatsiyalash orqali ajralmaydigan xolda biriktirish tushuniladi. Bunda ulanuvchi materiallarni atomlari orasida mustaxkam bog' hosil bo'ladi.

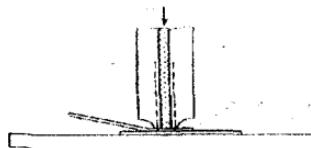
Qalaylashdan farqli ravishda kavsharlashda ifloslanish va gaz bilan tuyinish, flyus ishlatilmagani tufayli kam bo‘ladi.

Bosim bilan kavsharlash-(qizdirilgan xolda presslash, impulslar bilan qizdirib, ultratovush yordamida) bir vaqtida ulanuvchilarga qismlarga harorat va bosim ta’sir ettirilishga asoslangan. Bunda ulanuvchi qismlar erimaydi, faqat ularning pachoqlanuvchanligi ortadi. Plastik deformatsiyalanish natijasida ulanuvchilarlarning atomlari orasida metall bog‘lanish ko‘rinishida fizik tutashish yuzaga keladi va ulanuvchi moddalarning atomlari bir-biriga diffuziyalanadi. Metall qismlarni metall yoki metall bo‘limgan qismlar bilan yuqori bosim va harorat ta’sirida ulash termokompressiya deyiladi.

Bu usul bilan yassi va silindirsimon shakldagi sim (o’tkazgich)larni oson sinuvchi taglikka o’tkazilgan yupqa metall qatlamga kavsharlash mumkin.

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  $10^8 \text{ n/m}^2$  tashkil qiladi. Bosim vaqt davomiyligi  $0.5 \div 3$  sek.

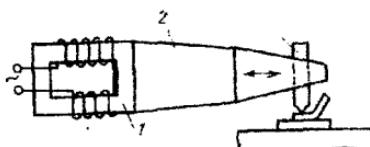
Kavsharovchi qurilma qattiq qotishmalar VK-6M, VK-15, berilliyl oksidi yoki sintetik korundan nina (pona) yoki kapillyar shaklida tayyorlanadi:



1-kavsharovchi qurilma 2-ulanuvchi sim  
3-kontakt maydoncha 4-taglik  
**9.20 - rasm** kavsharlash qurilmasini tuzilishi

Termokompressiya usuli bilan hamma materiallarni ham kavsharlab bo‘lmaydi. Kavsharlanuvchi sirtni kimyoviy yemirib, yog’sizlantirib, oksidlanishdan himoya qilib tayyorlash kerak.

Agar kavsharlanuvchi sirtlar mustaxkam, qalin oksid qatlam bilan qoplangan bo‘lsa (alyuminiy qatlami), ulanish sifatsiz bo‘ladi. Bu xolda oksid qatlamni buzish uchun ultratovushli kavsharlashdan foydalanildi:



- 1 - kavsharovchi qurilma  
 2 - tebranish (ulratovushli) uzatuvchi.  
 3-tebranish hosil qiluvchi  
 4-ulanuvchi sim

5-kontakt maydoncha.

### 9.21- rasm ultratovushli kavsharlash.

Metall va oq keramik yoki karbid titandan tayyorlangan kavsharovchi qurilma (1) sim (4) ni  $p=20\div150 \text{ n/mm}^2$  bosim bilan kontakt maydonchasi (5) ga siqib turadi. Elektr tebranish (ulratovushli) hosil qiluvchi (3) dan tebranishlar tebranish uzatuvchi (2) orqali kavsharovchi qurilmaga (1) uzatiladi, mexanik ultratovush hosil bo'ladi. Bu tebranish kavsharlanuvchi sirt yuzasida tarqaladi. Tebranishlar amplitudasi  $0,5\div5 \text{ mkm}$  va chatsotasi  $20\div60 \text{ kGts}$  bo'lganda sirdagi mikro notekisliklar silliqlanadi, oksid qatlam buziladi (mexanik) va ulanuvchi sohadan issiqlik ajralib chiqadi. Ulanuvchi material erish haroratingning  $0,3\div0,5 \text{ qismiga}$  teng haroratda, 1 sek dan kamroq vaqtida yumshoqlanib qoladi va kovsharlanadi.

Bu usulning afzalligi:

1) Turli materiallarni (dielektriklarni ham) qalinligi bilan keskin farq qiluvchi kavsharlash mumkin.

2) Kavsharlanuvchi sirtlar tozaligiga quyiladigan talab katta emas.

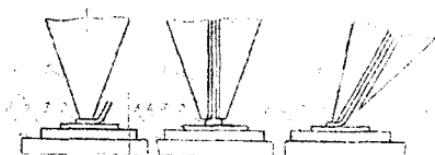
3) Lokal qizish natijasida kavsharlash sohasida yuz beradigan strukturaviy o'zgarishlar juda kam.

Qurilmada ultra tovush tebranish chatsotasi avtomatik boshqariladi, shuning uchun qulay holat tanlash mumkin.

Eritish orqali kavsharlash- (just elektrod yordamida, lazer nuri bilan, elektron nur bilan) kavsharlanuvchi qismlarni erish haroratigacha qizdirishga asoslangan.

Just elektrod yordamida kavsharlashda, IS lardagi ularshlar bir tekislikda amalga oshirilishi xisobga olingan. Ikki elektrod o'zaro yupqa slyuda yoki sintetik korund (qalinligi  $30\div220 \text{ mkm}$ ) bilan izolyatsiyalangan mustaxkam qurilma shaklida bo'ladi. Ulanuvchi sim diametri ( $30\div150 \text{ mkm}$ )ga qarab har bir elektrodning yuzasini eni  $80\div600 \text{ mkm}$  va bo'yisi  $20\div100 \text{ mkm}$  gacha bo'ladi. Elektrod volfram,

molibden yoki qattiq qotishma VK-8 dan qilinadi. Bunday elektrodlarni har biri 30-40 ming kovsharlashgacha chidaydi.



- 1- izolyatsiyalovchi qatlam,
- 2- elektrod, 3-sim,
- 4- kontakt maydoncha, 5- taglik.

### 9.22-rasm eritish orqali kovsharlash

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 vaqt 0,005 dan 0,02 sekundgacha bo‘ladi.

Lazer nurida kavsharlashda ulanuvchi materiallar qismlari katta zichlikdagi elektromagnit nurlanish ta’sirida eriydi, sovitgandan so‘ng qotib kavsharlanib qoladi.

#### Lazerli kavsharlash afzalliklari:

1. Qisqa vaqt ichida katta Energiyani kichik yuzaga yig‘ish mumkinligi ( $10^5 \div 10^6$  Vt/sm<sup>2</sup>) Bu esa har qanday metallni metal shisha va metal keramika ulanishlarga yaqin sohada kavsharlash imkonini beradi.

2. Maxsus muxit hosil qilinmaydi (vakuum, himoyalovchi atmosfera va boshqalar, 0,25÷1 mmli 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 ekan ligini ko‘rsatadi.

#### Mustahkamlash uchun masalalar

**Masala I.** Solishtirma qarshiliqi 10 Om · sm bo‘lgan p – turdag‘i kremniyga ikki bosqichli diffuziya usuli bilan kiritilganfosfor atomlari taqsimoti chizilsin va hosil bo‘lgan p-n-o‘tish chuqurligi aniqlansin. Diffuziya sharoiti quyidagicha:  $T_1=1050^\circ\text{C}$ ,  $t_1=10$  min,  $T_2=1150^\circ\text{C}$ ,  $t_2=2$  s.

1. Diffuziya harorati  $T_1=1050^\circ\text{C}$  bo‘lganda fosfor atomlarining kremniydag‘i eruvchanligi  $C_{01}$  ning qiymatini 9.23 rasmidan 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 kremniydag'i diffuziya koeffistienti  $D_1$  ning qiymatini 9.24 rasmidan 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:

$$N = 2C_0 \sqrt{\frac{D_1 t_1}{\pi}} = 2 \cdot 1.2 \cdot 10^{21} \sqrt{\frac{2.5 \cdot 10^{-14} \cdot 10 \cdot 60}{3.14}} = 5.2 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-2}$$

4. Diffuziya harorati  $T_2=1150^{\circ}\text{C}$  bo'lganda fosfor atomlarining kremniydag'i diffuziya koeffistienti  $D_2$  ning qiymatini 9.4 rasmidan 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:

$$C(x, t) = \frac{N}{\sqrt{\pi D_2 t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_2 t_2}\right) = \frac{5.2 \cdot 10^{15}}{\sqrt{3.14 \cdot 4 \cdot 10^{-13} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 10}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot 4 \cdot 10^{-13} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 60}\right) = 5.5 \cdot 10^9 \exp\left(-\frac{x^2}{1.15 \cdot 10^{-8}}\right)$$

X ning ixtiyoriy 1-10 gacha qiymatlari uchun  $C(x, t)$  ni hisoblang, aniqlangan natijalarni 9.4-jadvalga kriting.

9.4-jadval

$X, \text{ mkm}$									
$\exp\left(-\frac{x^2}{1.15 \cdot 10^{-8}}\right)$									
$C(x, t), \text{ sm}^{-3}$									

6. Kremniyga ikki bosqichli diffuziya usuli bilan kiritilgan fosfor atomlari taqsimotini diffuziyaning birinchi bosqichidagi taqsimoti bilan solishtirish uchun quyidagi ifoda asosida fosfor atomlari taqsimotini aniqlaymiz:

$$C(x, t) = C_{01} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1}} = 1.2 \cdot 10^{21} \operatorname{erfc} \frac{x}{7.75 \cdot 10^{-6}}$$

X ning ixtiyoriy 1-10 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 kriting.

X, mkm									
$erfc \frac{x}{7.75 \cdot 10^{-6}}$									
C(x, t), sm <sup>-3</sup>									

9.4- va 9.5- jadvallar asosida kremniyga ikki bosqichli diffuziya usuli bilan kiritilgan fosfor atomlari taqsimoti grafigini chizing (9.5-rasm).

Kremniyga ikki bosqichli diffuziya usuli bilan fosfor atomlari kiritilganda hosil bo'lgan p-n-o'tish chuqurligini aniqlash uchun

$$x_j = 2\sqrt{D_2 t_2} \sqrt{\ln \frac{C_{02}}{C_n}}$$

quyidagi ifodadan foydalanamiz:

$$Bu ifodadagi C_{02} quyidagiga teng: C_{02} = \frac{N}{\sqrt{\pi D_2 t_2}}$$

C<sub>B</sub> esa kremniydagagi bor atomlari konstantnosti, uning qiymatini ilovadagi -rasmdan topamiz: kremniyning solishtirma qarshiligi  $\rho_p = 10$  Om·sm bo'lganda undagi bor atomlari konstantnosti C<sub>B</sub>= $1.2 \cdot 10^{15}$  sm<sup>3</sup> ga teng. U holda p-n-o'tish chuqurligi

$$x_j = 2 \sqrt{\frac{\sqrt{4 \cdot 10^{-13} \cdot 60 \cdot 60} \cdot \sqrt{2.3 \cdot \lg \frac{5.5 \cdot 10^{19}}{1.2 \cdot 10^{15}}}}{3.5 \cdot 10^{-4}}} = 3.5 \cdot 10^{-4} \text{ sm} = 3.5 \text{ mkm}$$

p-n-o'tish chuqurligini quyidagi soddarroq ifodadan foydalanib hisoblanganda:

$$x_j = 6 \sqrt{D_2 t_2} = 6 \cdot \sqrt{2.88 \cdot 10^{-9}} = 3.2 \text{ mkm}$$

$$erfc \frac{x}{2\sqrt{D_2 t_2}} = erfc V$$

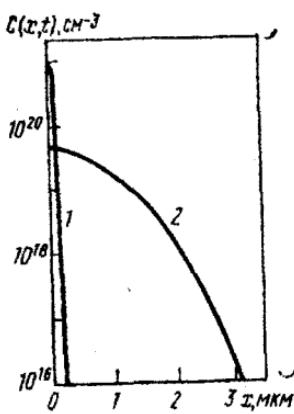
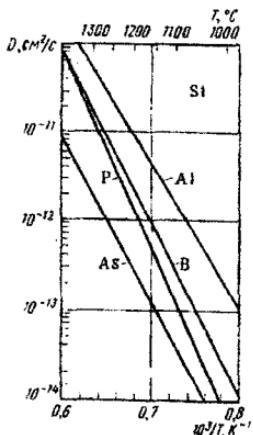
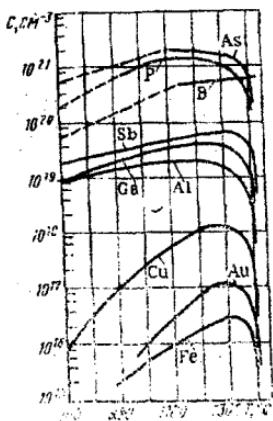
funksiyaning qiymati 9.6-jadval

z	erfc z	z	erfc z
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	0.000000077
1.40	0.04772	3.90	0.000000035

$$\int_{-\infty}^{\infty} (-y^2) \operatorname{erf}(\alpha y) dy$$
integral  $\alpha$  va  $z$  ning  $\sqrt{z}$  turli qiymatlari uchun hisoblangan 9.7-jadval

X 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



9.23 rasm. Si

kirishma atomari eruvchanligining temperaturaga bog'liqligi

9.24 rasm. Si kirishma atomarining diffuziya koifsentining temperaturaga bog'liqligi

9.25 rasm. Ikki bosqichli diffuziyada Si kirishma atomarining 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:  $T_1=1250^\circ\text{C}$ ,  $t_1=10 \text{ min}$ ,  $T_2=1150^\circ\text{C}$ ,  $t_2=2 \text{ s}$ .

1. Diffuziya harorati  $T_1=1250^\circ\text{C}$  va  $T_2=1150^\circ\text{C}$  bo'lganda fosfor atomlarining kremniydag'i diffuziya koefsistientlari  $D_1$  va  $D_2$  ning qiyatlarini 9.24 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 qiyati  $D_2 t_2$  ning qiyatiga 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'lganligi echimi, ya'ni quyidagi ifoda orqali aniqlanadi

$$C(x, t_1, t_2) = \frac{2C_{01}}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-y^2) \operatorname{erf}(ay) dy$$

3.  $\alpha$  va  $z$  ni aniqlaymiz:

$$\alpha = \sqrt{\frac{D_1 t_1}{D_2 t_2}} = \sqrt{\frac{2,4 \cdot 10^{-9}}{2,88 \cdot 10^{-9}}} \approx 0,9$$

$$z = \frac{x^2}{4 \cdot (D_1 t_1 + D_2 t_2)} = \frac{x^2}{4 \cdot (2,4 \cdot 10^{-9} + 2,88 \cdot 10^{-9})} = \frac{x^2}{2,11 \cdot 10^{-8}}$$

4. Kremniya fosfor atomlari diffuziyasining birinchi bosqichidan so'ng, kremniy yuzasidagi fosfor atomlarining konstentrasiyasini 9.23 rasmdan aniqlaymiz:  $T_1=1250^\circ\text{C}$  da  $S_{01}=1,2 \cdot 10^{21} \text{ sm}^{-3}$ .

5. Kremniya fosfor atomlari diffuziyasining ikkinchi bosqichidan so'ng, kremniy yuzasidagi fosfor atomlarining konstentrasiyasini quyidagi ifodadan aniqlaymiz:

$$C_{02} = \frac{2C_{01}}{\pi} \operatorname{arctg} \alpha = \frac{2 \cdot 1,2 \cdot 10^{21}}{3,14} = \operatorname{arctg} 0,9 = 5,6 \cdot 10^{20} \text{ sm}^{-3}$$

6. Kremniya fosfor atomlari diffuziyasining ikkinchi bosqichidan so'ngi 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:

$$x = 2 \cdot \sqrt{(D_1 t_1 + D_2 t_2) \cdot z} = 1,45 \cdot 10^{-4} \sqrt{z}$$

$X$  va  $C(x, t_1, t_2)$  ning qiymatlari 9.8-jadvalga kiritilsin.

9.8-jadval

$\alpha = \sqrt{\frac{D_1 t_1}{D_2 t_2}} = \sqrt{\frac{2,4 \cdot 10^{-9}}{2,88 \cdot 10^{-9}}} \approx 0,9$	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
$z = \frac{x^2}{4 \cdot (D_1 t_1 + D_2 t_2)}$	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	
$\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-y^2) \operatorname{erf} \sqrt{z} (\alpha y) dy$	0.6483	0.508	0.399	0.22	0.069	0.022	0.002	
$C(x, t_1, t_2), \text{ sm}^{-3}$	$\frac{2C_{01}}{\pi}$ -0.6483	$\frac{2C_{01}}{\pi}$ -0.508	$\frac{2C_{01}}{\pi}$ -0.399	$\frac{2C_{01}}{\pi}$ -0.22	$\frac{2C_{01}}{\pi}$ -0.069	$\frac{2C_{01}}{\pi}$ -0.022	$\frac{2C_{01}}{\pi}$ -0.002	

7. Kremniyga fosfor atomlari ikki bosqichli diffuziyasining birinchi bosqichida fosfor atomlari taqsimoti quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$C(x) = 1,2 \cdot 10^{21} \operatorname{erfc} \frac{x}{2 \cdot \sqrt{2,4 \cdot 10^{-9}}} = 1,2 \cdot 10^{21} \operatorname{erfc} \frac{x}{0,98 \cdot 10^{-4}}$$

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 kriting.

### 9.9-jadval

X, mkm									
$\operatorname{erfc} \frac{x}{0,98 \cdot 10^{-4}}$									
S(x, t), sm <sup>-3</sup>									

5- va 6- jadvallar asosida kremniyga ikki bosqichli diffuziya usuli bilan,  $D_1 t_1 < D_2 t_2$  shart bajarilmagan holatda, kiritilgan fosfor atomlari taqsimoti grafigi chizilsin (9.6 rasm 1-2 egri chiziq.)

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:

$$x_j = 6 \cdot \sqrt{D_1 t_1 + D_2 t_2} = 6 \sqrt{5,28 \cdot 10^{-9}} = 4,35 \cdot 10^{-4} \text{ sm} = 4,35 \text{ mkm}$$

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:

$$C(x) = \frac{N}{\sqrt{\pi(Dt)_{ef}}} \exp \left[ -\frac{x^2}{4(Dt)_{ef}} \right]$$

bu erda

$$N = 2C_{01} \sqrt{\frac{D_1 t_1}{\pi}} = 2 \cdot 1,2 \cdot 10^{21} \sqrt{\frac{2,4 \cdot 10^{-9}}{3,14}} = 6,6 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2}$$

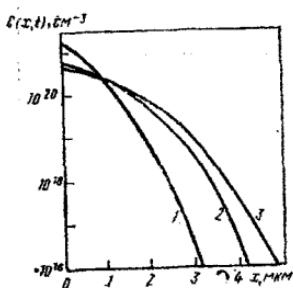
$$C(x) = \frac{6,6 \cdot 10^{16}}{\sqrt{3,14 \cdot 5,28 \cdot 10^{-9}}} \exp \left[ -\frac{x^2}{2,11 \cdot 10^{-8}} \right] = 5,1 \cdot 10^{23} \exp \left[ -\frac{x^2}{2,11 \cdot 10^{-8}} \right]$$

X ning 0 dan 5mkm gachan bo'lgan qiyatlari uchun C(x) ni hisoblang va 9.10-jadvalga kriting.

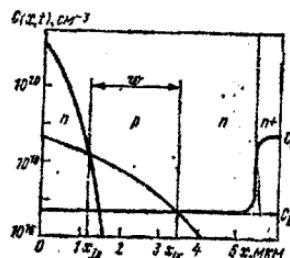
9.10-jadval

X, 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), sm <sup>-3</sup>										

9.10-jadval asosida  $(Dt)_e = D_1 t_1 + D_2 t_2$  bo'lgan holat uchun Gauss funksiyasi bo'yicha kremniydag'i fosfor atomlari taqsimoti grafigi chizilsin (9.6-rasm (3 egri chiziq)). 9.9-, 9.10-, 9.11-jadvallar asosida chizilgan taqsimotlarni solishtiring.



9.6 rasm. Ikki bosqichli diffuziyaga fosfor atomlari taqsimoti



9.7 rasm. tanzistorda ikki bosqichli ikkita ketma-ket diffuziya qilinganda kirishma atomlari taqsimoti

**Masala III.** Solishtirma qarshiligi  $0,15 \text{ Om} \cdot \text{sm}$  bo'lgan n – turdag'i 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  $T_a=1200^\circ\text{C}$ ,  $t_a=1$  s, fosfor atomlari uchun  $T_d=1100^\circ\text{C}$ ,  $t_d=2$  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 – turdag'i kremniydag'i fosfor kirishma atomlari konstrastiyasini topamiz:  $S_D = 5 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ .

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 kremniydag'i diffuziya koefsistientlari bor atomlari uchun  $D_a$ ,  $D_a$  va fosfor atomlari uchun  $D_d$  ning qiymatlarini 9.4-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  $T_d=1100^\circ\text{S}$  bo'lganda kremniy yuzasidagi fosfor atomlarining konstentrastiyasini ilovadagi aniqlaymiz: 9.3 rasmdan  $T_d=1100^\circ\text{C}$  da  $S_{0d}=1.2 \cdot 10^{21} \text{ sm}^{-3}$  aniqlaymiz.

$$D_a \cdot t_d \text{ va } D_a \cdot t_d \text{ ko'paytmalarni solishtiramiz: } D_a t_a = 2 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 60 \cdot 60 = 7.2 \cdot 10^{-9} \text{ sm}^2,$$

$$D_a t_d = 2.5 \cdot 10^{-13} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 60 = 1.8 \cdot 10^{-9} \text{ sm}^2.$$

Ikkita ketma-ket  $S_{0a}$ ,  $D_a$ ,  $t_a$  parametrlar bilan aksteptor va  $S_{0d}$ ,  $D_d$ ,  $t_d$  parametrlar bilan donor kirishmalari  $n$  – turdag'i donor kirishmalari konstentrastiyasi  $S_R$  bilan bir tekis legirlangan kremniiga diffuziya qilinganda,  $D_a t_a \gg D_d t_d$  shart bajarilganligi uchun, ikkita ketma-ket diffuziyadan so'ngi natijaviy kirishma atomlari taqsimotini aniqlash uchun quyidagi ifodadan foydalanish mumkin:

$$C(x, t) = C_{0a} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_a t_a}\right) - C_{0d} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_d t_d}} - C_p$$

bu erda

$$C_{0a} = \frac{N_a}{\sqrt{\pi D_a t_a}} = \frac{5 \cdot 10^{14}}{\sqrt{3.14 \cdot 7.2 \cdot 10^{-9}}} = 3.3 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3}$$

X ga beriladigan ixtiyoriy qiymatlarni tanlash uchun kollektor va emitter o'tishlarining chuqurligini aniqlaymiz:

$$x_{jk} = 2\sqrt{D_a t_a} \cdot \sqrt{2.3 \lg \frac{C_{0a}}{C_B}} = 2\sqrt{7.2 \cdot 10^{-9}} \cdot \sqrt{2.3 \lg \frac{3.3 \cdot 10^{18}}{5 \cdot 10^{16}}} = 3.5 \cdot 10^{-4} \text{ sm} = 3.5 \text{ mkm}$$

Emitter o'tishining chuqurligini aniqlash uchun quyidagi ifodalardan foydalanamiz:

$$x_{je0} = 6\sqrt{D_d t_d} = 6\sqrt{1 \cdot 10^{-13} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 60} = 1.6 \cdot 10^{-4} \text{ sm} = 1.6 \text{ mkm}$$

$$x_{je1} = \left( \frac{1}{4D_d t_d} - \frac{1}{4D_a t_a} \right)^{-\frac{1}{2}} \sqrt{2.3 \lg \left( \frac{C_{0d}}{C_{0a}} \right)} = \left( \frac{1}{4 \cdot 7.2 \cdot 10^{-9}} - \frac{1}{4 \cdot 7.2 \cdot 10^{-9}} \right)^{-\frac{1}{2}} \sqrt{2.3 \lg \left[ \frac{1.2 \cdot 10^{21}}{3.3 \cdot 10^{18}} \right]} =$$

$$= 1.35 \cdot 10^{-4} \text{ sm} = 1.35 \text{ mkm}$$

$$x_{jk} = \left[ \left( \frac{1}{2\sqrt{D_d t_d}} + \frac{0.3}{x_{je1}} \right)^2 - \frac{1}{4D_a t_a} \right]^{-\frac{1}{2}} \sqrt{2.3 \lg \left[ \frac{1.2 \cdot 10^{21}}{3.3 \cdot 10^{18}} \right]} =$$

$$= \left[ \left( \frac{1}{2\sqrt{7,2 \cdot 10^{-10}}} + \frac{0,3}{1,35 \cdot 10^{-4}} \right)^2 - \frac{1}{4 \cdot 7,2 \cdot 10^{-9}} \right]^{1/2} \cdot \sqrt{2,3 \lg \frac{1,2 \cdot 10^{21}}{3,3 \cdot 10^{18}}} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ sm} = 1,2 \text{ mkm}$$

Kirishma atomlari taqsimotini quyidagi ifodadan aniqlaymiz:

$$C(x, t) = 3,3 \cdot 10^{18} \exp \left( -\frac{x^2}{2,84 \cdot 10^{-8}} \right) - 1,2 \cdot 10^{21} \operatorname{erfc} \frac{x}{5,35 \cdot 10^{-5}} - 5 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$$

X ning qiymatlari 0 dan 1,2 mkm gachan 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, mkm	0.0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
$\exp \left( -\frac{x^2}{2,84 \cdot 10^{-8}} \right)$										
$\operatorname{erfc} \frac{x}{5,35 \cdot 10^{-5}}$										
$C(x, t), \text{ sm}^{-3}$										

9.11-jadval asosida kremniyga ketma-ket bor va fosfor atomlarini diffuziya qilib hosil qilingan n-p-n-strukturadagi bor va fosfor atomlari taqsimoti grafigini chizing 9.7 rasm.

**Masala IV.** Solishtirma qarshiligi 1 Om·sm bo'lgan p – turdag'i kremniyga ionlarni implantastiya qilish usuli bilan kiritilgan mishyak atomlari 1 soat qizdirish davomida chuqurligi  $x_0=0,5$  mkm bo'lgan p-n-o'tish hosil qilishi, kremniy sirt qatlamidagi mishyak atomlari konstantrasiyasi  $C_0=1,5 \cdot 10^{20} \text{ sm}^{-3}$  ga teng bo'lishi uchun qanday haroratda qizdirish kerak. Kremniyga implantastiya qilinishi kerak bo'lgan mishyak atomlari konstantrasiyasi hisoblansin.

1. Solishtirma qarshiligi 1 Om·sm bo'lgan p – tur kremniydag'i bor atomlari konstantrasiyasini 9.8 rasm aniqlaymiz:  $S_V=1,5 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ .

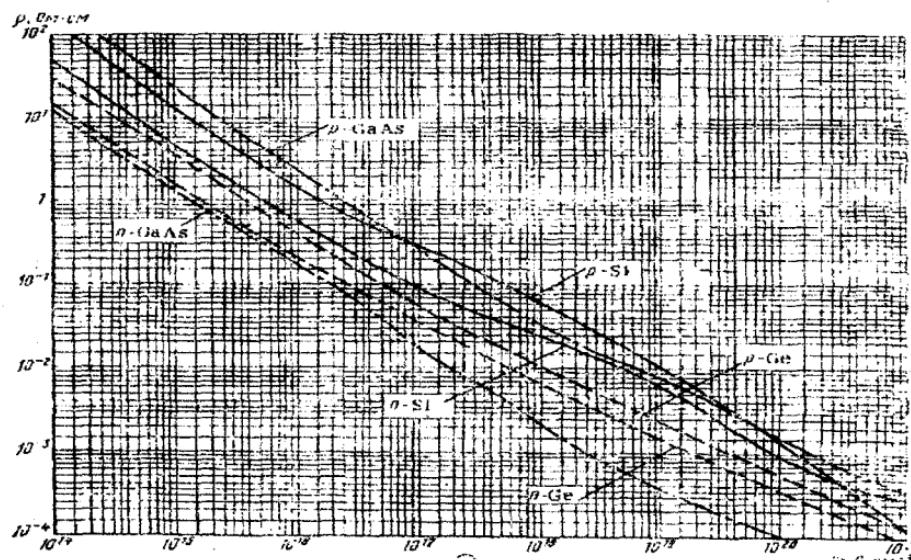
2. Mishyak atomlari diffuziya koeffisientini quyidagi ifodadan hisoblaymiz:

$$D = \frac{x^2}{4t \ln \frac{C_0}{C_b}} = \frac{0,25 \cdot 10^{-8}}{4,1 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 2,3 \lg \left[ \frac{1,5 \cdot 10^{20}}{1,5 \cdot 10^{16}} \right]} = 1,9 \cdot 10^{-14} \frac{\text{sm}^2}{\text{s}}$$

3. Hisoblangan mishyak atomlarining kremniydagи diffuziya koeffistienti qiymati  $1070^{\circ}\text{S}$  ga mos kelishini 9.24 rasmdan aniqlaymiz.

4. Kremniiga implantastiya qilingan mishyak atomlarining sirtiy zichligi ( $N$ )ni aniqlashda quyidagi kremniy sirt qatlamidagi kirishma atomlari konstrastiyasi ( $S_0$ )ni hisoblash ifodasidan foydalanamiz:

$$C_0 = \frac{N}{\sqrt{\pi D t}}; N = C_0 \sqrt{\pi D t} = 1,5 \cdot 10^{20} \sqrt{3,14 \cdot 1,9 \cdot 10^{-14} \cdot 1 \cdot 60 \cdot 60} = 2,2 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-2}$$



**9.8 rasm** Yarim o'tkazgichli materiali solishtirma qarshiligining kirishma atomlarining konsentratsiyasiga bog'liqligi.

### Nazorat savollari

1. Yarim o'tkazgich materiallarga mexanik ishlov berish turlari va maqsadi

2. Yarim o'tkazgich plastinkasining tozalik klasi

3. Yarim o'tkazgich plastinkasi sirtini fizikaviy tozalash usullari

4. Yarim o'tkazgich plastinkasi sirtini ximyaviy tozalash usullari

5. Kremniy uchun kislotali emirgichlar

6. Kremniy uchun ishqorli emirgichlar

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 taqsimoti

11. Fotolitografiyaning integral sxemalar tayyorlash texnologiyasida qo'llanilishi

12. Kremniy plastinkasini qizdirish yo'li bilan SiO<sub>2</sub>qatlami hosil qilish

13. SiO<sub>2</sub> qatlaming integral sxemalar tayyorlash texnologiyasida qo'llanilishi

14. Bipolar integral sxemalar tayyorlash texnologiyasi

15. MOYa integral sxemalar

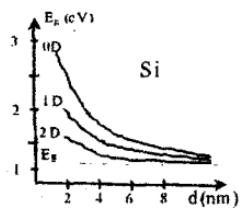
16. Gibrit integral sxemalar

17. Yupqa qatlamlı integral sxemalar

18. Qalın qatlamlı integral sxemalar

## 10 - bob Nano o'lchamli yarim o'tkazgichlar fizikasi Kirish

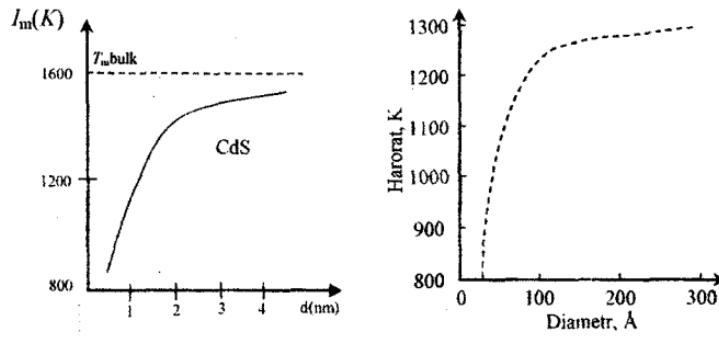
Nano o'lchamli materiallar deganimizda o'lchamlari bir nanometrdan ( $10^{-9}$ m) bir necha yuz nanometrga teng bo'lgan materiallar tushuniladi. Bunday materiallarni yaratish va o'rganishdan fan va texnikaga nima yangilik kutiladi va ular qaysi sohalarda ishlatalishi mumkin? Bu savollarga ilmiyasoslangan javob berishdan oldin qisqacha shuni aytish mumkin: materialarning o'lchovlari nano o'lchamlarga yetgan holatda ularning fundamental parametrlari ya'ni yarim o'tkazgich materiallarda taqiqlangan soha kengligi, tok tashuvchilar harakatchanligi, elektronlarni hosil qilgan energetik sathlari va boshqa asosiy xossalari juda keskin o'zgaradi. Bu degani nano o'lchamli kremniy bo'lib qolsada, o'zining elektrofizik parametrlari bilan butunlay yangi material xossalariiga ega bo'ladi.



10,1-rasm Kremniy (Si) materialining ta'qilangan sohasi kengligining uning o'lchovlariga bog'liqligi.

10-1 rasmda kremniy materialining o'lchovlarini kamaytirilib nano o'lchamli holatlarga kelganda uning ta'qilangan soha

kengligi uning o'lchomlariga bog'liqligi tajriba natijalari keltirilgan. Ko'rib turibdiki kremniy moddasining uchchala o'lchovlari (0D) yoki ikki o'lchovi (1D) yoki bir o'lchovi nanoo'lchamlarga yaqinlashganda kremniyning ta'qiqlangan soha kengligi ikki yarim marta oshar ekan. Endi bu modda atom tarkibi bo'yincha kremniy bo'lib qolsa ham uchchala o'lchamlar nano materiallarga yaqinlashgada u fizik xossalari bilan umuman boshqa kremniyga aylanib qolar ekan. Yoki 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 xossalarni boshqarish va yangi xossaga ega bo'lgan materiallar imkoniyati mavjud. Demak, bundan juda muhim ikkita masala chiqadi ya'ni bunday materiallarning xossalarni o'rganish fonda yangi nanofizika yo'nalishini yaratishga olib kelsa, ikkinchidan bunday materiallarni yaratish va ularning o'lchamlarini boshqarish yangi nanotexnologiya faniga asos solinadi. Masalaning ikkinchi tomoni bo'lgan bular asosda nanoo'lchamli qurilmalar va asboblar yaratish bu yanada murakkab va o'ta muhim bo'lgan nanoelektronika yo'nalishini rivojiga olib keladi.



a)

b)

10.2-rasm.a) CdS kristalining erish haroratining uning o'lchovlariga bo'g'liqligi,

b) Oltin nanozarralarining erish haroratini uning diametriga bog'liqligi ( $10\text{\AA}=1\text{ nm}$ ).

Nano o'chamli materiallar tarkibini, tuzilishini va shunga mos o'chashlarini boshqarish asosida yangi fan yo'nalishi nano muxandislik shakllanadi. Yaratilgan nanoo'chamli moddalar tuzilishi va tarkibini o'rganishga imkon beradigan – nanospektraskopiya yo'nalishi asosida tubdan yangi qurilmalar kasf etilmoqda. Quyida bu sohadagi yangi yo'nalishlar va ularning asoslari haqidagi ma'lumotlar keltirildi.

## 10.1 Nano fan yo'nalishlari va qo'llanilish sohalari

**Nanomateriallar.** Obyekt o'chamini bir, ikki yoki uch o'chamda nanometer o'chamigacha kichiklashtirish oqibatida yangi sifatlarga 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'cham De – Broyl to'lqin uzunligidagi qonuniyatlar namoyon bo'ladi.

**Nanoelektronika.** Elementlarning topologik o'chamlari 100 nmdan kichik bo'lgan integral elektron sxemalarni fizikaviy va texnologik asoslarini yaratish bilan shug'ullanadigan elektronika sohasi.

**Nanomuxandislik.** Nano o'chamli obektlar yoki strukturalar, shuningdek nanotexnologiya usullari bilan yaratilgan obekt yoki strukturalarni loyihalash, yaratish va ishlatalish bilan bog'liq bo'lgan insonning ilmiy- amaliy faoliyati.

**Nanofizika.** Nanoobektlardagi hodisalarni o'rganuvchi kondenstsiyalangan modda holati fizikasining bo'limi. Ko'pincha nanotexnologiya terminiga nanofan va nanomuxandislik ham qo'shiladi.

**Nanotexnologiya.** Struktura va shakl hosil qilish,sintez, yig'ish, materiallarni tashib yig'ish, olib tashlash va modifikatsiya qilish usullari va uslublarini to'plami. Buning ichiga yangi xossalari tizim va materiallarni yaratishga yo'naltirilgan asbobsozlik, materialshunoslik, metrologik va texnologik amallarni bilish, malaka, mahorat majmualari kiradi.

**Nanotexnika.** Nanoo'chamga o'tishda tizimning yangi xossalari va funksional imkoniyatlaridan foydalaniqlan hosil bo'ladigan mashinalar, mexanizmlar, asboblar, qurilmalar, materiallar. Bunda ular oldin erishib bo'lmagan katta o'chamli massa va energetik ko'rsatkichlar, texnik – iqtisodiy parametrlar va funksional imkoniyatlarga ega bo'ladi.

## Nanotexnologiyaning zamonaviy qo'llanilishi quyidagilarni o'z ichiga oladi:

- Yuqori darajada mustahkam bo'lgan nanokristall va amorf materiallarni, polimer asosidagi yonmas nanokompozitlarni yaratish;
- Nanoelektronika va nanofotonika elementlari, yarim o'tkazgichli tranzistorlar va lazerlar, fotodetektorlar, quyosh elementlari, sensorlar va boshqalar, keyingi avlod mikroelektronika va optoelektronikaning yupqa pardali va geterostruktura komponentalar, yumshoq va qattiq magnit materiallar;
- Axborotlarni o'ta zinch 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 nanoprinting;
- Mikro va nanomexanika qurilmalari; vktuatorlar va transduktorlar, molekulyar motorlar va nanomotorlar, nanorobotlar, integrallangan mikroelektron qurilmalar;
- Nanokimyo va kataliz, kimyo va neftekimyo sanoati uchun yonish bilan boshqariladigan, qoplamlar qoplash, elektrokimyo usullarida olinadigan nanog'ovak materiallar (katalizatorlar, adsorbentlar, molekulyar filtrlar va separatorlar);
- Issiqlik elementlari, elektr akkumulyatorlari energiya o'zgartirib beruvchi va energiyani saqlavchi qurilmalar;
- Farmatsevtika, dori va prateinlarni maqsadli yetkazib berish, biopolimerlar va biologik to'qimalarni jonlantirish, klinik va meditsina diagnostikasi, sun'iy muskullar va suyaklarni yasash, tirik organlarni implantatsiya qilish (ko'chirish), kanserogen to'qimalarni qayd etish va identifikatsiya qilish, transplantatsiya uchun petogenlar, bioqo'shila oladigan to'qimalar, dori preparatlari va boshqa ko'p narsalar;

### 10.2 Mikrozarralarning to'lqin xossalari

Yuqorida jismlarning fizik xossalari ularning o'lchomlari nanometrlar atrofida bo'lganda o'zgarishi va yangi fizik xususiyatlarga ega bo'lishini eslatib o'tgan edik. Endi bunday hodisalarni kuzatilishi uchun jismlarning o'lchamlari va ularda harakatda bo'layotgan

elektronlar qanday holat va qonuniyatlarga bo'ysinishi kerakligini aniqlash lozim bo'ladi.

Albert Eynshteyn, tashqi foto effekt hodisasi va uning qonuniyatlarini tushuntirishda uchun yorug'lik nafaqat to'lqin xossasiga, balki "foton" nomli kvazizarrachalardan tashkil topgan zarrachalar oqimidan iborat ekanligi va "foton"ning energiyasi, yorug'lik chastotasi ( $v$ ) hamda to'lqin uzunligiga bog'liq holdagi qiymatini ko'rsatib berdi va u quyidagicha ifodalanadi:

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda} = \frac{1.24}{\lambda};$$

(bunda foton energiyasi eV larda, to'lqin uzunligi mikrometrlarda hisoblanadi) Bu nazariyaga asosan, yorug'lik to'lqin 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. Eynshteyinning yorug'likni korpuskuylar-to'lqin g'oyasini rivojlantirib, bunday holat nafaqat yorug'likka xos emas, balki barcha elementar zarrachalarga, elektronlarga ham xos xususiyat degan g'oyani oldinga surdi. Bu g'oyaga asosan elektronlar to'lqin xossaga ega bo'lganda ularning impulsi:

$$P = h\nu \quad (10.1)$$

( $k$ -to'lqin soni  $k = \frac{1.24}{\lambda}$ ) ga teng bo'lib, energiyasi quyidagi formula yordamida aniqlanadi:

$$E = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2m\lambda^2} \quad (10.2)$$

(10.2)- ifoda elementar zarracha elektronning to'lqin uzunligi bilan uning energiyasi o'rtaqidagi bog'liqlikni ko'rsatadi. Shunga asosan massasi  $m$  ga teng bo'lgan elementar zarrachalarning to'lqin uzunligi quyidagi ifodaga teng bo'ladi:

$$\lambda = \frac{\hbar}{\sqrt{2mE}} \quad (10.3)$$

Lui-de Broylning taklif qilgan g'oyasi va elementar zarracha energiyasi, massasi va uning to'lqin uzunligi o'rtaqidagi bog'lanish ifodasi (10.3), 1927 yil kristalga ma'lum energiyaga ega bo'lgan

elektronning to'lqin uzunligini, kristall panjara doimiyisiga mos kelgan energiya tanlab olinganda) elektronlar oqimi yuborilganda kuzatilgan difraksiya hodisasi asosida o'z isbotini topdi. Demak haqiqatdan ham har qanday elementar zairachalar korpuskulyar va to'lqin xossasiga ega bo'lar ekan.

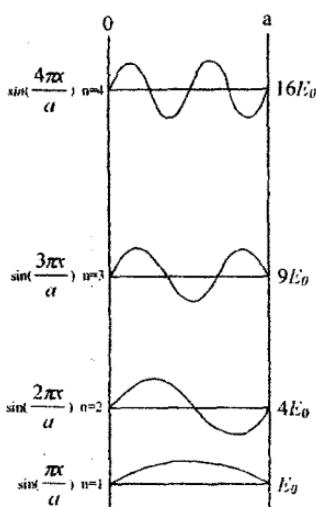
Biz (10.3) ifodaga asosan metallardagi erkin elektronlarning to'lqin uzunligi hisoblanganda  $\lambda = 0.55$  nm, yani  $\lambda = 5.5$  Å gat eng ekan. Haqiqatdan ham kristall panjara doimisi qiymatlariga mos keldi. (hisobda elektron energiyasi  $E=5$  eV= $8 \cdot 10^{-19}$  Dj, massasi  $m=9,1 \cdot 10^{-31}$  kg deb olindi)

Ifodaga asosan yarim o'tkazgichlardagi erkin elektron energiyasi hisoblansa,  $T=300K$  da,  $E=kT=0.0256$  eVga teng bo'ladi. Elektronlar yarim o'tkazgichda effektiv massaga ega bo'lganligi uchun (masalan Si,  $m=0.92m_0$ , 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 yarim o'tkazgichlarda elektronlarning De Broyl to'lqin uzunligi metallardagi elektronlar to'lqin uzunligidan juda katta ekan. Bu, yarim o'tkazgichli 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 yarim-o'tkazgichlarni sirti yoki ichida hosil qilingan nanoo'lchamli boshqa yarim o'tkazgichlardagi elektronlarning energetik holatini elektronlarning to'g'ri burchakli potensial to'siqdagi holati deb qarash mumkin. Bunday potensial to'siqda joylashgan elektron to'lqini potensial to'siq devorlaridan qaytishi va ularning interferensiyalashishi, hatto potensial to'siqdan tunnel effekti hisobiga chiqishi ham mumkin. Bu albatta potensial to'siq o'lchamlari, potensial to'siq energiyasini qiymati va potensial to'siq kengligi bilan elektronning to'lqin uzunligi munosabatlariiga bog'liq bo'ladi.



**10.3-rasm.** Potensial to'siqda elektronlarning energetik sathlari va ularning to'lqin uzunligi.

Elektronlar energiyasining uning to'lqin uzunligiga ( $\lambda$ ) bog'liqligi quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$E = \frac{h^2 \pi^2}{2mL^2} \quad (10.4)$$

Potensial to'siqda elektronlarning turg'un to'lqin hosil qilishi uchun quyidagi shart bajarilishi kerak:

$$L = \frac{\lambda}{2} \cdot n \quad (10.5)$$

L - potensial to'siq kengligi; n-kvant soni, aniq, butun qiymatga ega.

(10.4) ifodadagi  $\lambda$  ning o'rniغا uning (10.5) ifodadagi qiymatini qo'ysak, elektronning potensial to'siqdagi energetik qiymati kelib chiqadi.

$$E = \frac{h^2 \pi^2}{2mL^2} n^2 \quad (10.6)$$

(10.6) ifodadan ko'rinish 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-qiyomat bilan aniqlanadi.

$$n=1 \text{ bo'lganda } E_1 = \frac{h^2 \pi^2}{2mL^2}$$

$$n=2 \text{ bo'lganda } E_2 = \frac{h^2 \pi^2}{2mL^2} * 4 = 4E_1 \quad (10.7)$$

$$n=3 \text{ bo'lganda } E_3 = \frac{h^2 \pi^2}{2mL^2} * 9 = 9E_1$$

$$n=4 E_4 = 16E_1; n=5 E_5 = 25E_1$$

Demak, o'lchovlari katta bo'lgan yarimo'tkazgichdagi erkin elektronlarning uzluksiz energetik sathlari o'rniغا nanoo'lchamli moddalarda elektron energetik sathlarini kvantlangan bo'lishi bilan farq qiladi. Elektron energiyalari bu holda etarli darajada katta qiymatlarga ega bo'lishi ham mumkin bo'ladi. Endi yana (10.6) ifodaga e'tibor bersak, potensial to'siqni eni L oshgan sari elektronning energetik

sathlarini qiymati kamayib borishi va L juda katta bo‘lganda, ya’ni  $L >> \lambda$ , elektronning energetik sathlari orasidagi farq toboro kamayib, qariyb uzlusiz qiymatlarga ega bo‘lib qoladi. Bundan shunday xulosa kelib chiqadiki, biz 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.

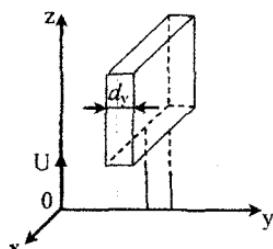
#### 10.4 Nanoo‘lchamli moddalar turlari

Moddalarning bir, ikki yoki uch koordinata yo‘nalishilarini bo‘yicha o‘lchamlar qiymatini moddagи elektronlarning de-Broyl to‘lqin uzunligini 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‘yiccha ( $X, Y$  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. Yani kvant o‘rani bo‘lishini sharti quyidagicha bo‘ladi:

$$X >> \lambda_s, Y >> \lambda_s, Z \sim \lambda_s$$

Bu degani, har qanday yarim o‘tkazgich modda sirtida qalinligi  $\lambda_s$  ga teng yupqa boshqa modda qatlami hosil qilinsh deganidir.



**10.4-rasm.** y o‘qi bo‘yicha cheklangan nanoobekt

Ikki o'lchamli (2D) nanoob'ektning bir qismini tasviri, y o'qi bo'yicha cheklangan elektronlarning harakati, x va y o'qlari elektronlar harakati bo'yiga cheklangan.

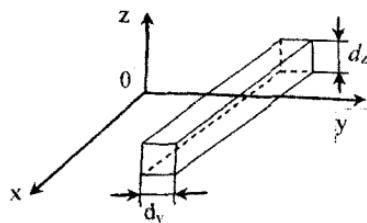
Bu holatda elektronlar yupqa qatlarning  $x$  va  $z$  yo'nalishlari bo'yicha hech qanday to'siqga uchramay harakat qila oladi, ammo y yo'nalishi bo'yicha to'siqqa duch keladi chunki u endi yupqa qatlarni muddasidan chiqish ishini yengishi kerak. Bu degani xona haroratida  $kT=0.026$  eV energiyaga ega bo'lgan elektron uchun kamida chiqish ishi  $3\div5$  eVga teng bo'lgan muddadan chiqish demakdir.

2D-kvant o'rasiiga maydonli tranzistorlarda metall bilan yarimo'tkazgich o'rtasida hosil qilingan o'ta yupqa  $\text{SiO}_2$  qatlami misol bo'la oladi.

2) Kvant ipi - 1D-bunday moddalarning ikki koordinata yo'nalishi bo'yicha o'lchamlari  $\lambda_x$ -qiyatlariga mos bo'ladi uchinchi koordinata yo'nalishi bo'yicha qiymati De-Broyl to'lqin uzunligidan ( $\lambda_x$ ) juda katta bo'ladi.

$$X \sim \lambda_x, Y \sim \lambda_x, Z \gg \lambda_x.$$

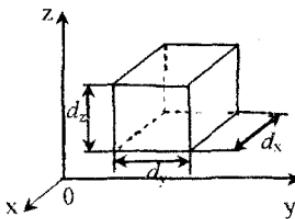
Bunday holatda elektron faqat bitta  $Z$  yo'nalish bo'yicha erkin harakat qila oladi, ammo qolgan ikki yo'nalish  $X$ ,  $Y$  bo'yicha harakati cheklanadi. Ya'ni potensial to'siqga uchraydi. Bunga misol qilib: kreminiy kristallini sirtiga eni va qalinligi  $\lambda_x$ -atrofida va uzunligi  $L \gg \lambda_x$  bo'lgan Ge yupqa qatlami 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) nanoob'ekt tasviri

3) Kvant nuqtasi 0D-bunday moddalarning uchchala koordinata yo'nalishi bo'yicha o'lchamlarqiyatini  $\lambda_x$ -atrofida bo'ladi. Ya'ni  $X \sim \lambda_x$

$Y \sim \lambda^k$ ,  $Z \sim \lambda^k$ . 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‘lchovla qiymati  $\lambda^k$  – miqdoriga teng bo‘lgan AlGaAs – nanomaterialli hosil qiladi. Bunday xolatda elektron faqat AlGaAs nanokristallida harakat qila oladi va undan tashqariga chiqsa olmaydi.



**10.6-rasm.** Nol o‘lchamli (0D) nanoob’ektning tasviri .

### 10.5 Nanoo‘lchamli kristallarda elektronlar energetik sathlari va kvant holatlar zichligi

Elektronlarning energetik sathlari va ularning kvant holatlar zichligini bilish aniqlash nanokristallarning fizik, foto va optik xossalari aniqllovchi va bunday moddalarning potensial imkoniyatlarini to‘la ochib beruvchi eng muhim omildir. Nanokristallarda energetik sathlari bu elektronlar qabul qila olishi mumkin bo‘lgan energetik holatlardir. Energetik holatlar zichligi bu elektronlarning bir birlik energiya oralig‘ida hajm va birligida joylasha olishi mumkin bo‘lgan kvant holatlar sonidir. Odatda energetik holatlar zichligi quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$g(E) = \frac{dN(E)}{dE} \quad (10.8)$$

Bu yerda  $dN(E) - E + E + \Delta E$  -oralig‘ida elektron joylashishi mumkin bo‘lgan holatlar soni. Elektronlarning energetik sathlari bo‘yicha taqsimoti, bu holda ham Fermi –Dirak taqsimoti asosida boladi.

Uch o‘lchamli odatdagisi yarimo‘tkazgich materiallarda elektron uchta yo‘nalish bo‘yicha to‘siqsiz harakat qila oladi va ularning energiyasi  $E$ ,

$$E = \frac{p^2}{2m} \cdot \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2m} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2) \quad (10.9) \text{ ga teng bo'ladi}$$

Bunda  $p$ ,  $k$ , elektronning impulsi va to'lqin funksiyasi (10.8) ga asosan materiallarning o'tkazuvchanlik sohasida elektronning energiyasi va holatlar zichligi energiya oshishi bilan uzlusiz o'zgaradi.

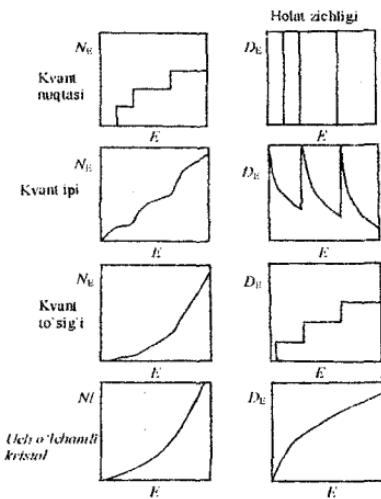
- a) Chegaralan-magan kristallda elektron ener-giyasining kvazi to'lqin vektori tashkil etuvchilariiga bog'liqligi
- 
- b) Chegaralan-magan kristallda elektronlar uchun kavnt holatlar zichligi ( $g$ ) ning energiya ( $E$ ) ga bog'liqligi.
- 

**10.7-rasm. (a) (b)**

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 uzlusiz o'zgaradi, ammo Y yo'nalishi bo'yincha ko'rsatilgandek kvant-langan diskret qiymatlarga ega bo'ladi ya'ni:

$$E = \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m} + E_n + \frac{\hbar^2 k_z^2}{2m}; \quad (10.10) \quad E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2}{m^2 L^2} * n^2; \quad (10.11) \text{ bo'ldi.}$$

Demak bu holatda elektron energiyasi uzlukli diskret qiymatlarga ega bo'ladi. Bunda  $Y$  yunalishi bo'yincha har bir kvant soniga to'g'ri kelgan energiya  $E_n$  ga mos  $X$  va  $Z$  yo'nalishlar bo'yicha uzlusiz juda ko'p energetik sathlarga ega bo'lgan qo'shimcha sohalar hosil bo'ladi. Energiyaning bunday xolati ikki o'lchamli sohalar kvantlanish deb ataladi va shunga mos energetik xolatlar zichligi esa energiya oshishi bilan uzlusiz bo'lmay pog'ona-pog'ona o'zgarishga ega bo'ladi.



### 10.8-rasm.

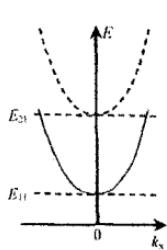
To‘g‘ri burchakli chuqurlik va Fermi-gaz nazariyasiga mos holda to‘rtta turdagи kvant tizimlar elektronlar miqdori  $N(E)$  (chapda) va holatlar zichligi  $D(E)$  ning (o‘ngda) energayaga bog‘liqligi.

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:

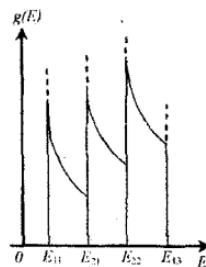
$$E = \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m} + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^* L_y^2} n_x + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^* L_z^2} * m \quad (10.12)$$

n va m=1,2,3... butun qiymatlarni qabul qiladi.

Demak bu holatda elektron energiyasining qiymatlari ikkita kvant soni n va m hamda potensial to‘sinqning Y va Z yo‘nalishlardagi kengligiga  $L_y$ ,  $L_z$ -bog‘liq bo‘ladi. Bu holatda o‘tkazuvchanlik sohasi bir o‘lchamli qo‘sishma sohalarga ajraladi (10.8-rasm). Bunday energetik kvant holatlar zichligi shunga mos holda uzulishga ega bo‘lgan tez o‘sib kamayuvchi qiymatlar majmuasidan iborat bo‘ladi.



a)



b)

**10.9. rasm.** Kvant iplari uchun energiyaning to‘lqin vektoriga (a) holatlar zichligining energiyaga bog‘liqligi (b).

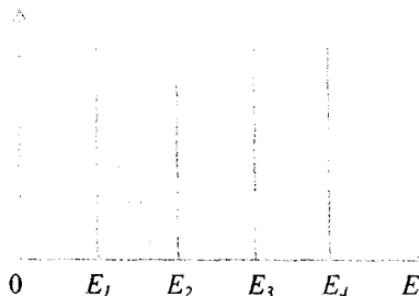
Nanoo‘lchamli kristall kvant nuqta (0D) holatida bo‘lganda elektronlar harakati barcha yo‘nalishlar buyicha chegaralangan bo‘lish bilan birga ularning energiyasi ham uchchala yo‘nalish bo‘yicha kvantlangan bo‘ladi, xuddi elektronning alovida atomdagи holatiga o‘xshash.

$$E_{n,m,k} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m} \left( \frac{n^2}{L_x^2} + \frac{m^2}{L_y^2} + \frac{k^2}{L_z^2} \right), \quad n, m, k = 1, 2, 3, \dots \quad (10.13)$$

Albatta elektron energiyasi kvant nuqta o‘lchamlari  $L_x, L_y, L_z$  ga bog‘liq bo‘lib, ularning energetik spektorlari ham bu yo‘nalishlar bo‘yicha o‘ziga xos kvantlangan bo‘ladi.

Kvant no‘qtalarida elektron energiyasi faqat diskret qiymatlarga ega bo‘lganligi uchun bunday energetik sohalar holat zichligi endi juda kichik bo‘lgan yakka maksimum chiziqlardan iborat bo‘ladi.

$g(E)$



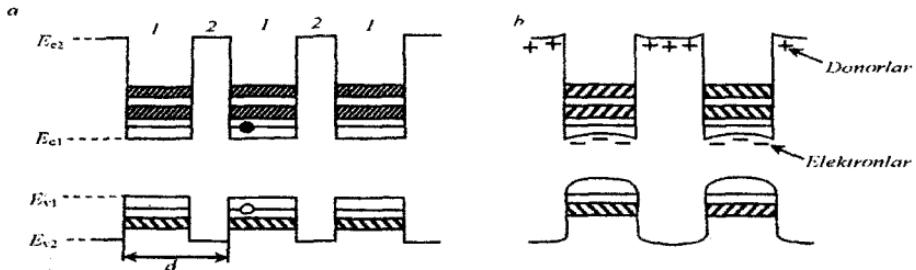
**10.10 – rasm.** Nol o‘lchamli (0D) elektron tizimi uchun holatlar zichligini funksiyasi.

## 10.6 Yarimo'tkazgichli o'ta panjaralar

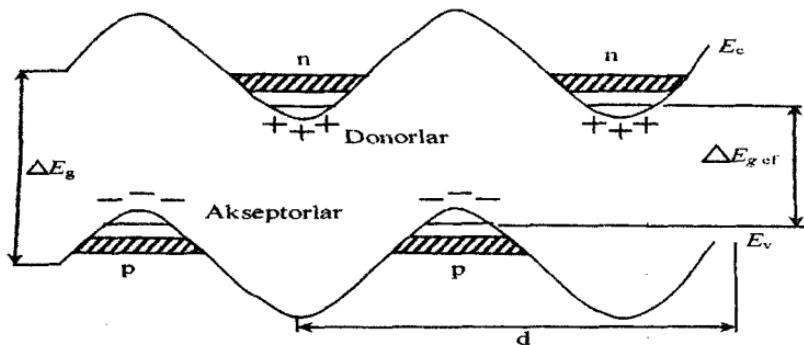
O'ta panjara bu o'zida mavjud bo'lgan davriy kristall panjara potensialidan tashqari kristall panara doimiyidan ancha katta bo'lgan ammo nanoo'lchamli boshqa davriy kristall potensialiga ega bo'lgan sun'iy kristalldir. Bu degan so'z ma'lum kristall yuzasida epitaksial yo'l bilan nanoo'lchamli boshqa kristall qatlamlarini ustma-ust, davri takrorlash usuli bilan olingan kristalldir. Bunda kristall sirt yuzasida hosil qilinayotgan boshqa nanoo'lchamli kristall qatlamlarning qalinligi 5÷10 nm atrofida bo'ladi.

Odatda ikki xil o'ta panjaraalar mavjud kompazitsion va legirlangan. Kompazitsion o'ta panjaralar har xil taqiqlangan sohaga ega bo'lgan nanoqatlamlı yarim o'tkazgichlarni ustma-ust (ketma-ket) ostirish yo'li bilan yaratiladi. Masalan GaAs kristall yuzasiga nanoo'lchamli  $In_xGaAs$ , qatlami, uning ustiga yana nanoo'lchamli GaAs qatlami ketma-ket hosil qilingan tizimidir. Legirlangan o'ta panjaraga esa, bir xil yarim o'tkazgich materialining turli xil tur o'tkazuvchanlikga ega bo'lgan, davri takrorlanib boradigan  $n-p-n-p..$  nano qatlamlar majmuasidan iborat tizimsidir. Masalan kremniy kristalli ustiga 5-10 nm o'lchovvidagi  $n$  va  $p$  tur o'tkazuvchanlikga ega bo'lgan kremniy qatlamlarni epitaksia yordamida ketama-ket davriy o'stirishdir. Bunday o'ta panjaralarning o'lchamlari bir necha  $nm$  bo'lganligi uchun, ularda elektronlar sathlari kvantlangan bo'lishi bilan birga, odatdag'i kvant to'siq yoki kvant nuqtalardan farqli xolda, kvantlangan energetik sathlar o'rniga juda tor energetik sohalar paydo bo'ladi. O'ta panjaralarda qatlamlar soni va ularning qalinligini boshqarish yo'li bilan, xosil bo'ladigan kvantlangan energetik sohalar parametrlarini boshqarish mumkin. Rasmdagidek ko'rsatilgan legirlangan o'ta panjaralarda, elektron va kovaklar bir-bridan fazoviy ajratilganligi uchun, ularning o'zaro rekombinatsiyalana olmaydi. Shuning uchun bunday strukturalarda zaryad tashuvchilarining yashash vaqtি juda katta qimatlarga ega bo'ladi.

**Quydagi rasmlarda** kompazitsion va legirlangan-kompozitsion o'ta panjaralar va ularning energetik sohalar tuzilishi ko'rsatiladi:



**10.11 - rasm.** Oddiy kompozitsion (*a*) va modulyatsiyali legirlangan (*b*) o'ta panjaralarning energetik diagrammalari:  $d$  – o'ta panjara doimiysi.



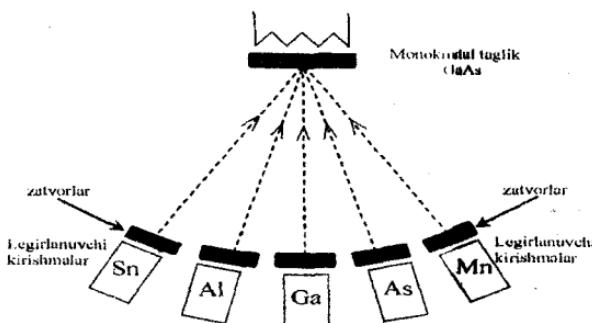
**10.12-rasm.** Legirlangan o'tapanjaraning energetik diagrammasi:  $\Delta E_{g, eff}$  – o'tapanjara taqiqlangan sohasining effektiv kengligi;  $d$  – uning davri.

## 10.7 Nanoo'chamli strukturalarni hosil qilish usullari

Nanoo'chamli strukturalarni hosil qilish usullari juda ko'p bo'lib, xozirda yanada yangi usullari yaratilmoqda. Bu paragrfda asosan yarimo'tkazgich nanomatriallarni olishda eng ko'p ishlafiladigan 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 mumkun) oqimini, tezligini, tarkibini taglikda joylashishlarini koordinatalari va o'chamlarini boshqarish imkoniyatiga ega. Bu usul taglikda hosil bo'layotgan yupqa qatlamlarning qalinligi

(bir nm aniqlik bilan) va tarkibi tuzilishini juda katta aniqlik bilan (massalar spektirametri, OJI spektrometryiya, lazer nurlari, elektron mikroskollar...) to'g'ridan - to'g'ri kuzatish, boshqarish imkonini beradigan yuqori texnologik tizimlarni amalga oshiradigan zamonaviy murakkab elektron qurulmadir (10.13-rasm )

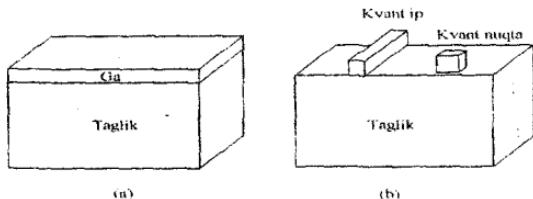


10.13-rasm. Molekulyar-nur epitaksiya qurilmasini tuzishi: GaAs tagligiga  $Al_xGa_{1-x}As$  qattiq eritma yupqa qatlami o'stirish.

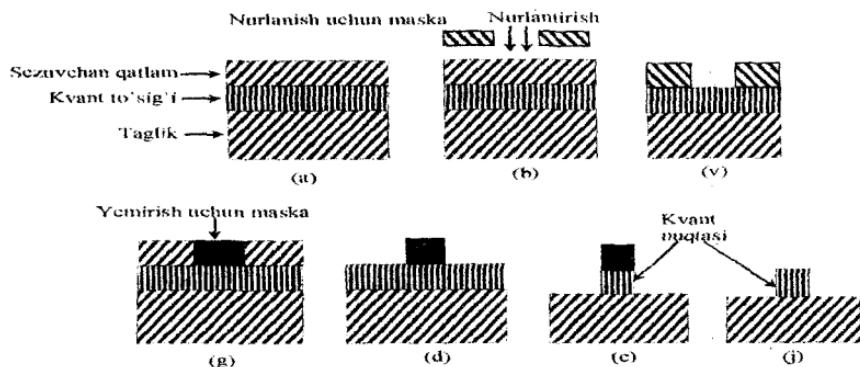
2. Kvant ipi va kvant nuqtasini hosil qilishning yana bir keng tarqalgan usuli bu **litografiya usulidir**. Yarim o'tkazgich sirtiga kvant chuqurlik qatlami hosil qilingandan sung bu qatlam ustiga juda yupqa yorig'lik ta'sirida o'z xossalirini o'zgartiradigan (erishi oson bo'ladigan) polemer  $[C_5O_2H_8]_n$  – fotorezist o'tqaziladi. Bu fotorezist ustiga kerakli shakl va o'lchovga ega bo'lgan fotoshablon o'matiladi (ma'lum texnologiya asasida yartilishi lozim bo'lgan kvant ipi yoki kivant nuqtasi shakli tushurilgan shaffof shisha ), fotoshablon ustidan hosil qilinishi kerak bo'lgan kivant ipi yoki kivant nuqtasi o'lchovlariga mos (bir necha nanometr ) to'lqin uzunlikga ega bo'lgan elektron oqimi

$\frac{h^2\pi^2}{\sqrt{2mE}}$

yuboriladi ( elektron oqimning to'lqin uzunligi bizga ma'lum  $\lambda = \frac{h^2\pi^2}{\sqrt{2mE}}$  ) shundan so'ng fotorezistli struktura ma'lum ximyaviy suyuqlik erdamida (KOH) yuvilandi, Yorug'lik tushgan joylardagi fotorezistlar yuvilib darchalar paydo qillinadi. Bu darcha ostidagi kvant o'ra qatlami ximyaviy yo'l bilan olinib tashlangandan so'ng qolgan fotorezist qoldiqlari ham ximyaviy yo'l bilan olinib tashlanadi va kristall sirtida kerakli nanoo'lchamli kvant nuqtalar hosil bo'ladi.



10.14-rasm. a) – taglik ustida arsenid galley qatlamidan tashkil topgan kvant o‘ra; b) – litografiya usuli yordamida olingan kvant ip va kvant nuqta.



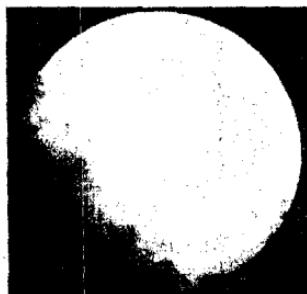
10.15-rasm. Elektron-nur litografiya usulida hosil qilinadigan kvant iplar yoki nuqtalarning olinish bosqichlari: a)-taglikdagagi kvant o‘rani himoya qatlam bilan dastlabki qoplanishi; b)-maska orqali namunani nurlantirish; v)-radiatsiyaga sezgir himoya qatlami yuvib tashlangandan keyin ko‘rinishi; g)-yemirish orqali maskani shakllantirish; d)-sezgir himoya qatlam olib tashlangandan keyingi holati; e)-kvant o‘ra materialining bir qismi yemirilgandan keyingi holat; j)-yemirish maskasini olib tashlangandan keyin nanostrukturaning so‘nggi ko‘rinishi.

Yuqorida keltirilgan usullar kvant o‘ra, kvant ip va kvant nuqtalarini kristall sirtida kerakli o‘lchov va ketma-ketliklarda hosil qilish imkonini beradi.

Ammo, kvant iplari yoki kvant nuqtalari kabi nanostrukturalarni kristall hajmida hosil qilish, ularning yanada o‘rganilmagan boshqa fizik xususiyatlarini ochishsga imkon berishi mumkin. Kristall hajmida kvant nuqtalarini hosil qilishning asosiy yo‘llaridan biri bu; kirishma atomlar

klasterlarini hosil qilishdir. Klaster ma'lum miqdordagi (bir nechta atomdan to bir necha ming atom) krishma atomlarning ma'lum bir tartibga mos xolda shakllangan tuzulishi bo'lib, kristall panjara tuzulishini o'zgartirmagan xolda uning fundamental xossalari tubdan boshqarish imkonini beradi. Krishma atom klasterlarini tashkil etgan atomlar tabiatiga qarab monoatomli yoki har xil atomli (binar kirishmalar) bo'lishi bilan birga, elektroneytral, ko'b zaryadli va yetarli magnit momentiga ega bo'lishi mumkin. Kristallning klaster shakllangan qismining xossalari boshqa qismlaridagi elektrofizik xossalardan tubdan farq qilib, mos holda klaster-yarim o'tkazgich kontaktlari, nanoo'lchamli Shottki to'siq, p-n o'tishlar, getero o'tishlar xatto varizon strukturalarni hosil qilishi mumkin.

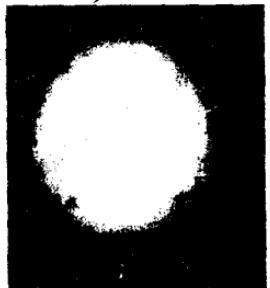
Klasterlarning shakllanishi, ularning tuzilishi, tarkibi va o'lchamlari nomuvozanat kirishma atomlari bo'lgan kristallni qo'shimcha turlixil termodinamik usullar bilan ishlov berishga bog'liq. Klassik nazariya bo'yicha hamma kirishma atomlari har qanday yarim o'tkazgichlarda klasterlar xosilqilishi mumkin ammo, ularning shakllanish jarayoni kirishma atomlarining nomuvozanat sharoitidagi diffuziya parametrlari va eruvchanligiga bog'liq. Quyidagi 10.16-rasmida nikel atomlarininng kremniy kristalida shakllangan klasterlar holati ko'rsatilgan.



a)



b)



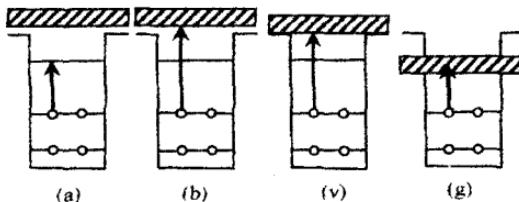
c)

10.16-rasm.Nikel atomlarining klasterlarini kremniy kristall sirtidagi holatlari:a) tekis taqsimlangan holat, b) tartiblangan holat, c) halqasimon holat. Rasmdan ko'rinish turibdiki klasterlar o'chomlarini boshqarish bilan birga ularning o'zaro holatlarini ham boshqarish mumkin ekan.

## 10.8 Nanoo'lchamli yarimo'tkazgichlar asosidagi yangi elektron qurulmalar

Oldingi paragrafda ko'rsatilgandek nanoo'lchamli yarim-o'tkazgichli materiallarda ro'y beradigan eng asosiy fizik xodisalar-bu kvant o'rasi kvant ipi va kvant nuqtalarida elektronlar energetik sathlarning kvantlangan xolatga o'tishi, unday energetik sathlar va ular orasidagi energetik masofalar qiymatini kvant o'ra, ip va nuqtalar o'chovlari bilan boshqarish mumkunligi bo'lsa ikkinchi tomondan nanoo'lchamli kirishmalarda elektronlar harakati asosan tunnel effekti xisobidan amalga oshishga. Bu materiallarning funksional xossalari asosida tubdan yangi elektron qurilmalarni yaratish imkonini berdi. Nanoo'lchamli qurulmalarni nafaqat o'zlarining o'ta kichik bo'lishi, tez ishlash xususiyati, kam energiya sarflashi bilan yangi avlod-nanoo'lchamli integral sxemalar yaratish imkonini beradi. Bunday qurulmalar haqida to'la ma'lumotni quyidagi adabiyotlardan batafsil olish mumkin. Bu paragrafda nanoo'lchamli elektron qurilmalarning ba'zilari haqida qisman ma'lumot keltirish bilan chegaralanadi.

1.*Infraqizil detektor.* Infraqizil to'lqin uzunligidagi nurlarni qabul qilib ularni elektr signallariga aylantirib beruvchi qurulmalarga – infraqizil detektorlar deyiladi. Bularga qo'yiladigan asosiy talab –katta to'lqin uzunligiga ega ( $\lambda \approx 8 \div 20 \text{ mkm}$ ) va eng kam quvvatli ( $10^{-6} \div 10^{-11} \text{ vat}$ ) infraqizil nurlarni qayd etishdir. Odadagi yarimo'tkazgich materiallar o'zlarining ta'qiqlangan soxa kengligiga, va ta'qiqlangan 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 qurulmalarni yaratishda uchun javob bera olmaydi. Bu muammoni, kvant o'ralardagi elektron satxlar orasida elektronlarni o'tishlari orqali juda oson hal qilsa bo'lar ekan.



### 10.17-rasm.

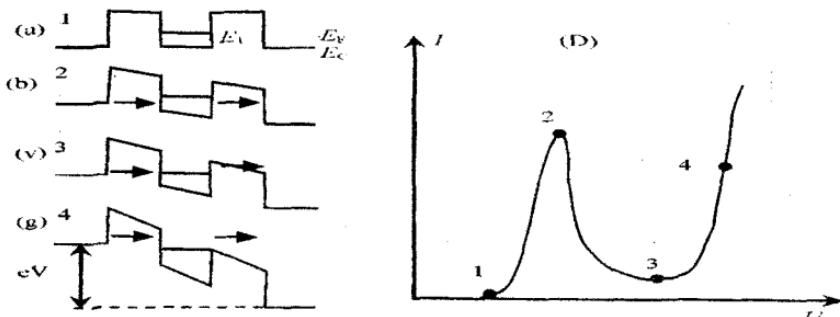
Kvant o'ralari asosidai shlaydigan IQ fotodetektorlarni quyidagi turlarining o'tkazuvchanlik sohasi (shtrixlangan) va elektronlar o'tishlarining (vertikalstrelkalar) sxematik tasvirlanishi: a) – ikki lokallashgan holatlar orasida; b) – lokallashgan holatdan sohaga; v) – bog'langan holatdan kvazi bog'langan holatga; g) – bog'langan holatdan minisohaga.

Elektron o'tishlar yuzaga kelishi uchun energetik satxlar orasidagi energiyaga mos kelgan

$$(\Delta E_1 = \frac{1.24}{\lambda_1} = E_2 - E_1, \quad \Delta E_2 = \frac{1.24}{\lambda_2} = E_3 - E_2, \quad \Delta E_3 = \frac{1.24}{\lambda_3} = E_{k2} - E_2, \quad \Delta E_4 = \frac{1.24}{\lambda_4} = E_{M2} - E_2)$$

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 signaliga aylanadi. Kvant nuqtaga ega bo'lgan bunday yarim o'tkazgich matriyali yetarli katta to'lqin uzunligiga ega bo'lgan infraqizil nurlarni qayt qilish imkonini beradi. Kvant nuqtalar majmuasini yaratish va kvant nuqtalar o'lcharmlarini boshqarish orqali nafaqat energetik sohalar energiyasini boshqarish, balki ulardag'i hosil bo'ladigan kichik energetik sathlar ham hosil qilish mumkin bo'ladi. Demak odadagi yarim o'tkazgich matriyallari qayd qila olmaydigan katta to'lqinli to'lqin uzunlikdagi infraqizil nurlarni qayd qiluvchi detektorlarni yaratish mumkin ekan. Kremniyda marganets atomlari hosil qilgan nanoklasterlar – kvant nuqtalar asosida yaratilgan infraqizil detektrlarning spektral tavsifi 10.17 rasmida keltirilgan. Rasmdan ko'rinish turubdiki, kvant nuqtalari mavjud bo'lgan kristallning nafaqat infraqizil nurni sezish sohasi yetarli darajada kengayadi (katta to'lqin uzunligi to'monga) balki, bunday kristallarning fotosezgirlik hossalari ham oshadi.

2. Resohansnli tunel diodi. Tunnel diodining ishlashi va uning volt – amper tavsifining fizik ma’nosini bizga ma’lum. Ammo xuddi tunnel diodga o’xshash, manfiy differensial qarshilikga ega bo’lgan elektron qurulmalarni 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 qurulmalar hisoblanadi. Tunel diodlar odattagilardan o’ta kam enirgiya sarfi, tez ishlashi, juda kichik o’lchamli egallashi va bir qator funksional imkoniytlari bilan odatdagagi tunnel diodidan farq qiladi. Tunel diodlarni tuzilishi kuchli legirlangan ( $n^+$ ) va taqiqlangan sohasi  $\Delta E_g \sim 2.2$  eV teng bo’lgan GaAlAs kristali orasiga joylashtirilgan kvant o’ra vazisini bajaruvchi kam legirlangan, qalinligi  $5 \div 10$  nm ga teng GaAs ( $\Delta E_g \sim 1.43$  eV) dan iborat bo’ladi. Ularning energetik sohalar diagrammasi... 10.18- rasmida ko’rsatilgan.



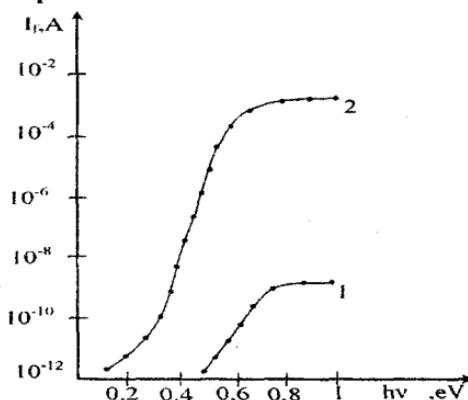
10.18-rasm. Resohans tunnel diodining o’tkazuvchanlik sohasini sxematik ko’rinishi:

- a- tashqi kuchlanish bo’lmaganda;
- b-g-qo’ylgan kuchlanishning oshishida;
- d – tizimning volt-amper tavsifi.

1- holat – ya’ni tashqi maydon qo’shilmaganda, 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  $E = e$  teng bo’lganda,  $n^+$  soxadagi Fermi sathi bilan kvant o’radagi energetik sath o’zaro mos keladi – ya’ni resohans holati yuzaga keladi. Bu holatda elektronning potensiyal to’siqdan o’tish ehtimoli keskin oshadi. Elektronning kvant o’radagi to’lqin funksyasi, u ikki potinsial to’siq

ichida turg‘un to‘lqin holatiga o‘tadi va chapdan kvant o‘raga kelgan elektron to‘lqini kvant o‘radagi elektron sathini resohans qo‘zg‘atishga olib keladi. Natijada elektronlarni potinsial to‘sqidan tunel o‘tishini ehtimoli oshadi va tunel toki eng katta qiymatga erishadi. 3- holatda kuchlanish yanada oshirilganda,  $E_i$  energetik sath  $n^+$  - qatlamdagidagi Fermi sathidan pastda bo‘ladi va elektronlarni tunel xarakati kamayadi va nihoyat to‘xtaydi. Tok eng kichik qiymatga ega bo‘ladi. Kuchlanishning yanada oshishi odatdagidagi termoemessiya hisobiga tokning oshishiga olib keladi. Demak bunday qurulmaning volt – ammper tavsifida manfiy deferinsial qarshilikda kuzatiladi. Hozirda elektronikada shunday resohans tunel diodlari asosida yaratilgan asbob va qurilmalardan ko‘plab qo‘llanilmoqda.



10.19 – rasm. Kremniy namunalarning fotootkazuvchanligini fotonlar energiyasiga bog‘liqligi: 1 – nanoklastersiz, 2 – nanoklasterli.

Nano strukturali materiallar asosida juda ko‘p yangi turdagি spektrлari boshqariladigan va juda kichik kuchlanishlarda ishlaydigan infraqizil nurli lazerlar, bitta elektronli tranzistorlar, optik modulyatorlar va boshqa elektron qurulmalar kashf etilmoqda.

### Nazorat savollari:

1. Nanoo‘lchamli moddalar deganda nimalarni tushunasiz?
2. Nanoo‘lchamli moddalarning qanday fundamental xossalari o‘zgarishi mumkin?
3. De-Broyl to‘lqin uzunligining fizik manosi va uning qiymati nimalarga bogliq?

4. Mikrozarralar( elektron, proton ) to'lqin xossalarini qaysi tajribalar asosida yaqqol ko'rsatish mumkin?
5. Fotonlarning zarracha ekanligini qaysi fizik xodisalar asosida ko'rsatish mumkin?
6. Kvant o'ra, kvant ip va kvant nuqtasi deganda nima tushuniladi? va ularning mayjudlik 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 xosil qilish maqsadga muvofiq emas?
10. Nanoo'lchamli strukturalar yaratish usullari .
11. Nanoo'lchamli strukturalarni o'rganish usullari .

### **Masalalar:**

- 1) Kremniy kristallida De – Broyl to'lqin uzunligini hisoblang.  
 $m^* = 0.69m$   $T = 100,300$  K  $n=1$
- 2) GaAs kristallida De – Broyl to'lqin uzunligi  $T=50, 150, 250$  K bo'lganda qanday qiymatga ega?  $m^* = 0.18m$
- 3) Potensial to'siq eni  $d=5,15$  va  $30$  nm bo'lgan xolda , undagi elektronlarning energetik satxlarini xisoblang.  $n=1,2,3,4$ .
- 4) Elektron , praton zarralari uchun De – Broyl to'lqin uzunligini xisoblang va tushuntiring.
- 5) Elektron energiyasi ( $E$ ) qanday qiymatlarga ega bo'lganda, elektronlar oqimi yordamida kremniy kristallida difraktsiya xodisasinì kuzatish mumkin.
- 6) Kristal panjara doimiysi  $d=3,5$  Å va  $d=5.2$  Å bo'lgan kristallarda difraktsiya hodisasini kuzatish uchun qanday energiyaga ega bo'lgan pratonlar oqimi lozim?

## Kremniyda chuqur energetik satih xosil qiluvchi kirishmalar asosida kuzatiladigan fizik xodisalar

Odatdagi kirishma atomlaridan farqli, yarimo'tkazgich materiallarida chuqur energetik satih xosil qiluvchi kirishma atomlar, nafaqat ionizatsiyalanishi energiyasining qiymatini kattaligi bilan ( $E=0,1\div0,6$  e/V) balki, energetik satihlarini soni va kirishma atomlarni kristall panjarada joylashishi, zaryadlanish darajasiga hamda kristall panjaradagi boshqa atomlar bilan murakkab komplekslar xosil bo'lish va ularni, yarimo'tkazgich materialning elektrofizik, optik, fotoelektrik xossalariiga ta'sir qilishi natijasida, ba'zi yangi fizik xodisalar kuzatildi. Shu sababli yarimo'tkazgich materiallarning funksional imkoniyatlari yanada kengayadi va ular asosida tubdan yangi asboblar va qurilmalarni yaratish mumkin bo'ldi. Bu bobda, chuqur energetik satih xosil qiluvchi kirishma atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan va nazariy tasdiqlangan ba'zi bir fizik xodisalarga oid ma'lumotlar keltirildi.

### 11. 1 Kompensatsiyalangan kremniyda foto'o'tkazuvchanlikni infraqizil nur ta'sirida so'nishi

Yarim o'tkazgich materiallarda kuzatilgan fotoelektrik xodisalar ichida materialni qo'shimcha infiraqizil (IQ) nurlar bilan yoritilgan ya'ni fon yorug'lik mavjud bo'lganda fototokning so'nish effekti ko'plab olim va mutaxassislarni qiziqtirib kelmoqda. Bu effektni o'rganish birinchidan yarimo'tkazgich materiallaridagi kirishma atomlarining fundamental parametri xisoblangan kirishma atomlarini energetik sathlarning qiymatini, tok tashuvchilarni shu energerik sathda yutilish yuzasi xaqidagi ma'lumotlarni bilish bilan birga, fon yorug'lik mavjudligida ishlay oladigan IQ fotopremniklarni yaratish imkonyatlarini ochib beradi.

Foto'o'tkazuvchanlikni IQ nurlar ta'sirida so'nishi, so'nish darajasi qiymati  $K=\frac{\sigma_f}{\sigma_f+hv}$  bilan ifodalanadi. Bunda,  $\sigma_f$  – (doimiy fon ( $hv>E_g$ ) yorug'ligi mavjud bo'lgandagi foto'o'tkazuvchanlik,  $\sigma_{f+hv}$  – foto'o'tkazuvchanlikga qo'shimcha IQ nur ta'sir etgandagi foto'o'tkazuvchanlikni qiymati. 10.1 rasmida marganets kirishma atomlari

bilan kompensatsiyalangan p-tur kremniy materialida kuzatilgan IQ nur ta'sirida fototokning so'nishi ko'rsatilgan.

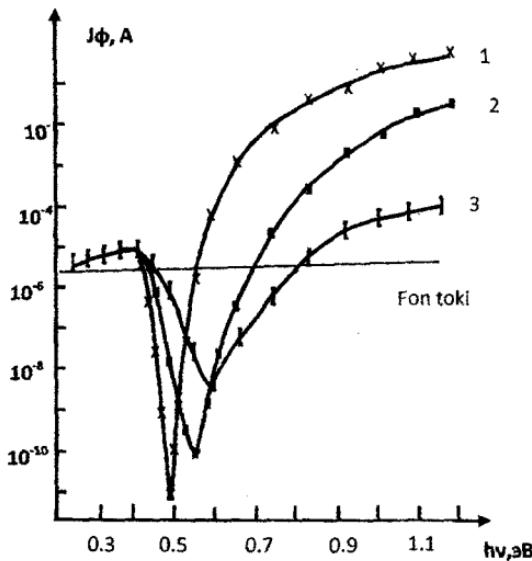
Kompensatsiyalangan kremniyda fotoottkazuvchanlikni IQ nur ta'sirida so'nishini o'rganish natijalarini taxlili asosida quyidagilar aniqlandi:

1. Fotoottkazuvchanlikni IQ nur ta'siridagi so'nish darajasini qiyimi K=10<sup>2</sup>÷10<sup>6</sup> gacha bo'lishi.

2. Materialni solishtirma qarshiligi o'zgarishi bilan IQ nur ta'sirida so'nishning kuzatilish chegarasini siljishi.

3. Materialni solishtirma qarshiligi kamayishi bilan IQ nur ta'sirida so'nishning kuzatilish spektr oralig'ini kengayishi.

Kirishma atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniyda fotoottkazuvchanlikni IQ nur ta'sirida so'nishi boshlang'ich materialdag'i kirishma bor atomlarining konsentratsiyasiga bog'liqligini o'rganish maqsadidi boshlang'ich kirishma bor atomlarini konsentratsiyasi  $N_V = 2 \cdot 10^{14} \div 2 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$  oralig'ida o'zgartirib olindi.



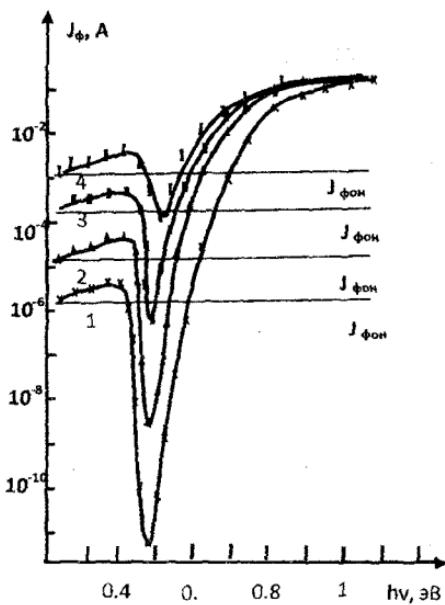
Rasm 11.1. Boshlang'ich kremniy materialidagi kirishma bor atomlarining konsentratsiyasiga bog'lq xolda fotoottkazuvchanlikni IQ nur ta'sirida so'nishi

$\rho\text{-Si}\langle\text{B}, \text{Mn}\rangle, T=80 \text{ K}, E=20 \text{ V/sm}$ :

1 -  $\rho \approx 10^5 \text{ Om} \cdot \text{sm}$  (KDB-1); 2 -  $\rho \approx 10^5 \text{ Om} \cdot \text{sm}$  (KDB-10); .

$3 - \rho \approx 10^5 \text{ Om} \cdot \text{sm}$  (KDB-100).

Tajriba natijalarini taxlili shuni ko'rsatdiki, kompensatsiyalangan kremniydag'i fotoo'kazuvchanlikni IQ nur ta'sirida so'nishining boshlanish chegarasini qiymati, so'nish darajasi, fotonlar energiyasi bo'yicha so'nish oralig'i materialning solishtirma qarshiligiga, o'tkazuvchanlik turiga, kirishma atomlamning elektrfoal konsentratsiyasiga, fon yoritilganlik qiymatiga hamda so'ndirishga sabab bo'lgan IQ nuring energiyasi va quvvatiga bog'liq ekan (10.1 va 10.2 rasm). Bu natijalarni ilmiy asoslashda, ya'ni kompensatsiyalanga kremniyda kuzatilgan fotoo'tkazuvchanlik xodisasining mexanizmini tushuntirishda Rouz tomonidan yaratilgan, taqiqlangan soha kengligida ikkita chuqr energetik satx bo'lgan klassik model asosida amalga oshirib bo'lmaydi. [ ] Bunga quyidagi tajriba natijalarini misol qilish mumkin.



Rasm 11.2. Kompensatsiyalangan kremniyda turli fon yorug'lidagi fotoo'tkazuvchanlikning so'nishini spektral bog'lanishi.  $\rho = 10^5 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ ,  $E = 20 \text{ V/sm}$ ,  $T = 80 \text{ K}$ .

$$I_4 > I_3 > I_2 > I_1 \quad I_1 = 10^{-3} \text{ lk}, \quad I_4 = 0.5 \text{ lk.}$$

1. Kompensatsiyalangan kremniydagи fotoо‘tkazuvchanlikni IQ nur ta’sirida so‘nishi  $h\nu=0,47\div0,48\text{eV}$  oralig‘ida bo‘lib, yarimo‘tkazgich materialida kuzatilganda ikkilangan optik o‘tish xodisasiga mos tushmaydi.

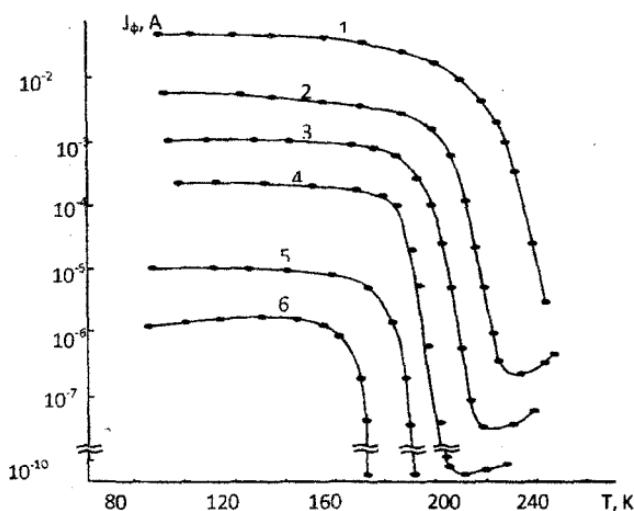
2. Fotoо‘tkazuvchanlikni IQ nur ta’sirida so‘nishi kremniy materialining solishtirma qarshiligi va kirishma atomlarning elektrfaol konsentratsiyasiga bog‘liq bo‘lishi.

3. Fotoо‘tkazuvchanlikni IQ nur ta’sirida so‘nishining darajasi  $K=10^5\div10^6$  bo‘lib, mavjud model orqali xisoblanganda so‘nishga sabab bo‘lgan energetik sathning tok tashuvchi kovaklarni yutish yuzasi, rekombinatsion markazda kovaklarni yutish yuzasida  $10^{12}$  darajasida katta bo‘lib, nazariy xisoblar natijasida mos ravishda  $S_{RMn}\approx10^{-26}\text{sm}^{-3}$  va  $S_{RR}\approx10^{-14}\text{sm}^{-3}$  tashkil etdi. Odatda tok tashuvchilarni bunday yutish yuzasiga ega bo‘lgan energetik sathlar yarimo‘tkazgich materiallarda uchramaydi.

## 11.2 Kompensatsiyalangan kremniyda fotoо‘tkazuvchanlikni harorat ta’sirida so‘nishi

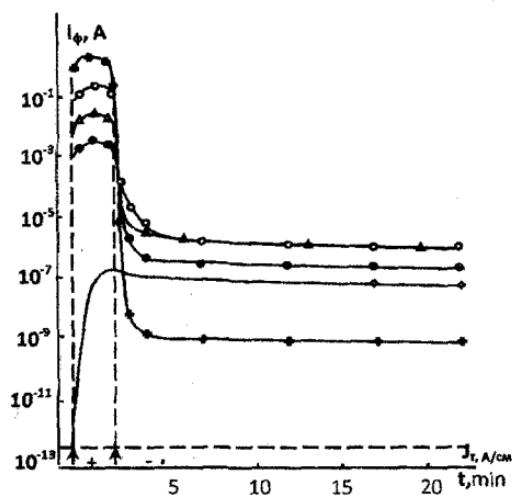
Kirishma atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan fotoо‘tkazuvchanlikni tashqi muxit haroratiga bog‘liqligini o‘rganishlar shuni ko‘rsatdiki, fotoо‘tkazuvchanlik materialni solishtirma qarshiligi va o‘tkazuvchanlik turiga qarab  $T=77\div350\text{K}$  harorati oralig‘ida kuzatilar ekan. Integral yorug‘likning turli qiymatlarida yoritilganda xosil bo‘lgan fotoо‘tkazuvchanliknin haroratga bog‘liqligi  $T=77\div200\text{K}$  oralig‘ida o‘rganilganda,  $T=140\text{K}$  dan boshlab fototokni harorat ta’sirida so‘nishi kuzatildi (10.3. rasm).

Integral yorug‘likning intensivligini ortishi bilan fototokni harorat ta’sirida so‘nishi yuqori harorat tomonga siljib bordi. Harorat ta’sirida fotoо‘tkazuvchanlikni so‘nish darajasini qiymati  $K=\frac{J_f}{J_f+t}\approx10^6\div10^7$  ga teng bo‘lib, fotokni IQ nur ta’sirida so‘nishiga qaraganda ham ko‘proq bo‘di.



Rasm 11.3. Kompensatsiyalangan kremniyda turli fon yorug'likni turli qiymatlarda fotoottkazuvchanlikni harorat ta'sirida so'nishi  $\text{Si}\langle\text{B,Mn}\rangle \approx 10^5 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ ,  $E=40 \text{ V/sm}$ : 1- 25 lk, 2-10 lk, 3- 5 lk, 4- 1 lk, 5- 0,5 lk, 6- 0,1 lk.

Kompensatsiyalangan kremniyda fototokni harorat ta'sirida so'nish effekti boshqa yarimo'tkazgich materiallarda kuzatilgan fotoottkazuvchanlikni harorat ta'sirida so'nish xodisasidan quyidagilar bilan farqlandi.



Kompensatsiyalangan kremniyda integral yorug'likning turli qiymatlarda fotoottkazuvchanlikning uzoq muddatli relaksatsiyasi  $\text{p-Si}\langle\text{B,Mn}\rangle$ -v.

1. Fototokning fon yorug'likdagи qiymatidan qattiy nazar fotoottkazuvchanlikni so'nish darajasi  $K=10^5 \div 10^7$  ni tashkil etdi.

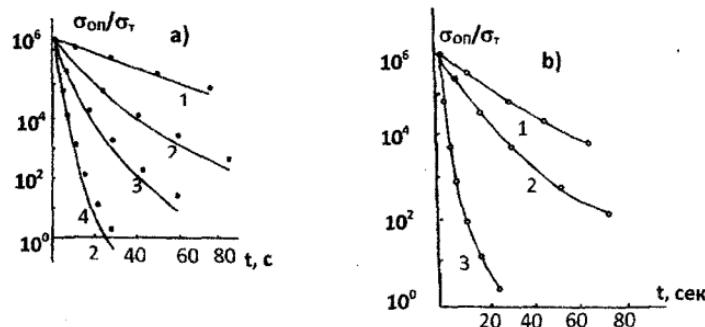
2. Fotoottkazuvchanlik ni so'nishi haroratning kichik oralig'ida kuzatilib,  $\Delta T=25 \div 30$  grad ga teng bo'ldi.

Rasm 11.4.

### 11.3 Kompensatsiyalangan kremniyda fotoo'tkazuvchanlikni uzoq muddatli relaksatsiyasi va qoldiq o'tkazuvchanlik

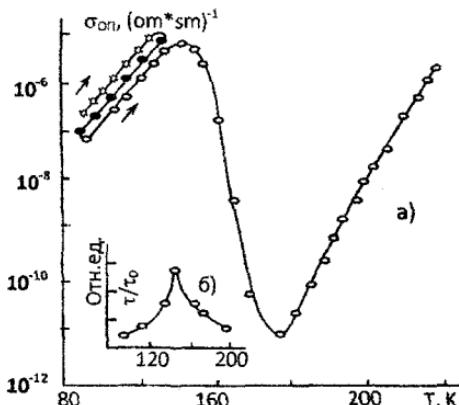
Kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan g'ayri oddiy fotoo'tkazuvchanlik xodisalardan yana biri, fotoo'tkazuvchanlik xosil qilganidan so'ng yorug'lik manbasi o'chirilsa, qorong'u xolatda fotoo'tkazuvchanlikni qiymati o'zini boshlang'ich xolatiga qaytmasdan ma'lum bir qoldiq o'tkazuvchanlikga ega bo'lar ekan. Fototokning qiymati qoldiq o'tkazuvchanlik qiymatiga birdan tushmasdan ma'lum bir vaqt oralig'ida kamayib borishi kuzatildi. Bu fizik xodisa yarimo'tkazgich materiallaridagi fotoo'tkazuvchanlikni qoldiq o'tkazuvchanligi deb nomlanadi. 10.4 rasmda kompensatsiyalangan kremniy materialida harorat  $T=77K$  bo'lganida hamda yorug'lik quvvatini turli qiymatlarida yoritib yorug'lik manbasi o'chirilganda kuzatilgan uzoq muddatli relaksatsiya va qoldiq o'tkazuvchanlikning qiymatini vaqtga bog'liq o'zgarishi ko'rsatilgan.

Kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan qoldiq o'tkazuvchanlikga IQ nur va haroratni ta'siri o'rganilganda, qoldiq o'tkazuvchanlikni IQ nur va harorat ta'sirida so'nish xodisi kuzatildi. 11.5 rasmda qoldiq o'tkazuvchanlikga IQ nur ta'sirida so'nishi ko'rsatilgan.



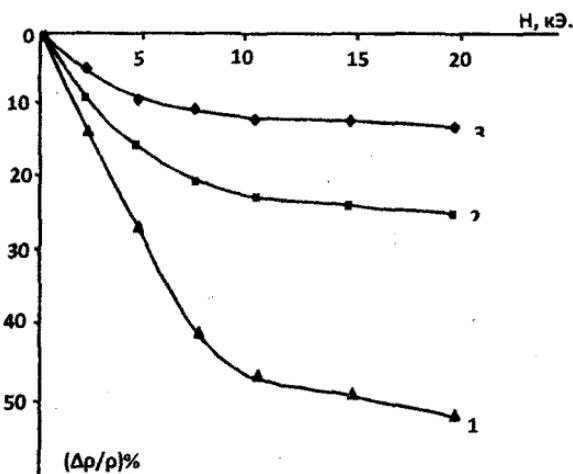
Rasm. 11.5. Kompensatsiyalangan kremniydagи qoldiq o'tkazuvchanlikni IQ nur ta'sirida so'nishi a) 1-  $h\nu=0,42$  eV, 2-  $h\nu=0,45$  eV, 3 -  $h\nu=0,5$  eV, 4 -  $h\nu=0,6$  eV; b)  $h\nu=0,62$  eV.

Rasm. 11.6. a)  
kompensatsiyalangan  
kremniydagи qoldiq  
o'tkazuvchanlikni harorat  
ta; sirida so'nishi ta'sirini  
so'nishi



#### 11.4 Kompensatsiyalangan kremniyda manfiy magnit qarshilik

Marganets kirishma atomlari bilan kompensatsiyalangan p-turdagi kremniy materialiga magnit maydon kuchlanganligining ta'sirini o'rganishda boshlang'ich kremniy materialidagi bor atomlarini konsentratsiyasini turli qiymatlarida, ya'ni  $N_V=2\cdot10^{14}\div2\cdot10^{16}\text{ sm}^{-3}$  oralig'ida tanlab olindi. Past haroratli diffuzion usul yordamida marganets kirishma atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniy materiali olinganidan so'ng, solishtirma qarshiligi  $\rho\approx6\cdot10^3\text{ Om}\cdot\text{sm}$ , boshlang'ich bor atomlarining konsentratsiyasi  $N_V=2\cdot10^{14}, 2\cdot10^{15}, 2\cdot10^{16}\text{ sm}^{-3}$  qiymatlarda bo'lган namunalarda tajribalar o'tkazildi (11.7 rasm).



11.7 Rasm.. Marganets kirishma atomlarining elektrofaol konsentratsiyasini miqdoriga nisbatan solishtirma qarshilikni magnit maydon kuchlanganligini qiymatiga bog'liqligi.

Si<sub>B,Mn</sub>I=150 lk, E=100 V/cm, T=300 K, 1-ρ=6,3·10<sup>3</sup>Om·cm (KDB -1),

2-ρ=6,3·10<sup>3</sup> Om·cm (KDB -10), 3-ρ=6,5·10<sup>3</sup> Om·cm (KDB -100).

Rasmdan ko'rinaridiki marganets atomlari bilan kompensatsiyalangan p-turdagi kremniy materialida manfiy magnit qarshilik kuzatildi. Magnit maydon kuchlanganligini qiymati oshib borishi bilan manfiy magnit qarshilikni qiymati ham oshib bordi. Boshlang'ich kremniy materialida bor atomlarining konsentratsiya miqdori ko'p bo'lganida manfiy magnit qarshilikni qiymati ham katta bo'lish kuzatiladi.

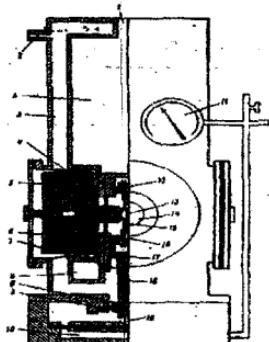
Manfiy magnit qarshilikni qiymati nafaqat boshlang'ich kremniy materialidagi bor atomlarining konsentratsiyasini qiymatiga, balki tashqi ta'sirlarga, ya'ni haroratga, yoritilganlik va elektr maydon kuchlanganligining qiymatiga, tushayotgan monoxramatik nurning to'lqin uzunligiga bog'liq ekan. Yuqorida sanab o'tilgan tashqi ta'sirlarni boshqarib manfiy magnit qarshilikni vujudga keltirish va turg'un kuzatilish mumkinligi aniqlandi.

## 11.5 Kirishma atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniyni tenzo xususiyatlari

Mikroelektronikani rivojlanishida, texnikani avtomatlashtirishda, zamonaviy kompyuterlarni yaratishda, texnologik jarayonlarni takomillashtirishda yangi, elektrfizik parametrлari tashqi ta'sirlarga o'tasezgir bo'lgan yarimo'tkazgich materiallar asosidagi datchiklarni yaratishni talab etmoqda. Kompensatsiyalangan kremniy materialining elektrfizik parametrлari mehanik ta'sirlarga (bir o'qli yoki har tomonlama bosim) o'tasezgirligi tajribalardan aniqlandi. Kompensatsiyalangan kremniyning elektrfizik parametrлariga bir o'qli va har tomonlama bosimning ta'sirini o'rganish natijalari asosida kirishma atomlarni kremniy kristall panjarasida joylashishi, materialning taqilangan sohasining energetik qiymatini o'zgarishi, xosil bo'ladigan klasterlarda atomlarni soni va zaryadi haqida ma'lumotlarni berishi bilan birga, bu materiallar asosida tashqi bosimni o'chovchi va nazorat qiluvchi tenzodatchiklar hamda qurilmalarni yaratish imkonini beradi.

### **11.5.1 Kompensatsiyalangan kremniyning tenzoxususiyatlarini o'rganishdagi tajriba qurilmalari bir o'qli bosim xosil qilish qurilmasi**

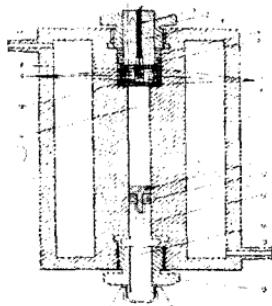
Bir o'qli bosim xosil qilish qurilmasini tuzilishi 11.8 rasmida ko'rsatildi. Bu qurilma haroratni  $T=100\div400K$  oralig'ida turg'un ushlay oladigan hamda tajriba o'tkazilayotgan yarimo'tkazgich materialini integral va monoxramatik nurlar bilan yorish, magnit maydon kuchlanganligini ta'sir ettirish imkoniyatlari mavjud etib yaratilindi. Qurilmani ko'rinishi 11.9 rasmada berildi.



**Rasm. 11.9. Yarimo'tkazgich materiallar va sturkturalarning bir o'qli bosim ta'sirida tenzo xususiyatini o'rganuvchi qurilma.**

Har tomonlama gidrostatik bosim xosil qilish qurilmasi

Kompensatsiyalangan kremniydagи kirishma atomlarining holatini hamda materialning elektrfizik parametrlariga gidrostatik har tomonlama bosim ta'sirni o'rganishda  $R=10^9$  Pa gacha yuqori bosimni olish imkonini beradigan bronza kameradan foydalanildi. Kameraning ichiga har tomonlama tekis ta'sir etuvchi bosimni xosil qilish uchun PES-5 markali texnik yog'i quyildi. Bu turdagи yog' keng harorat oralig'ida har tomonlama bosimni  $R=1,6\cdot10^9$  Pa gacha olish imkonini beradi (11.10 rasm).



**Rasm. 11.10. Xar tomonlama yuqori bosim xosil qilish kamerasi.**

## **11.6 Kirishma atomlar bilan kompensatsiyalangan kremniyning tenzo xususiyatlari**

Bir o'qli bosim ta'sirida yarimo'tkazgich materiallarda kuzatilgan deformatsion effektlerining fizik mexanizmi, kirishma atomlarining chuqur energetik sathlarini siljishi natijasida tok tashuvchi elektron yoki kovaklarning konsentratsiyasini va xarakatlanganligini o'zgarishi bilan tushuntirilgan. Shu sababli, kompensatsiyalangan kremniyning elektro'tkazuvchanligi va Xoll doimiysini bir o'qli bosim ta'sirida o'rganish, kremniyda chuqur energetik sath xosil qiladigan kirishma atomlarning xolati va ularning ionlashish energiyasini qiymati haqida ko'plab ma'lumotlarni olish imkonini beradi.

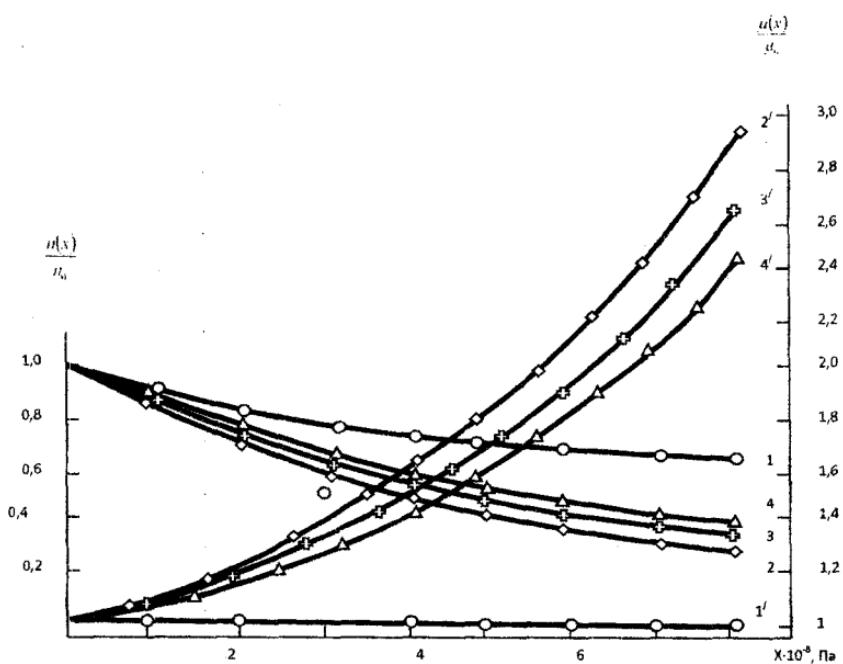
Rasm 11.11 Kompensatsiyalangan kremniyda bir o'qli bosim ta'sirida kovaklarning xarakatlanganligini o'zgarishi

Yuqoridagi rasmdan ko'rindiki, kompensatsiyalangan kremniy materialining solishtirma qarshiligini qiymati ortib borgan sari tok tashuvchi kovaklarni xarakatianligining qiymatini kamayib borar ekan. Xarakatianligning qiymatini o'zgarishi  $<111>$  kristall o'qi asosida o'stirilgan kremniy namunalarida boshqa  $<110>$  va  $<100>$  kristall o'qlarida o'stirilganlariga qaraganda katta bo'lishi kazatildi. Materialning solishtirma qarshiligi va Xoll doyimiysining qiymatlarini bir o'qli bosim ta'sirida o'zgarishdagi natijalarni inobatga olib amalga oshirilgan nazariy xisoblar yordamida tok tashuvchi elektronlarning

konsentratsiyasi va xarakatianligini qiymati xisoblandi. Xisoblash natijasida aniqlangan kattaliklar 11.12 rasmida berildi.

Olingan natijalar asosida kompensatsiyalangan n-turdagi kremniyda kuzatilgan tenzoqarshilik effekti bir o'qli bosim ta'sirida faqat elektronlarning xarakatchanligini o'zgarishigacha bog'liq bo'lmay, ularni konsentratsiyasiga ham bog'liq ekan.

Bir o'qli bosim ta'sirida  $<100>$ ,  $<110>$  va  $<111>$  kristall o'qlar asosida o'stirilgan materiallarda elektronlar xarakatchanlikning kamayishini, kremniyning o'tkazuvchanlik sohasidagi 6 ta energetik sohalarning minimumlarini materialni kristallografik o'q yo'nalishiga bog'liq xolda o'zgarishi bilan tushuntirish mumkin.

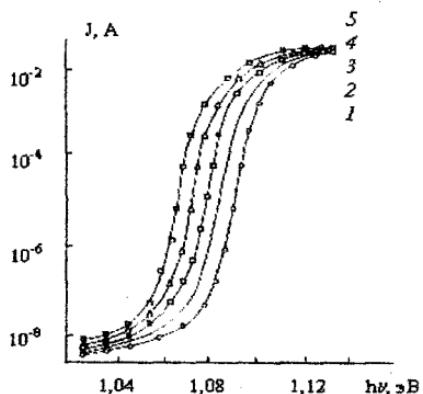


Rasm. 11.12 boshlang'ich KEF-80 va kompetsiyalangan kremniydag'i elektronlar harakatlanganligi va konsentratsiyasini bir o'qli bosim ta'sirida o'zgarishi n-Si<B, Mn> {J||X||<100>} i T=300K. КЭФ-80 Ом·см; n-Si<B, Mn>; 2-  $\rho = 4$  Ом·см; 3-  $\rho = 5 \cdot 10^3$  Ом·см; 4-  $\rho = 1,3 \cdot 10^5$  Ом·см.

Kompensatsiyalangan kremniydagи fotoо‘tkazuvchanlik xodisasiga bir o‘qli bosimning (BO‘B) ta’sirini o‘rganish kremniyda chuqur energetik sath xosil qiluvchi va fotoо‘tkazuvchanlik xodisasiga asosiy sababchi bo‘lgan kirishma atomlarni energetik sathlari haqida qimmatli ma’lumotlarni beradi. Shu sababli, kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan foto о‘tkazuvchanlik, fotoо‘tkazuvchanlikni IQ nurlar ta’sirida so‘nishi, qoldiq fotoо‘tkazuvchanlik kabi xodisa va effektlarga bir o‘qli bosimning ta’siri o‘rganildi.

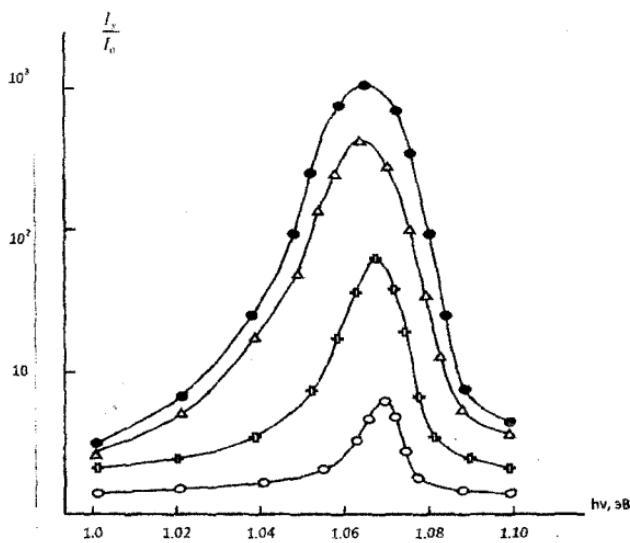
### **11.7 Bir o‘qli bosimni kompensatsiyalangan kremniydagи fotoо‘tkazuvchanlik xodisasiga ta’siri**

Kompensatsiyalangan kremniydagи fotoо‘tkazuvchanlik xodisasiga bir o‘qli bosim ta’sir etgandagi tajriba natijalari 11.13 rasmida berildi.

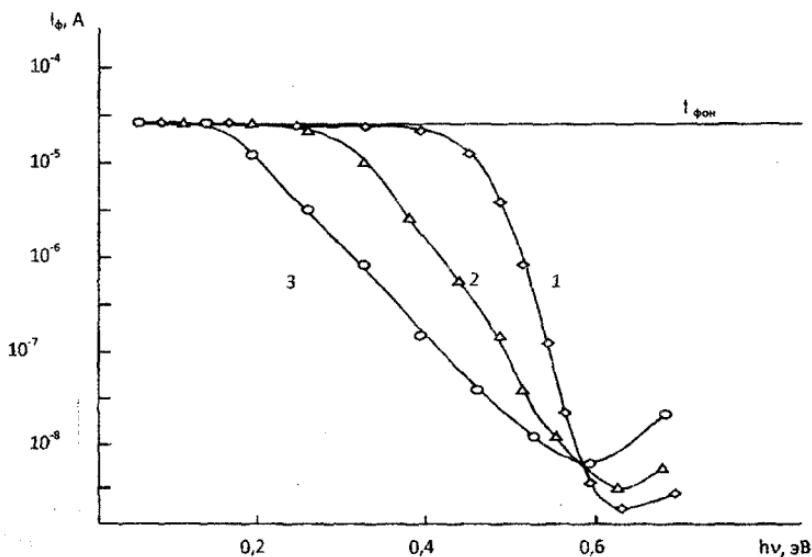


Расм. 11.13.  
kompetsiyalangan kremniydagи  
foto о‘tkazuvchanlikni spectral  
bog‘lanishigabir o‘qli bosimni  
ta’siri Si<B,Mn>  
 $T=80\text{K}$ .  $\{J//X//<100>\}$ : 1-  
 $X=10^5 \text{ Pa}$ , 2- $X=2 \cdot 10^8 \text{ Pa}$ , 3-  
 $X=4 \cdot 10^8 \text{ Pa}$ , 4- $X=6 \cdot 10^8 \text{ Pa}$ , 5-  
 $X=8 \cdot 10^8 \text{ Pa}$

Kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan IQ nur ta’sirida foto о‘tkazuvchanlikni so‘nish xodisasiga BO‘B ning ta’sirini o‘rganish natijalari 11.13 va 11.14 rasmlarda berildi.



Rasm. 11.14. kompetsiyalangan kremniydagи foto'tkazuvchanlikni IQ nur ta'siridaagi so'nishini bir o'qli bosim qiymatiga bog'liqиги  $I_\phi/I_0$  (f(x))  $\Phi\pi$  Si<B,Mn> при  $T=77$  К. {J//X//<100>}: 1-  $X=2 \cdot 10^8$  Па; 2-  $X=4 \cdot 10^8$  Па; 3-  $X=8 \cdot 10^8$  Па.

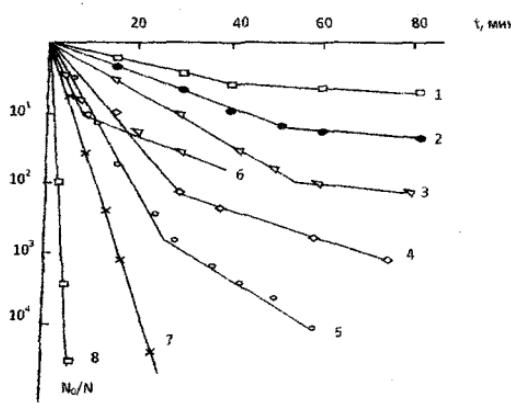


Rasm.. 11.15. kompetsiyalangan kremniydagи foto'tkazuvchanlikni IQ nur ta'siridaagi so'nishini bir o'qli bosim qiymatiga bog'liqиги Si<B, Mn>. J//X//<100>. 1-  $X=10^5$  Па; 2 -  $X=4 \cdot 10^8$  Па; 3 -  $X=8 \cdot 10^8$  Па.

Tajriba natijalaridan ko'rinaladi, fotootkazuvchanlikni IQ nur ta'sirida so'nish chegarasi BO'B ta'sirining qiymati oshgan sari fotonlarni kichik energiya qiymati tomon siljir ekan.

### 11.8 Har tomonlama gidrostatik bosimni kompensatsiyalangan kremniydagи kirishma atomlarining xolatiga ta'siri

Kirishma atomlari bilan kompensatsiyalangan har qanday yarimo'tkazgich materiallarda kirishma atomlar xajm bo'yicha teng taqsimlanmaydi. Natijada, yarimo'tkazgichning kristall panjarasida kirishma atomlarni to'planishlari, turli kompleks va klasterlari xosil bo'lishi kuzatiladi. Bu o'z navbatida yarimo'tkazgich materialining xajmida kuchli ichki elektrostatik maydonlar va mexanik kuchlanishlarni vujudga kelishiga hamda kristall panjara simmetriyasining buzilishiga olib keladi. Bunday yarimo'tkazgich materiallarga har tomonlama gidrostatik bosim berilib va nisbatan past haroratlarda qizdirilsa kristall panjara simmetriyasi tiklanib, kirishma



atomlar va nuqsonlar xosil qilgan xajmiy ichki elektrostatik maydon va mexanik kuchlanishlarni ta'siri yo'qolar ekan.

Расм 11.16. kompetsiyalangan kremniyda Mn kirishma atomlarining klasterlari kinetikasi Si-Mn T=423 K: 1-  $X = 10^5$  Па, 2-  $X=3 \cdot 10^8$  Па, 3-  $X=6 \cdot 10^8$  Па, 4-  $X=9 \cdot 10^8$  Па. Т = 438К; 5-  $X=6 \cdot 10^8$  Па. Т=473К; 6-X=10<sup>5</sup>Па, 7-  $X=6 \cdot 10^8$  Па. Т=448 К; 8-  $X=6 \cdot 10^8$  Па.

Tajriba natijalari asosida, haroratli ishlov berishda harorat va vaqtini boshqarib kirishma atomlarining elektrofaol konsentrasiyasini o'zgartirish mumkinligi ko'rsatib berildi (11.16 rasm). Harorat  $T=175^{\circ}\text{C}$  da, har tomonlama bosim qiymati  $R=6 \cdot 10^8 \text{ Pa}$  va haroratli ishlov berish vaqtini  $t=25 \pm 30$  minut bo'lganda kampensatsiyalangan kremniy materialining elektrfizik parametrlari yarimo'tkazgich kremniyi boshlang'ich xoldagi qiyamatlariga qaytib keldi. Bu tajribalar, har tomonlama bosim ta'sirida kampensatsiyalangan kremniyda kirishma atomlar xosil qilgan turli klaster va birikmalarini parchalanishi hamda zaryad qiyamatini o'zgarish tezligi boshqa turdag'i tashqi ta'sirlarning natijalaridan ko'ra tezroq sodir bo'lar ekan.

Bu ilmiy xulosaga kelish uchun o'tkazilgan tajribalarda kirishma atomlari bilan kampensatsiyalangan kremniy materiali bir xil geometrik shakilda tayyorlab olindi va ularni solishtirma qarshiliqi xam bir xil qiyatlarda olindi.

### **Kirishma atomlari bo'lgan kremniydagi avtotebranish xodisalar**

XX-asrning 60-yillarda ayrim yarimo'tkazgichli materiallarda doimiy tokning avtotebranishi ma'lum termodinamik shart-sharoitida vujudga kelishi aniqlandi hamda olim va mutaxassislar tomonidan o'rganila boshlandi. Xozirgi davrgacha mutaxassislar tomonidan elementar (kremniy, germaniy) va birikmali ( $\text{A}^{\text{II}} \text{ V}^{\text{VI}}$ ;  $\text{A}^{\text{III}} \text{ V}^{\text{V}}$ ) yarimo'tkazgich materiallarda va yupqa epitaksial qatlamlarda tabiatini turli mexanizimlarga bog'liq bo'lgan tokning avtotebranishlari o'rganildi va ular asosida yaratilgan qattiq jismli generatorlardan texnikada foydalanishda ko'plab ixtiolar taklif etildi.

Yuqorida aytganimizdek, tokni avtotebranishi ko'plab yarimo'tkazgich materiallar va strukturalarda kuzatilgan bo'lib, ularni paydo bo'lish sharti, tebranish chastotasi va vujudga kelishidagi termodinamik shart-sharoitlarining tabiatini turlicha bo'lib, avtotebranishlarni xususiyatlariga qarab quyidagi turlarga bo'lish mumkin.

1. Yarimo'tkazgich materiallaridagi tok tashuvchi zarrachalarning rekobinatsiya vaqtini haroratga nochiziq bog'liqligi.

2. Yarimo'tkazgich materiallaridagi tok tashuvchilarning xarakat-chaligi va rekombinatsiya vaqtini haroratga nochiziq bog'liqligi.

3. Yarimo'tkazgichlarda harorat-elektrik noturg'unligi asosidagi avtotebranishlar.

4. Segnetoelektrikdagи radiochastota maydonining Kyuri nuqtasi yaqinida haroratni nochiziqligi asosidagi trigger muxit.

5. Lazer nurlari ta'sirida yarimo'tkazgich materiallarini qizdirganda xosil bo'ladigan nomuvozanat xolatdagi avtotebranishlar.

6. Yarimo'tkazgich materialidagi tok tashuvchilarni konsentratsiya va konsentratsiya – elektr maydon xolatiga bog'liq bo'lgan avtotebranishlar.

11.1 jadvalda yarimo'tkazgich materiallarda kuzatilgan avtotebranish xodisalari va ularni kuzatilish shart-sharoiti hamda parametrlari haqida ba'zi ma'lumotlar berildi.

Mualliflar	Mater- ial	Mate- rialni solish- tirma qarshi- ligi R,Om· sm	Ha- rorat ora- lig'i T,K	Vujudga kelish elektr maydon kuchlan- ganligi V/sm	Ampli- tuda I,A	CHas- tota F,Gs	Kuza- tilish sharti
1	2	3	4	5	6	7	8
L.V.Vinitsky va boshqalar Rossiya	SdSe	$10^6$	$77 \div 100$	$10^3 \div 10^5$	$1 \cdot 10^{-1}$	$10^{-3} \div 1$	Integral va mo- noxra- matik yo- rug'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)	$10^5$	77	$3 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^{-6}$	$10^{-1} \div 3 \cdot 10^{-1}$	Mono- xramatik yorug'lik $\lambda=2$ mkm
Y.U.K. Vishakas va boshqalar Litva	CdSe	$10^6 \div 10^{10}$	$200 \div 300$	200	$10^{-4}$	$10 \div 10^{-3}$	Mono- xramatik yorug'lik $\lambda=0.71$ mkm

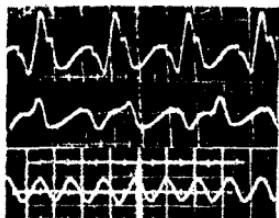
K.S. Germanova (Bolgariya)	CdS	$10^6$	$270 \div 340$	$5 \cdot 10^3 \div 10^4$	$2 \cdot 10^{-4}$	$10^{-3} \div 10^{-1}$	Mono-xramatik yorug'lik $\lambda=0.8$ mkm
N.Y.A. Xaffman (Germaniya)	CdS	$10^6 \div 10^8$	$240 \div 300$	$5 \cdot 10^2 \div 6 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^{-7}$	$10^{-3} \div 10^{-1}$	Mono-xramatik yorug'lik $\lambda=0.895$ mkm
R.Koet va boshqalar (Germaniya)	SdS	$10^6 \div 10^7$	300	150	$10^{-3}$	$10^{-3} \div 10^{-1}$	Mono-xramatik yorug'lik $\lambda=0.73$ mkm
A.SH.Abdin ov va boshqalar Azarbayon	InSe	$10^3 \div 10^6$	$77 \div 120$	300	$10^{-3}$	$10^{-1} \div 10^{-2}$	Mono-xramatik yorug'lik $\lambda=0.7 \div 1.9$ mkm
S.G. Kalvenas Latviya	n-Si	$4 \cdot 10^2$	77	80	$2 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-2}$	Mono-xramatik yorug'lik $\lambda=0.62$ mkm
L.L.Golik va boshqalar Rossiya	SdSe	$10^6 \div 10^7$	$77 \div 100$ $250 \div 300$	$10^3$	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$10^{-2} \div 10^{-1}$	Integral va monoxramatik yorug'lik $\lambda=0.52 \div 1.0$ mkm
M.K. Baxadirxonov va boshqalar O'zbekiston	Si<Mn>	$5 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^5 R$	$77 \div 200$	$150 \div 30$	0,3	$10^{-3} \div 10^{-1}$	Integral yorug'lik $J=10^{-3} \div 50$ lk
M.K. Baxadirxonov va boshqalar O'zbekiston	Si<Zn>	$20 \div 10^5 R$	$77 \div 80$	$150 \div 20$	0,2	$10^{-3} \div 10^{-1}$	Mono-xramatik yorug'lik $\lambda=1 \div 3.5$ mkm
M.K. Baxadirxonov va boshqalar O'zbekiston	Si<Zn>	$10^3 \div 10^5 R$	$77 \div 40$	$300 \div 600$	1,0	$10^{-3} \div 10^{-1}$	

M.K. Baxadirxonov va boshqalar O'zbekiston	Si<B, Mn>	$10^3 \div 10^5$	$200 \div 350$	$40 \div 200$	$(1 \div 20) \cdot 10^{-6}$	$(0.5 \div 2) \cdot 10^{-3}$	$20 \div 30$
M.K. Baxadirxonov va boshqalar O'zbekiston	Si<B, S>	$10^2 \div 10^5$	$250 \div 300$	$250 \div 300$	$10^3 \div 10^4$	30	$10^3 \div 10^4$

## 11.9 Kompensatsiyalangan kremniydagи 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 tabiatini turli xil bo'lgan avtotebranishlarni vujudga kelishi aniqlandi hamda o'rganildi.

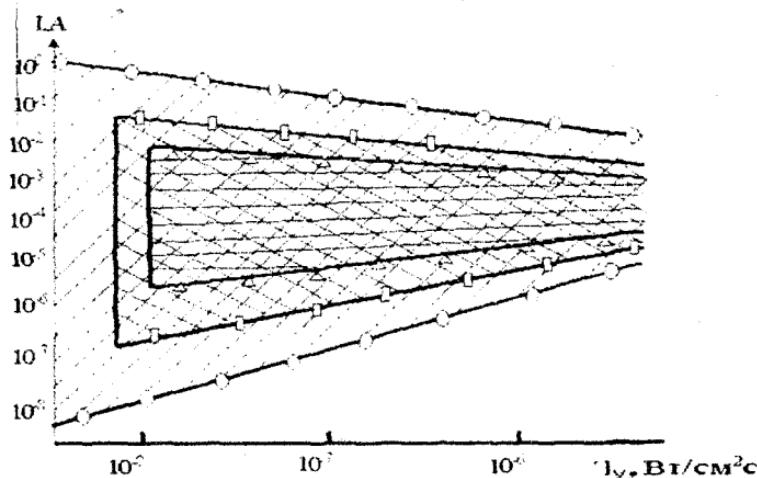
Maganets, rux yoki oltingugurt kirishma atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniy namunalarining volt-amper tavsifini (VAT) manfiy differensial o'tkazuvchanlik kuzatilgan qismida ma'lum termodinamik shart-sharoitlarda tokni past chastotali ( $f=10^3 \div 10^4$  Gs) avtotebranishlari kuzatildi.



Rasm-11.17. Kompensatsiyalangan kremniydagи past chastotali avtotebranishlar shakli

Bunday tebranishlar sinusoidal, cho'qqisimon, qo'shimcha garmonikalı hamda stoxastik ko'rinishlarda namoyon bo'ladi (11.17 rasm). Tashqi ta'sirlarni (harorat, yoritilganlik, elektr va magnit maydon

kuchlanganliklari, bir o'qli bosim) boshqarib sanab o'tilgan avtotebranish shakillarini turg'un xolatda vujudga keltirish va avtotebranish parametrlarini (*Eb*, *I<sub>f</sub>*) oson boshqarish mumkinligi ko'rsatib berildi. Kuzatilgan past chastotali avtotebranishlarning ahamiyati shundaki, tebranish amplitudasini qiymati g'ayrioddiy katta bo'lib, modulyasiya koeffitsenti ~ 100%ni tashkil etdi. Kremniyga kiritilgan kirishma atomlarini kristall panjaradagi xolatiga va xosil qilingan klasterlarining zaryad qiymatiga qarab avtotebranishni kuzatilishi mumkin bo'lgan chegaraviy qiymatlari aniqlandi (11.18 rasm).



Rasm. 11.18 Marganets atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniydagи past chastotali avtotebranish amplitudasini monoxramatik yorug'lik quvvatiga bog'liqligi.

$$O-N_{Mn}=2 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}, -N_{Mn}=2 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}, \Delta-N_{Mn}=2 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}, \\ T=80 \text{ K}, E=400 \text{ V/sm}, h\nu=1,12 \text{ eV}.$$

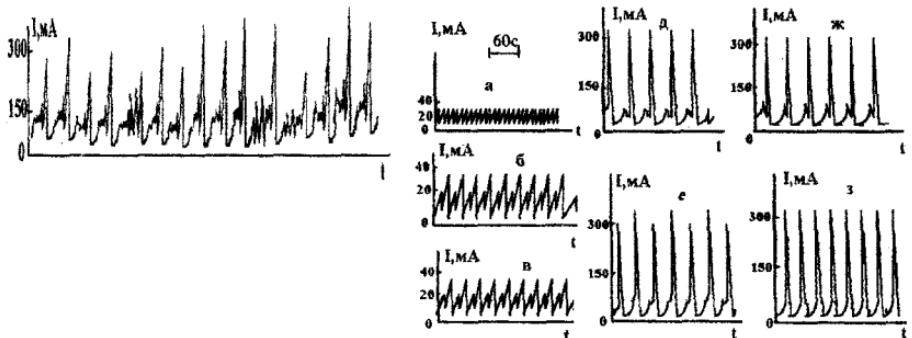
Past chastotali avtotebranishning parametrlarini kirishma atomlarining turiga bog'liqligi o'rganilganda, parametrlarini qiymati va harorati hamda yorug'lik ta'sirida kuzatilishi marganets atomlari kiritilgan kremniyda, rux va oltingugurt atomlari kiritilgan kremniy namunalariga nisbatan keng sohada kuzatildi.

## **11.10 Kompensatsiyalangan kremniydagи avtotebranishlarnи dinamik xaos va gisteresis xolati**

Xozirgi kunda yarimo'tkazgich materiallardagi avtotebranishlarda xosil bo'ladigan dinamik xaos va gisteresisni o'rganishga qiziqish kun sayin oshib bormoqda. Chunki, nochiziq xisoblangan 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, kimyoiy reaksiyalarni taxlili, biologik jarayonlar, tibbiyot va boshqalarni misol qilib ko'rsatish mumkin.

Kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan avtotebranishlar ham materialning elektrofizik parametrlarini nomuvozanat xolatdan chiqarganda kuzatilgan bo'lib, ma'lum termodinamik shart-sharoitlarda avtotebranishlar dinamik xaos xolatiga o'tdi. Kompensatsiyalangan kremniydagи avtotebranishlarda xosil bo'ladigan dinamik xaosni o'rganish chuqur energetik sath xosil qiladigan kirishma atomlar haqida qo'shimcha fundamental ma'lumotlarni berishi bilan bir qatorda, amaliyotda avtotebranishlardan foydalanishda yangi funksional imkoniyatlarni ochib beradi. Bundan tashqari, kompensatsiyalangan kremniy materialini yangi material sifatida o'rganish xozirda noma'lum bo'lgan fizik xodisalar va effektlarni ochilishiga ham sabab bo'lishi mumkin.

Kompensatsiyalangan kremniyda monoxramatik nur ta'sirida vujudga kelgan avtotebranishlarni dinamik xaosga o'tishi materialga qo'yilgan elektr maydon kuchlanganligini qiymatini o'zgartirish bilan amalga oshirildi (11.19 rasm). Kompensatsiyalangan kremniyda davriy ravishda kuzatilayotgan avtotebranishni ta'minlab turgan elektr maydon kuchlanishini  $\Delta E = 85 \text{ V/sm}$  oralig'ida o'zgarishi, avtotebranish shaklini keskin o'zgartirib yubordi, ya'ni oddiy kvazi sinusoidal ko'rinishidagi avtotebranish asta sekinlik bilan murakkab ko'rinishidagi staxistik tebranishga o'tdi (11.19 rasm).

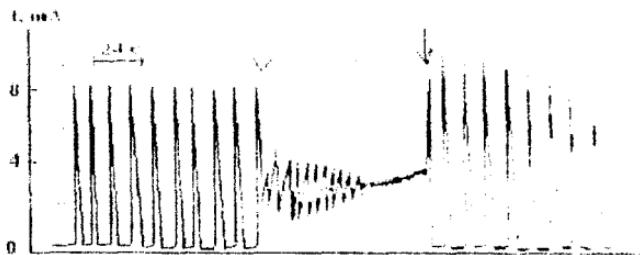


Rasm. 11.19. Kompensatsiyalangan kremniydagи davriy va stoxostik avtotebranishlar:  $\lambda=1,48 \text{ mkm}$ ;  $E, \text{V/sm}$ : a-540, b-545.4, v=555, g-565, d=575, e-600, j-610, z-625.

Rasmdan ko'rinadiki, davriy avtotebranishlar ikki va undan ko'p garmonikalı buferkatsiyalarga o'tib (rasmda b, j), so'ngra dinamxaos ko'rinishidagi tebranishlarga o'tishi kuzatilar ekan (rasmda u). Dinamik xaos ko'rinishdagi avtotebranishlarning shaklini katta vaqt oralig'l bo'yicha taxlil qilinganda, tebranishlarni o'rtasida qandaydir davriy takrorlanib turadigan avtotebranish shaklini uchratish mumkin bo'ldi.

Davriy avtotebranishlarni boshlanish yoki so'nish chegarasi oldida dinamik xaos ko'rinishdagi avtotebranishlar kuzatildi. Avtotebranishlarni 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 avtotebranishni so'nishi, yorug'lik o'chirilganda esa avtotebranishni qayta tiklanishi ya'ni gisterezis xolati ham o'rganildi (11.20 rasm).



Rasm 11.20. Kompensatsiyalangan kremniyda yorug'lik ta'sirida kuzatilgan avtotebranishga qo'ishmcha yorug'lik ta'sir etilganda avtotebranishni so'nishi, yorug'lik o'chirilganda esa avtotebranishni qayta tiklanish gisterezis xolati.

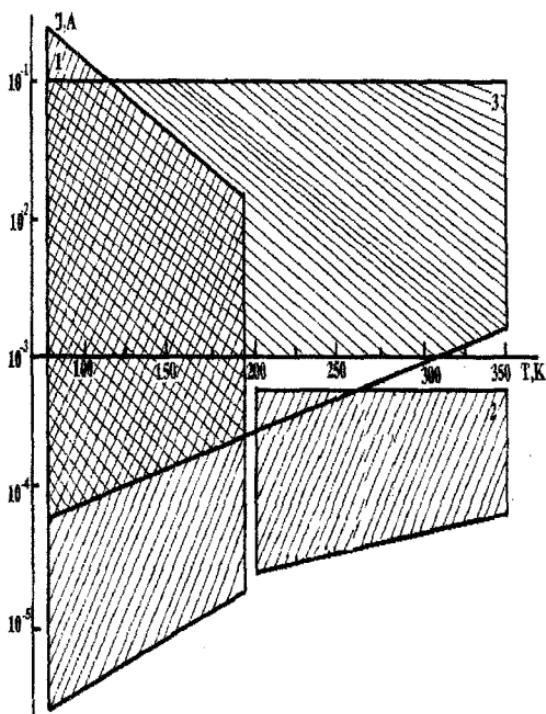
Olingen natijalarining ilmiy taxlili shuni ko'rsatdiki, davriy avtoteranishlardan dinamik xaos ko'rinishidagi tebranishlarga o'tishiga asosiy sabab tok tashuvchilarning generatsiya jarayonini tashqi ta'sir natijasida o'zgarishi ekan. Haqiqatdan ham avtotebranishlarni so'nishi yoki shaklini boshqa ko'rinishga o'tishi kompensatsiyalangan kremniy namunalarida tokni ortishi xisobiga Joul effektini vujudga kelishi va natijada haroratni ortishi sababli sodir bo'ladi.

### **11.11 Kompensatsiyalangan kremniydagi avtotebranishlarni tabiatи va o'zaro bog'liqligi**

Kirishma atomlari (marganets, rux, oltingugurt) bilan kompensatsiyalangan kremniyda vujudga keladigan tokni avtotebranishlarini har tomonlama va tizimli o'rganishlar natijasi shuni ko'rsatdiki, avtotebranishlarning termodinamik sharoitlarini boshqarib (elektr maydon kuchlanganligi, yoritilanlik, harorat va boshqalar), bitta namunada mexanizmi turli bo'lgan avtotebranishlarni vujudga keltirish mumkin bo'lar ekan. Ilmiy adabiyotlarni taxlili asosida aytish mumkinki, shu davrgacha birorta materialda tabiatи 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 biridan biriga o'tish jarayonlari va har bir turdag'i avtotebranishlarning kuzatilishini chegaraviy qiymatlarini aniqlash fundamental va amaliy jixatdan katta qiziqish uyg'otadi. Nazariy jixatdan avtotebranish jarayonlarining mexanizmini tushuntirish yarimo'tkazgichlar fizikasida katta ahamiyatga ega bo'lsa, amaliy tarafdan kremniydagi avtotebranishlar asosida xozirda tubdan yangi bo'lgan qattiq jismli generatorlarni hamda amplituda-chastotali chiqish signaliga ega bo'lgan tashqi ta'sirni sezuvchi ko'p funksiyalik datchiklarni yaratish imkonini beradi.

Kompensatsiyalangan kremniy materialidagi avtotebranishlar keng harorat oralig'ida kuzatilinib, termodinamik shart-sharoitlarni o'zgarishi

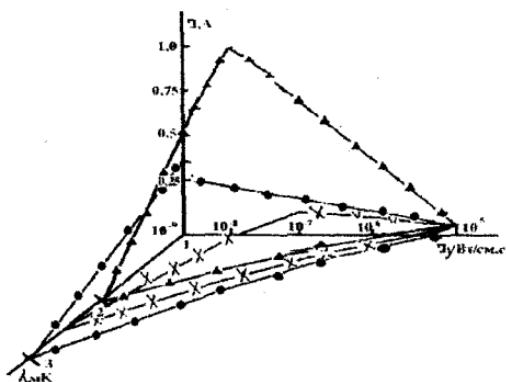
bilan bir turdan ikkinchi turdagı avtotebranishga o'ta olar ekan. Ba'zi bir holatlarda bu uch turdagı avtotebranishlar harorat, tashqi elektr maydon kuchlanganligi, materialini solishtirma qarshiligidini qiymatlari bo'yicha kuzatilishi mumkin bo'lgan chegaralari bir-birini qoplab ketar ekan. 11.2 jadvalda marganets, rux va oltingugurt atomlari bilan kompensatsiyalangan kremlidiagi avtotebranishlarni kuzatilishi mumkin bo'lgan tashqi ta'sir kattaliklarini chegaraviy qiymatlari keltirildi. Jadvaldan ko'rindiki, marganets kirishma atomlari bilan kompensatsiyalangan kremliyini elektrifizik parametrlari bir xil bo'lgan materialida uch turdagı avtotebranishlar kuzitilar ekan. Bu tajriba natijalari kompensatsiyalangan kremliy materiali asosida avtotebranish muxitini yaratish hamda avtotebranish parametrlari va shaklini keng spektr oralig'ida boshqarish imkoniyatini ochib berdi (11.21 rasm).



Rasm. 11.21.  
kompensatsiyalangan  
kremlidi kuzatiligan  
uch turdagı  
tebranishlarning  
ampliyutudasini  
maksimal va minimal  
qiymatini harorat  
oralig'ida o'zgarishi:  
 $\rho=5 \cdot 10^4$  om sm. 1 -  
XET; 2 - RT; 3 - IT.

Marganets, rux yoki oltingugurt atomlari bilan kompensatsiyalangan kremlidiagi avtotebranishlar boshqa yarim o'tkazgich materiallar va

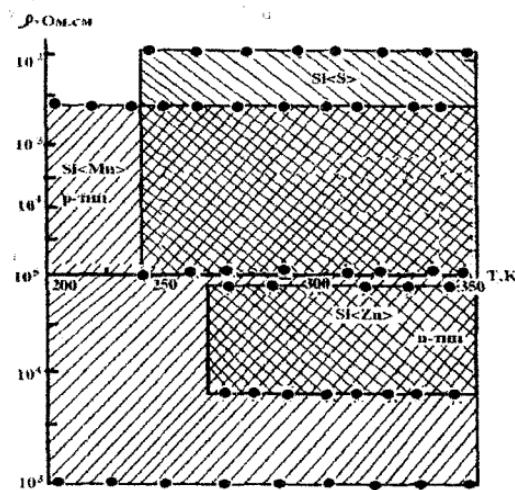
strukturalarda kuzatilgan avtotebranishlarga nisbatan monoxramatik yoritilganlikni quvvati va to'lqin uzunliklarining qiymatini keng oralig'ida kuzatildi



Rasm. 11.22. Marganets, rux va oltingugurt atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniydagи past chastotali avtotebranish amplitudasini monoxramatik yorug'likning to'lqin uzunligi va quvvatiga bog'liqligini.  $T=300K$ ,  $p=5 \cdot 10^4$  Om $\cdot$ sm, p-Si<B,Mn>; n-Si<P,Zn>; p-Si<B,S>.

11.22 rasmda kremniydagи past chastotali avtotebranishlarni amplitudasining qiymatini yoritilgan monoxramatik nuring to'lqin uzunligi va quvvatiga bog'liqligini o'rganish natijalari berildi. Olingan natijalardan oltingugurt atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniydagи avtotebranishlarning amplitudasini qiymati eng katta bo'lishi, marganets atomlari bilan kompensatsiyalangan kremnidagi past chastotali avtotebranishlar monoxramatik yorug'likning to'lqin uzunligi va quvvatini keng qiymatlari oralig'ida kuzatilishi aniqlandi. Bu natijalar kremniyda kuzatilgan past chastotali avtotebranishlar tushayotgan fotonlar energiyasini qiymati  $h\nu > E_g$  bo'lganidagina emas, balki, fotonlar energiyasining qiymati kremniyi taqiqlangan sohasining energiya qiymatidan kichik bo'lgan xolda ham kuzatilishi mumkinligini ko'rsatdi.

Kompensatsialangan kremniyda kuzatilgan uch turdagи avtotebranishlar ichida rekombinatsion to'lqinlar xona harorati oralig'ida, elektr maydon kuchlanganligini kichik qiymatlarida kuzatilishi hamda qo'shimcha injeksion kontaktlarni xosil qilish zarurati bo'lmagani uchun amaliyatga tadbiq etishda ustunlika ega ekan.



Rasm 11.23. Rekombinatsion to‘lqinlar turidagi avtotebranishlarni kirishma atomlarining turi va materialning solishtirma qarshiligiga bog‘liq xolda harorat oralig‘ida kuzatilish chegarasi.

Shu sababli, kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilingan avtotebranishlardan rekombinatsion to‘lqinlar materialning solishtirma qarshiligi va o‘tkazuvchanlik turiga bog‘liq kuzatilishining harorat oralig‘i alohida o‘rganildi (11.23 rasm). Kompensatsiyalangan kremniydagи rekombinatsion to‘lqinlarni kuzatilishining harorat oralig‘ida o‘rganish natijalari kirishma atomlarni kristall panjarada joylashgan tabiatи, materialni solishtirma qarshiligi va o‘tkazuvchanlik turiga bog‘liqligi haqidа fundamental ma’lumotlarni berdi.

## Kompensatsiyalangan kremniy asosida fizik kattaliklarni o'chovchi datchiklar

Fan va texnikani rivojlanishi, yangi zamonaviy ishlab chiqarish texnologiyalarni yaratish, texnologik tizimlarni avtomatlashtirish, kompyuterlarning yangi avlodini yaratish hamda ekologik muommalarning echimini ijobiyligi xal qilishda yarimo'tkazgich materiallar asosida yaratilingan datchiklar va qurilmalaridan foydalanmasdan amalga oshirib bo'lmaydi. Yarimo'tkazgich materiallar asosidagi datchiklar yaratilish texnologiyasi, tezkorligi va sezgirligi bo'yicha imkonyatlarini kengaytirish chegaralari oxiriga etdi. Shu sababli, yangi yarimo'tkazgich materiallarini olish yoki mavjud materiallar asosida tezkorligi yuqori bo'lgan ixcham datchiklar va qurilmalarni yaratish soha mutaxassislari va texnologlарidan yangi inavatsion echimlarni hal qilishni talab qiladi. Yaratilingan, past haroratda kirishma atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniy olish texnologiyasi hamda bu materiallarda kuzatilgan yangi fizik xodisa va effektlar kompensatsiyalangan kremniy asosida yaratilinadigan datchik va qurilmalarni elektronikada qo'llash istiqbolli yo'naliш ekanligini ko'rsatadi. Chunki, bu turdagи datchik va qurilmalar olinish texnologiyasini kam energiya sarfi, materiallarning elektrfizik parametrlarini turg'unligi va ular asosida yaratilingan fizik kattaliklarni o'chovchi datchiklarni o'ta sezgirligi hamda qurilmalarni ixchamligi va tan narxining arzonligi bilan ajralib turadi.

Kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan fizik xodisa va effektlar o'zining g'ayri oddiyligi hamda bu materiallarning elektrfizik parametrlari tashqi ta'sirlarga (harorat, integral va monoxramatik 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 farqi qilishi kelajakda elektronika sanoati uchun ularni asosiy materiallardan biri bo'lib qolishidan dalolat beradi. Yuqorida o'rganilgan fizik xodisa va effektlarni ko'pi bitta materialda kuzatilishi, kompensatsiyalangan kremniy asosida ko'p funksiyali datchiklarning yaratish imkonini beradi. Avtotebranishlar asosida yaratilinadigan datchiklar nafaqat sezgirligi

balki, amplituda-chastotali chiqish signali bilan xozirda mavjudlaridan tubdan farq qiladi.

## 12.1 Infragizil va oq nurlarni sezuvchi fotosezgichlar

Zamonaviy elektronika va optoelektronikada kichik quvvatli IQ nurlarni sezuvchi va qayd qiluvchi fotopremniklarni yaratish muommosining echimini xal qilish dolzarb masalalardan xisoblanadi. Bunday fotopremniklardan texnikani turli sohalarda keng qo'llash imkoniyatlari mavjud. IQ nurlami sezuvchi yaratilinadigan fotopremniklardan masofadan boshqarish qurilmalarida, tibbiyotda haroratni o'lchash va kasallikni aniqlovchi tamograflarda, tungi ko'rish qurilmalarida, quyosh energiyasining tarkibini o'rganish va nazorat qilishda, turli obektlarni qo'riqlashda hamda yong'in xavfsizligini nazorat qilishda samarali foydalanish mumkin. Ko'plab yarimo'tkazgich materiallar asosida yaratilingan, fotoqarshilini o'zgarishi xisobiga ishlydigan IQ nur fotopremniklarni kichik quvvatdagи IQ nurlarni sezish imkoniyatlari cheklanganligi tufayli ulardan turli sohalarda keng foydalanib bo'lmaydi. Ayniqsa, integral yorug'lik mavjudligida IQ nurlarni sezalidigan fotopremniklar kam va ularni sezgirligi yaxshi emas. Kunduzi integral yorug'lik mavjudligida qo'shimcha kichik quvvatli IQ nurlami sezalidigan fotopremniklarni yaratishda kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan foto'o'tkazuvchanlikni IQ 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 foto'o'tkazuvchanlikning ma'lum turg'un qiymatiga olib kelib, so'ngra qo'shimcha IQ nur ta'sir etilsa, tushayotgan fotonlar energiyasining  $h\nu=0,4\div0,6eV$  oralig'ida foto'o'tkazuvchanlikni so'nishi kazatiladi. Fotonlar energiyasining ta'sirida foto'o'tkazuvchanlikni so'nishi  $\frac{J_f}{J_r+h\nu} = 10^4 \div 10^6$  ni tashkil etdi. Bunday sezgirlik xozirda mavjud bo'lgan yarimo'tkazgich materiallar asosida yaratilingan biron-bir foto-premnikda kuzatilinmagan.

Taklif etilayotgan IQ nur fotopryomnik  $T=77\div200K$  oralig'ida, tashqi elektr maydon kuchlanganligini  $E=10\div50V/sm$  qiymatigi ishlay oladi. Fotopremniklami fotonlar energiyasini sezishi  $h\nu=0,4\div0,8eV$

oralig‘ida bo‘lib, nisbatan katta qiymatdan integral fon mavjudligida foton energiyasining quvvatini kichik  $I=10^{-9} \div 10^{-5}$  Vt/sm<sup>2</sup>·s qiyatlari oralig‘ida IQ nurni sezaladi. IQ nur energiyasining bunday kichik quvvatini sezaladigan o‘ta sezgir fotopremniklar xozirda mavjud emas.

Kompensatsiyalangan kremniy materiali asosida taklif etilgan IQ nur fotopryomniklarini yaratilish texnologiyasining soddaligi, kam energiya talab qilishi, spektral sezgirligining kengligi va harorat qiyamatini katta oralig‘ida ishlay olishi tufayli hozirgi elektronika keng 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 qiyamatini kontaktsiz o‘lchashda, mikrafonlarda, magnit ta’sirida axborotlarni saqlash va yozishda keng qo’llaniladi.

Galvanomagnit qurilmalar va datchiklardan elektronikada keng foydalanishdagi asosiy ustunlikga quyidagilarni kiritish mumkin:

1. Galvanomagnit qurilmalarning kirish va chiqishi orasida o‘zaro elektr bog‘lanishni yo‘qligi.
2. Mexanik xarakatni elektr signalga aylantirish va uni turg‘un ushlab turuvshini osonligi.
3. Galvanomagnit qurilmalar va datchiklarni yaratishdagi elektr sxemani soddaligi.
4. Kichik o‘lchamligi va kam quvvat talab etishi.
5. Ishlatishda ishonchligi va parametrlarini yuqori turg‘unligi.

Xozirda mavjud bo‘lgan, magnit maydon kuchlanganligini o‘lchovchi datchik va qurilmalarning kamchiligi magnit maydon kuchlanganligining qiyamatini sezgirligi hamda chiqish signalini kichiklidir. SHu sababli, bunday qurilma va datchiklar fan va texnikada keng qo’llash imkoniyatlari cheklangan. Kampensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan magnit qarshilik effektlar musbat va manfiy magnit qarshilik, magnit maydon kuchlanganligi qiyatlariga o‘ta sezgirligi va chiqish signalini kattaligi bilan ajralib turishi, uning

asosida magnit maydon kuchlanganligini o'chovchi va nazorat qiluvchi galvanomagnit qurilmalar va datchiklarni yaratish hamda turli sohalarda qo'llashda katta imkoniyatlari mavjudligidan dalolat beradi. Bu qurilma va datchiklarni chiqish signalingining qiymatini katta bo'lishi qo'shimcha signal kuchaytirish moslamalaridan voz kechish imkonini beradi. Bu o'z navbatida uning tan narxini arzonlashishiga olib keladi. Solishtirma qarshiligi  $\approx 6 \cdot 10^3$  Om·sm bo'lgan kompensatsiyalangan kremniy materiali magnit datchik yaratish uchun tanlab olindi. Bunga sabab, tajriba natijalarida bu solishtirma qarshilikga ega bo'lgan materiallarda magnit sezgirlik eng katta qiymatga erishishi kuzatilgan edi.

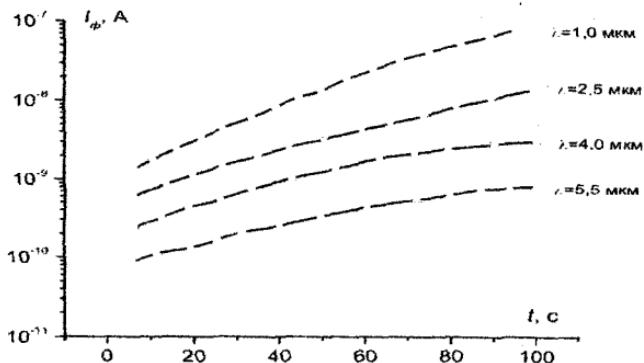
Magnit datchikni ishlash asosi, magnit maydon ta'sirida materialning solishtirma qarshiligini oshishi yoki kamayishi natijasida elektr zanjirdan o'tayotgan tok qiymatini o'zgarishidir. Magnit datchik ko'priq simon ulanish asosida tashqi elektr maydoniga ulanadi. Bu magnit datchikning sezgirligini yanada oshiradi. Magnit sezgir datchikning qarshiligini o'zgarishi chiqish signalingining yig'indisini o'zgartiradi:  $\Delta U = J\Delta R$  (bunda  $J$ - zanjirdan o'tayotgan tokni qiymati,  $\Delta R$  magnit sezgir datchikni magnit maydon ta'sirida o'zgargan qarshiligi). Ko'priksimon sxemadagi o'zgaruvchan qarshilik yordamida chiqishdagi kuchlanishlar farqi yo'qotiladi. Bunda  $R_{o'z}$  - qarshilikni o'zgartirib zanjirdagi tokini qiymati o'zgaradi. Kompensatsiyalangan kremniy asosida magnit maydon kuchlanganligini o'chovchi datchiklar tashqi elektr kuchlanganligining qiymati standart 6V yoki 9V bo'lganda, harorat  $T=-50^{\circ}+70^{\circ}\text{S}$  gacha oralig'ida  $H=0\div 15\text{kEr}$  magnit maydon kuchlanganligini  $\alpha=9,1\text{mV/Er}$  sezgirlik darajasida o'chay oladi.

### **12.3 Kompensatsiyalangan kremniy asosida foton xisblagich**

Xozirda, monokristall krmeniy va birikmali yarimo'tkazgich materiallar ( $\text{PbS}$ ,  $\text{PbSe}$ ,  $\text{InSb}$  va boshqa) asosida yaratilgan ko'chki diodlar ko'rinishidagi foton xisoblagichlar elektronikada keng foydalanib kelinmoqda. Bunday foton xisoblagichlarni yaratishda murakkab texnologiyalardan foydalanib, faol element va kontakt sohani qatlama-qatlam qilib olish talab etiladi. Boshqa turdag'i foton xisoblagichlar yanada murakkab elektrontizim asosida ishlaydi. Sezgir foton xisoblagichga tushgan foton birlamchi signal amplitudasini xosil

qiladi. Bu impuls qo'shimcha elektr tizimida selleksiyalanib va kuchaytirilib, so'ngra xisoblagich blokiga uzatiladi.

Kompensatsiyalangan krmeniy asosida yaratilinadigan foton xisoblagich IQ nuring to'lqin uzunligini  $\lambda=1,5\div8\text{ mkm}$  qiymatlari oralig'ida, 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 qiymatini vaqt oralig'ida o'sish kinetikasi

Tajriba natijalari shuni ko'rsatadiki, kompensatsiyalangan kremniy asosida yaratiladigan foton xisoblagichga  $\lambda=1,5\div8\text{ mkm}$  to'lqin uzunlikdagi fotonlar kelib tushganda, fototokning qiymati o'smb borar ekan. Fototokning qiymatini ma'lum vaqt oralig'ida o'sish kinetikasi 12.1-rasmda berildi. Rasmdan ko'rindiki, kompensatsiyalangan krmeniy asosidagi foton xisoblagich yuzasiga tushayotgan fotonlarning to'lqin uzunligiga qarab fototokning qiymati 2 marotabadan 50 marotabagacha ortib borar ekan. Foton xisoblagich 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 ximoya qilish maqsadida metall korpusga joylashtirildi. Materialga fotonlar tushishi uchun korpusning tepe qismiga shaffof safir materiali o'rnatildi. Namunaga tashqi elektr manbadan  $U=6\text{ V}$  ulandi. Foton xisoblagichga ketma-ket qilib mikroampermetr ulangan bo'lib, u boshlang'ich (qorong'u

xolatdagi) va fotonlar tushgandagi xolatlarda tokning qiymatini o'chash imkoniyatini beradi.

Kompensatsiyalangan kremniy asosida yaratilishi taklif etilgan foton xisoblagichning asosiy parametrlari quyidagilardan iborat.

- spektrall sezgirligi  $\lambda=1,5\div8\text{mkm}$  ( $h\nu=0,2\div1\text{eV}$ )
- ishslash harorat oralig'i  $T=77\div250\text{K}$
- tashqi elektr manba  $U=6\text{V}$
- o'chami  $5\times1\times1,5\text{mm}^3$
- sezgirlik chegarasi  $S=10^{-9}\text{Vt/sm}^2\cdot\text{sek}$
- o'chash uchun kerak bo'lgan minimal vaqt  $t>10^{-2}\text{sek}$

Taklif etilgan foton xisoblagich imkoniyatlari xozirda mavjudlari bilan solishtirilganda uning sezgirligi yuqori ekanligi va keng harorat oralig'ida fotonlar oqimini o'ta aniqlik bilan xisoblay olishi mumkinligi ko'rsatib berildi. Bunday foton xisoblagichlar yaratilish texnologiyasini soddaligi, kam energiya talab qilishi bilan bir qatorda uzoq vaqt mobaynida amaliyatda foydalananish imkonini beradi.

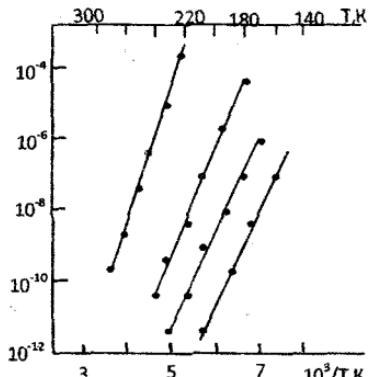
#### **12.4 Kompensatsiyalangan kremniy asosidagi harorat o'chagich**

Yarim o'tkazgich maieriallarining elektrofizik parametrlari tashqi ta'sirlar, ayniqsa harorat o'zgarishi natijasida keskin o'zgaradi. Yarim o'tkazgich materiallarida kuzatilgan bu xususiyat termoturg'unlik tomonidan yaxshi xisoblanmasada, harorat ta'sirida materialning elektrofizik parametrlarini o'zgarishi asosida haroratni sezuvchi, o'chovchi va nazorat qiladigan termodatchiklarni yaratish imkonini beradi. Kompensatsiyalangan kremniy asosida yaratilishi taklif etilgan termodatchik solishtirma qarshiligi katta bo'lgan harorat sezuvchi isohadan hamda uning ikki tomonida omik kontakt xosil 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 muxitning harorati o'zgarsa, uning bazasining qarshilagini qiymati ham o'zgaradi, natijada strukturadan o'tayotgan tokning ham qiymati o'zgaradi. Tokning o'zgargan qiymatini mos ravishda haroratga o'tkazish orqali muxitning haroratini  $\pm0,1^\circ\text{C}$  aniqlikda o'chash mumkin bo'ladi. Harorat o'chagich

$T=250 \div 350^{\circ}\text{C}$  oralig'ida turg'un ishlab tekshirilayotgan muxitning harorati haqida aniq ma'lumot beradi.

Kompensatsiyalangan kremniy asosida haroratni o'lchashda fotoo'tkazuvchanlikni haroart ta'sirida so'nish effektidanham foydalanish mumkin. Ma'lumki, nisbatan past  $T=140 \div 200\text{K}$  haroratlarda fotoo'tkazuvchanlikni harorat ta'sirida so'nish effekti kuzatilgan edi. Bunda fototokning qiymati juda kichik harorat oralig'ida  $10^6 \div 10^7$  darajada kamayib termosezgirlik koefitsenti  $\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$  yoki  $\alpha = \frac{V}{2T} 100\%$  ni qiymati  $(35 \div 40)\%/\text{gradga}$  teng bo'ldi (12.2-rasm). Bunda V-koefitsent materialning solishtirma qarshiligini haroratga bog'liq o'zgarishidan aniqlanadi.

J,A



Rasm 12.2 Kompensatsiyalangan kremniyning qarshiligi haroratga bog'liqligi

$$V = \frac{2,303}{\Delta \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} \Delta \lg R \quad (12.1)$$

bunda;  $T_1$  va  $T_2$  mos ravishda haroratni boshlang'ich va so'ngi qiymatlari. Bu kattaliklarni kompensatsiyalangan kremniy uchun xisoblanganda  $V=10^4 \div 1,2 \cdot 10^4$ ;  $D=(35-40)\%/\text{grad}$  qiymatlari aniqlandi. Haroratni o'lchashda termodatchikning har bir nuqtani o'lchash intervali  $\tau = 30-35$  sekni tashkil etdi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, kompensatsiyalangan kremniyda fotoo'tkazuvchanlikni harorat ta'sirida so'nish effekti asosida past haroratlarni o'lchashga moslashtirilgan termodatchikni yaratish mumkin ekan. Bunday termodatchiklar sezgirligi bo'yicha, mavjud yarim o'tkazgich termodatchiklardan yuqori

bo'lib, yaratilish texnologiyasini soddaligi va arzonligi bilan ajralib turadi.

## 12.5. Kompensatsiyalangan kremniy asosidagi tenzodatchiklar

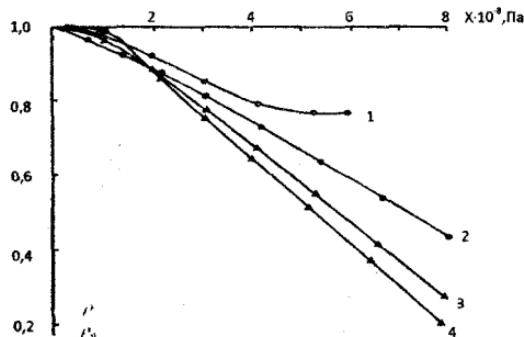
Mexanik kattaliklarni (bosim, siqlish, cho'zilish) elektr signaliga aylantirib beruvchi yarimo'tkazgich datchiklarni ishlashiga asos qilib tenzorezistorlar tanlab olingen. Bu yarimo'tkazgich datchiklar metall materiallardan yasalgan tenzorezislardan sezgirligini kattaligi bilan ajralib turadi. YArimo'tkazgichli tenzorezistorlarni turli shaklda va o'lchamda yaratish onsonligi bu materiallarni mexanik kttaliklarni o'lchashda keng foydalanish imkoniyatlari mavjudligini ko'rsatadi.

Adabiyotlardan ma'lumki, yarimo'tkazgich materialini kirishma atomlar bilan legirlab taqiqlangan sohada chuqur energetik sath xosil qilinsa, bu material tashqi mexanik bosimga o'tasezgir bo'lib qoladi. Kirishma atomlari bilan kampensatsiyalangan kremniyning elektrofizik parometrlari (marganets, rux, oltingugurt, nikel, selen va boshqa) tashqi mexanik kuchlanishning o'zgarishiga o'ta sezgir bo'lgani uchun, ular asosida tenzoresistor va tenzodatchiklarni yaratishda, mexanik kuchlanishlarni o'lchashda va o'rganishda juda katta imkoniyatlarga ega ekan.

Mexanik kuchlanishni o'lchash uchun [100] kristallografik o'q asosida o'stirilgan kirishma atomi bilan kompensatsiyalangan kremniy tanlab olindi. Tenzodatchik uchun hona haroratida ( $T=300K$ ) solishtirma qarshiligi  $\rho = 10^3 \div 10^5 \text{ Om} \cdot \text{sm}$  bo'lgan material olindi. Kompensatsiyalangan kremniy namunalari paralleloiped shakliga keltirilib, mexanik bosimni sezuvchi korpusga joylashtirildi. Bir o'qli bosim ( $BO'B$ ) qiymatini  $R=0 \div 8 \cdot 10^8 \text{ Pa}$  oralig'ida o'zgarganda materialning solishtirma qarshiligini 10 marotabagacha kamayishi kuzatildi (12.3-rasm). Rasmidan ko'rindiki, tenzorezistiv effekt kompensatsiyalangan kremniy materialining solishtirma qarshiligi ortishi bilan ortib borar ekan.

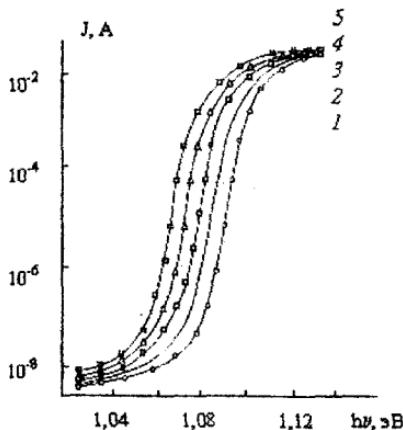
Bir o'qli bosim qiymatini  $R=8 \cdot 10^8 \text{ Pa}$  gacha ortishida materialning solishtirma qarshiligi chiziqli kamayib bordi. Kompensatsiyalangan kremniydagи fotootka-zuvchanlik xolatiga  $BO'B$  ta'sir etirilganda, fotootkazuvchanlikni qiymatini  $K = \frac{J_f}{J_q f} = 10^4 \div 10^{10}$  gacha o'zgarishi

kuzatildi. Bunday sezgirlik xozirda mavjud bo'lgan biror-bir tenzodatchiklarda kuzatilmagan. Shu sababli, kompensatsiyalangan kremniyda BO'B qiyamatining  $R=10^5 \div 8 \cdot 10^8$  Pa gacha o'zgartirib foto o'tkazuvchanlikning qizil chegarasini 0,72 eV dan 0,42 eV gacha siljитish mumkinligi ham ko'rsatib berildi. (12.4 rasm).



Rasm 12.4  
kompensatsiyalangan  
kreemniydarib o'qli bosim  
ta'sirida fotoo'tkazuvchanlikni  
spektral bo'g'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-  
 $X=8 \cdot 10^8$

12.3 Rasm  
kompensatsiyalangan  
kremniyda tenzorezistiv  
effect = 77 K. 1-KDB-4;  
2-  $10^3$  Om·sm; 3-  $10^4$   
Om·sm; 4-  $10^5$  Om·sm



Kompensatsiyalangan kremniyda fotoo'tkazuvchanlik xolatini yuzaga keltirib, so'ngra BO'B ta'sir etirilsa tenzosezgirlik bir necha darajada oshib ketar ekan. Tenzodatchik sifatida [100] kristall o'qi asosida o'stirilgan 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 kattaligi tajriba natijalari asosida aniqlangan edi. Kompensatsiyalangan kremniy asosida yaratilishi taklif etilgan tenzodatchiklarda BO'B ning ta'sir etish

yo‘nalishi namunaga qo‘yilgan tok yo‘nalishi bilan parallel xolda amalga oshirildi ( $J//R$ ).

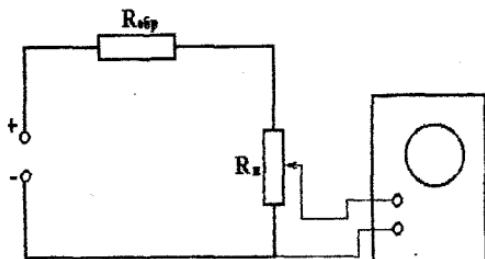
## 12.6 Kompensatsiyalangan kremniy asosidagi qattiq jism generatorlari

Yarimo‘tkazgich materiallari asosida qattiq jism generatorlarini yaratish ko‘plab olim va mutaxassislar tomonidan taklif qilingan bo‘lsada, xozirgacha keng harorat oralig‘ida parametralari oson boshqariladigan generatorlar yarimo‘tkazgich materiallari asosida yaratilinmagan. Bunga asosiy sabab, yarimo‘tkazgich materiallar va strukturalarda kuzatilgan avtotebranishlarning parametrлари turg‘un bo‘imasligi hamda bunday materiallarni olish texnologiyasining murakkab va katta energiya talab qilishidir.

Elektronikada past va tovush chastotali avtotebranishlarni xosil qilishda RC-generatorlardan keng foydalaniadi. Bunday generatorlarning o‘chami katta bo‘lib, murakkab elektr tizimidan tashkil topadi, hamda  $10^{-2}$ Gs chastotadan kichik chastotalarni olishda imkoniyati cheklangan.

Kompensatsiyalangan kremniy asosidagi qattiq jism generatorlari yaratilish texnologiyasining sodda va arzonligi bilan ajralib turadi. Bu generatorlarda xosil qilingan avtotebranishlarning shakli va parametrлари (amplituda va chastota) oson boshqarilishi bilan mavjudlaridan ajralib turadi.

Kompensatsiyalangan kremniyda avtotebranishlar keng harorat oralig‘ida  $T=77\div350K$ , chastotasi  $f=10^{-3}\div10^5$ Gs qiymatida kuzatilgan bo‘lib, birgina materialda termodinamik shart-sharoitlarni boshqarib (harorat, elektr va magnit maydon kuchlanganligi, yoritilganlik), turli tabiatdagi avtotebranishlarni olish imkonи mavjudligi tajribalardan aniqlangan edi. Taklif etilgan qattiq jismli generatorlarning chastotasini  $f=10^{-3}\div10^5$ Gs oralig‘ida onson boshqarib, amplituda qiymatini  $J=10^{-5}\div1$ A gacha olish mumkin bo‘lad. Bunda tebranishlar modulyasiya chuqurligini  $\sim 100\%$ gi bilan ajralib turadi.



Rasm 12.5  
kompensatsiyalangan kremniy asosidagi qattiq jism generatorini elektr sxemasi.

12.5 rasmda kompensatsiyalangan kremniy asosida yaratilinadigan qattiq jism generatorining elektr tizimi berildi. Rasmdan ko'rinishdagi qattiq jism generatori kompensatsiyalangan kremniy materialiga ketma-ket ulagan  $R_{yu}$ -yuklama qarshiligi va tashqi elektr manbasidan iborat.

Kompensatsiyalangan kremniya qo'yilgan tashqi elektr kuchlanishni maydonini boshqarib, turli ko'rinishdagi garmonik, cho'qqisimon impulsli va murakkab shakildagi avtotebranishlarni xosil qilish mumkin. Taklif etilgankompensatsiyalangan kremniy asosidagi qattiq jism generatorining geometrik o'lchami  $2x2x0,5\text{mm}^3$  ni tashkil etdi. 12.1 jadvalda kompensatsiyalangan kremniy materiali asosida, laboratoriya sharoitida yaratilingan qattiq jism generatorlarini parametrlari xaqida ma'lumot berildi.

Jadval 12.1

№	Material	O'tka-zuv-chanalik turi.	Solishtirma qarshilik $\rho$ , $\Omega \cdot \text{sm}$	Yoritilganlik		Harorat $T, K$
				Mono-xromtik $I_V, Vt/\text{sm}^2 \cdot s$	Spektral soha $\lambda, \text{nm}$	
1	Si< Mn >	n	$8 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^5$	$10^{-7} - 10^{-5}$	2-0,75	80-200
		p	$5 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^5$	$10^{-9} - 10^{-5}$		80-200
2	Si< Zn >	n	$10^2 - 2 \cdot 10^5$	$10^{-8} - 10^{-5}$	3-0,75	80-180
3	Si< S >	p	$3 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^5$	$10^{-8} - 10^{-5}$	2-0,75	80-160

Qattiq jism generatorlarining asosi bo'lgan kremniy materialini kirishma atomlar bilan kompensatsiyalash darajasini, kirishma atom turini, materialning solishtirma qarshiligi va o'tkazuvchanlik turini boshqarib, amaliyatda qo'llash uchun eng qulay bo'lgan amplituda, chastota va avtotebranish shaklini xosil qilish va tanlash mumkin bo'lar ekan.

Qattiq jismli generatorlaridan texnikani turli soxalarida, optoelektronikada, elektromagnit va radiosignalarni xosil qilishda keng foydalanish mumkin. Bunday generatorlar oson boshqarilishi, kam energiya talab qiluvchi yaratish texnologiyasi bilan mavjudlaridan keskin farq qiladi. Amaliyotda avtotebranishlarni xosil qilish uchun elektr tizimida albatta teskari bog'lanish bo'lishi talab etiladi. Taklif etilgan qattiq jism generatorlarida teskari bog'lanish tizimi bo'lishining zaruriyati yuq. Chunki, bunday generatorlar yaxlit bir yarimo'tkazgich kremniy asosida yaratilinadi. Kompensatsiyalangan kremniy asosida yaratilinadigan qattiq jism generatorini ixtirosiga bir necha mualliflik va patentlik guvoxnomalari olingan [1-4].

## **12.7 Kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan avtotebranishlar asosida fizik kattaliklarni o'chovchi tubdan yangi funksional datchiklar**

Kompensatsiyalangan kremniy asosida kuzatilgan avtotebranishlarni har tomonlama o'rghanish asosida nafaqat qattiq jism generatorlarini yaratish mumkinligi, balki tashqi fizik kattaliklarning o'zgarishiga o'ta sezgir bo'lgan yangi turdag'i funksional datchiklarni ham yaratish mumkinligi ko'rsatib berildi. 12.2-jadvalda kompensatsiyalangan kremniy materiali asosida yaratilgan amplituda va chastotali chiqishga ega bo'lgan harorat o'chash datchigining ishlash parametrlari berildi.

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	$2 \cdot 10^{-4}$

**Jadval 12.2**

Jadvaldan ko'rindaniki, haroratni  $T=77 \div 350\text{K}$  oralig'iда o'zgarishisiga 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'iда o'zgarish ekan. Bu degani, haroratni  $\Delta T=273\text{K}$  o'zgarishi avtotebranish

chastotasining qiymatini  $10^6$ , amplitudasini esa  $10^4$  o'zgarihga olib keladi. Harorat o'zgarishiga bunday o'ta sezgir yarimo'tkazgichli datchiklar shu davrgacha mayjud bo'lmanan.

Xuddi shuningdek, oddiy yarimo'tkazgich magnit datchiklar ham materialning solishtirma qarshiligini magnit maydon ta'sirida o'zgarishiga asoslangan. Bunday magnit datchiklarda magnit maydon kuchlanganligining  $H=0\div25\text{kEr}$  oralig'ida o'zgarishida magnit sezgirlik  $1\div10\%$ ni tashkil etadi.

Kompensatsiyalangan kremniydagagi avtotebranish parametrlariga (amplituda, chastota) magnit maydon kuchlanganligining ta'siri o'rganilganda, parametrlarning magnit maydon kuchlanganligini o'zgarishiga o'ta sezgirligi aniqlandi. Tajriba natijalari asosida magnit maydon kuchlanganligining qiymati  $H=0\div25\text{kEr}$  oralig'ida o'zgaganida 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 sezgirligi deyarli bir xil bo'ldi.

Avtotebranishlar asosida yaratilishi mumkin bo'lgan yana bir funktsional datchik bir o'qli bosimni sezuvchi tenzodatchik bo'lib, bunda ham bir o'qli bosim qiymatini o'zgarishi avtotebranish amplitudasi va chastotasi qiymatiga kuchli ta'sir etishi aniqlangan edi. Bunday tenzodatchiklarni yana bir axamiyati shundaki, kompensatsiyalangan kremniy materialining o'stirilgan kristall o'qiga bog'liq tenzosezgirlik ham turlicha bo'lar ekan. Boshlang'ich kremniy materialini kristall o'q [111],[110],[100] yo'nalishlarda tanlab olindi va kirishma atomlari bilan kompensatsiyalanadi. Kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan avtotebranishlarni parametrlariga tashqi ta'sirlarni har tomonlama o'rganishlar asosida, fizik kattaliklarni o'chashda ishlashi jixatidan 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 yoki xotira qurilmalarida saqlashda bu usuldan samarali foydalanish mumkin bo'ladi.

### Jadval 12.3

Qo'llanish sohasi	Parametrlarini sezgirlik darajasi			
	CHegaraviy elektr maydon bo'yicha	CHegaraviy chastota	Tebranish amplitudasi	Tebranish chastotasi
Termo-datchik	-(2÷5) V/sm·K	(2÷4)·10 <sup>2</sup> Gs/K	(2÷5)·10 <sup>-6</sup> A/K	(2÷4)·10 <sup>2</sup> Gs/K
Fotodatchik	-(4÷6) V/sm·lk	(3÷5)·10 <sup>2</sup> Gs/lk	(3÷5)·10 <sup>-6</sup> A/lk	-(3÷5) Gs/lk
Tenzodatchik	-(3÷5)·10 <sup>-8</sup> V/sm·Pa	(2÷5)·10 <sup>-8</sup> Gs/Pa	(2÷5)·10 <sup>-10</sup> A/Pa	-(1÷3)·10 <sup>-5</sup> Gs/Pa
Magnito-datchik	- (2÷5)·10 <sup>-3</sup> V/sm·Er	(5÷6)·10 <sup>-3</sup> Gs/Er	(5÷7)·10 <sup>-11</sup> A/Er	(3÷5)·10 <sup>-2</sup> Gs/Er

12.3 jadvalda kompensatsiyalangan kremniy materialida kuzatilgan avtotebranishlar asosida yaratish taklif etilagan datchiklarni sezgirligi haqida ma'lumotlar berildi. Bunday datchiklar o'ta sezgirligi va tezkorligi bilan yarimo'kazgich materiallar asosida mavjud datchiklardan ajralishi aniqlandi.

## Yarim otkazgichli materiallar

1-jadval

Material	Element ko'rinishi	Element nomi	Kristall sturukturasi	300 K dagi panjara doimiysi
Element	C	Uglerod	D	3,56683
	Ge	Germaniy	D	5,64613
	Si	Kremniy	D	5,43095
	Sn	Qalay	D	6,48920
IV-IV	SiC	Karbid kremniy	W	a=3,086; c=15,117
III-V	AlAs	Arsen alyumeniy	Z	5,6605
	AlP	Fosfid alyumeniy	Z	5,4510
	AlSb	Surma alyuminiy	Z	6,1355
	BN	Nitrid bor	Z	3,6150
	BP	Fosfid bor	Z	4,5380
	GaAs	Arsen galiiy	Z	5,6533
	GaN	Nitrid galiiy	W	a=3,189; c=5,185
	GaP	Fosfid galiiy	Z	5,4512
	GaSb	Surma galiiy	Z	6,0959
	InAs	Arsenid indiya	Z	6,0584
	InP	Fosfid indiya	Z	5,8686
	InSb	Surma indiya	Z	6,4794
II-VI	CdS	Sulfide kadmiya	W	5,8320
	CdS	Sulfide kadmiya	Z	a=4,16; c=6,756
	CdSe	Selen kadmin	Z	6,050
	CdTe	Tellur kadmin	Z	6,482
	ZnO	Ruh oksidi	R	4,580
	ZnS	Sulfid oksidi	W	5,420
	ZnS	Ruh Sulfidi	Z	a=3,82; c=6,26
IV-VI	PbS	Sulfid oltingugurti	R	5,9362
	PbTe	Tellur oltingugurti	R	6,4620
	PbSe	Selen oltingugurti	R	6,12

**D - olmos Kristal panjarasi**

**Z - ruxsarob kristall panjarasi**

**W - Vyursit kristall panjarasi**

**R - tosh tuzi kristall panjarasi**

## Mendeleyev davriy jadvalidagi asosiy yarim o'tkazgichli elementlar

2- jadval

Davrlar	Gruppa						
	II	III	IV	V	VI	VII	
II	$^4\text{Be}$	$^5\text{B}$	$^6\text{C}$	$^7\text{N}$	$^8\text{O}$		
III		$^{13}\text{Al}$	$^{14}\text{Si}$	$^{15}\text{P}$	$^{16}\text{S}$	$^{17}\text{Cl}$	
IV		$^{31}\text{Ga}$	$^{32}\text{Ge}$	$^{33}\text{As}$	$^{34}\text{Se}$	$^{35}\text{Br}$	
V		$^{49}\text{In}$	$^{50}\text{Sn}$	$^{51}\text{Sb}$	$^{52}\text{Te}$	$^{53}\text{J}$	$^{54}\text{Xe}$
VI			$^{82}\text{Pb}$	$^{83}\text{Bi}$	$^{84}\text{Po}$	$^{85}\text{At}$	

## Si ning asosiy parametrlari

3-jadval

Kattalik nomi	Qiymati	Kattalik nomi	Qiymati
Panjara doimiysi ( $\text{\AA}=10^8 \text{ sm}$ )	5,43095	Elektron holatlar zichligi ( $\text{sm}^{-3}$ )	$2,8 \cdot 10^{10}$
Kimyoviy bog'lanish	Kovalent bog'lanish	Kovak holatlar zichligi ( $\text{sm}^{-3}$ )	$1,02 \cdot 10^{16}$
Tuzilish sturukturasi	To'gri bog'lan-magan	T=300 K dagi xususiy o'tkazuvchanlik ( $\text{sm}^{-3}$ )	$4,3 \cdot 10^{-8}$
Kristall panjarasi	Olmos kristal panjarasi	T=300 K dagi xususiy konsentratsiya ( $\text{sm}^{-3}$ )	$1,5 \cdot 10^{10}$
Taqiqangan 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		

## Ge va Si elementlariga kiritilgan kirishma elementlarining hosil qilgan kichik energetik sathlari

4-jadval

Akseptorli kirishma					
Element	Kirishmalarning energetik sathi (eV)				
	B	Al	Ga	In	Ti
Ge	E <sub>v</sub> +0,0104	E <sub>v</sub> +0,0102	E <sub>v</sub> +0,0108	E <sub>v</sub> +0,012	E <sub>v</sub> +0,010
Si	E <sub>v</sub> +0,044	E <sub>v</sub> +0,069	E <sub>v</sub> +0,079	E <sub>v</sub> +0,155	E <sub>v</sub> +0,26

Donorli kirishma					
Element	Kirishmalarning energetik sathi (eV)				
	P	As	Sb	Li	
Ge	E <sub>c</sub> -0,012	E <sub>c</sub> -0,127	E <sub>c</sub> -0,069	E <sub>c</sub> -0,0066	E <sub>c</sub> -0,0093
Si	E <sub>c</sub> -0,044	E <sub>c</sub> -0,049	E <sub>c</sub> -0,069	E <sub>c</sub> -0,039	E <sub>c</sub> -0,033

## SiO<sub>2</sub> va Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ning 300 K dagi xossalari

5-jadval

Dielektriklar	SiO <sub>2</sub>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
Sturukturasi	Amorf holat	Amorf holat
Erish harorati (°C)	1600	-
Zichligi (g/sm <sup>3</sup> )	2,2	3,1
Yorug'lik singduruvchanligi	1,46	2,05
Dielektrik doimiysi	3,9	7,5
Dielektrik mustahkamligi (V/sm)	10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>
IQ Nurlanishning yutilish chegarasi (μm)	9,3	11,5-12,0
Taqiqlangan soha kengligi (eV)	9	5,0
Issiqlik kengayish koifsendi (°C <sup>-1</sup> )	5·10 <sup>7</sup>	-
Issiqlik o'tkazuvchanligi (W/sm·K)	0,014	-
Solishtirma qarshiligi (Ω·sm)		
25 °C haroratda	10 <sup>14</sup> -10 <sup>16</sup>	10 <sup>14</sup>
500 °C haroratda	-	2·10 <sup>13</sup>
HF da yemirilish tezligi (Å/min) °C	1000	5-10

## SiO<sub>2</sub> va Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> plyonkalar rangining qalinligiga bog'liqligi

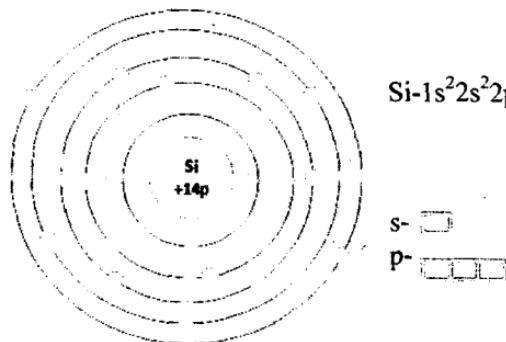
## 6-jadval

Tartibi	Ranglar	$\text{SiO}_2$ ning qalnik oralig'i	$\text{Si}_3\text{N}_4$ ning qalnik oralig'i
1	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
		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

## Metal Si n turdagı silidsining potensial to'siq balandligi va ularning termodinamik parametrlari

7-jadval

Metall silidsidi	B	Slidsid sturukturasi	Tempera- turasi °C	Erish temperaturasi °C
CoSi	0,68	KUBIK	400	1460
CoSi <sub>2</sub>	0,64	KUBIK	450	1326
CrSi <sub>2</sub>	0,57	GEKSOGANAL	450	1475
HfSi	0,53	TRIGONAL	550	2200
IrSi	0,93		300	-
MnSi	0,76	KUBIK	400	1275
Mn <sub>11</sub> Si <sub>19</sub>	0,72	TETRAGONAL	800a	1145
MoSi <sub>2</sub>	0,55	TETRAGONAL	1000a	1980
Ni <sub>2</sub> Si	0,7- 0,75	TRIGONAL	200	1318
NiSi	0,66- 0,75	TRIGONAL	400	992
NiSi <sub>2</sub>	0,7	KUBIK	800a	993
Pd <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub>	0,60	TRIGONAL	650	1540
WSi <sub>2</sub>	0,65	TETRAGONAL	650	2150
ZrSi <sub>2</sub>	0,55	TRIGONAL	600	1520



## kT ning temperaturaga bog'liqligi

8-jadval

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 doimiyliklar

9-jadval

	Kattaliklar nomi	Belgi-lanishi	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	Ekektronning 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 soni	$h$	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	Bolsman soni	$k_B$	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	( $hc/e^2$ )	$l/a$	137,036	-	-
12	Kvant magnit oqimi ( $hc/e$ )	$F_0$	4,135708	$10^{-7}$ gs·sm <sup>2</sup>	$10^{-15}$ Vb

## Foton energiyasi

1	1 elektron volt	$eV$	1,60219	$10^{-12}$ erg	$10^{-19}$ J
2	$eV/h$		2,41797	$10^{14}$ gs	$10^{14}$ gs

3	$eV/(hc)$ (to'lqin xossasi)		8,06546	$10^3 \text{ sm}^{-1}$	$10^5 \text{ m}^{-1}$
4	$eV/(k_B)$		1,16048	$10^4 \text{ K}$	$10^4 \text{ K}$
5	Vakumda dielektrik o'tkazuvchanlik	$\epsilon_0$	8,854		$10^{-12} \text{ m}$

### Elektr birliklari

10-jadval

9	Zaryad miqdori	kulon (C)	$3 \cdot 10^9$	$1/3 \cdot 10^{-9}$	statkulon
10	Elektr toki	amper (A)	$3 \cdot 10^9$	$1/3 \cdot 10^{-9}$	statamper
11	Elektr maydondagi nuqtaning potensiali	volt (V)	1/300	300	statvolt
12	Qutblanish	culon/metr <sup>2</sup>	$3 \cdot 10^5$	$1/3 \cdot 10^{-5}$	statkulon/sm <sup>2</sup>
13	O'tkazuvchanlik	sim	$9 \cdot 10^{11}$	$1/9 \cdot 10^{-11}$	statmo
14	Qarshilik	om ( $\Omega$ )	$1/9 \cdot 10^{-11}$	$1/9 \cdot 10^{11}$	statom
15	Sig'im	farada (F)	$1/9 \cdot 10^{11}$	$1/9 \cdot 10^{-11}$	statfarada

### Magnit birliklar

16	Magnit oqimi	veber (Vb)	$10^8$	$10^{-8}$	maksvel [gs·sm <sup>-2</sup> ]
17	Magnit induksiya	tesla (Ts)	$10^4$	$10^{-4}$	gs

### Fizikadagi asosiy birliklar

11-jadval

	Kattaliklar nomi	XBS dagi asosiy birlilikar	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)	$10^5$	$10^{-5}$	g·sm/(sek) <sup>2</sup>
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	

**Yarim o'tkazgich elementlarida tok tashuvchi zaryadlarning 300  
K haroratdagи harakatchanlik qiymati ( $\text{sm}^2/\text{v}\cdot\text{sek}$ )**

**12-jadval**

Ele- mentlar	Elektron- larning harakat- chanligi	Kovak- larning harakat- chanligi	Element- lar	Elektron- larning harakat- chanligi	Kovak- larning harakat- chanligi
Olmos	900-3900	1200-4800	CdSb	360-660	300-700
Ge	3600-3900	1700-1900	CdS	200	-
Si	1200-1900	350-500	CdSe	500	-
Te	910	570	CdTe	800	100
NaCl	250 (84 K)	-	HgTe	16000	16000
KCl	100 (90 K); 3	-	AlSb	50-200	100-200
KBr	110 (84 K); 12,5	-	GaP	-	17
KJ	155 (84 K)	2-6	GaAs	2000-6800	200-680
AgCl	300 (85 K); 50-70	40	GaSb	2500-5000	400-1000
AgBr	240	-	InP	3400-5000	50-700
Cs <sub>2</sub> Sb	500	10	InAs	20000-30000	100-240
MgO	-	2	InSb	65000-80000	700-4000
ZnO	180	-	InSe	900	-
BaO	3-9	-	In <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>	30	-
Mg <sub>2</sub> Ge	500	100	PbS	600	250-800
Mg <sub>2</sub> Si	400	70	PbSe	1200-1400	500-1400
Mg <sub>2</sub> Sn	200-300	150-200	PbTe	1200-2100	750-870
Mg <sub>2</sub> Sb <sub>2</sub>	-	100	AgFeSe <sub>2</sub>	>250	70
ZnSb	-	300	AgFeTe <sub>2</sub>	>2000	150

**13-jadval**

Element nomi			Element nomi		
	n-elektron	p-kovak		n-elektron	p-kovak
Ge	-1,66	-2,33	Mg <sub>3</sub> Sb <sub>2</sub>		-1,5
Si	-2,5	-2,5	GaSb	-1,5	-1,5
olmos	-1,5	-2,8	InP	-2	

<b>AgCl</b>	-1,5		<b>InAs</b>	-1,5	>-2
<b>Cs<sub>3</sub>Sb</b>	-1,5		<b>InSb</b>	1,7	-2,1
<b>ZnO</b>	-1,5		<b>PbS</b>		
<b>MgSi</b>			<b>PbSe</b>	-2,5 dan -2,2	-2,5 dan -2,2
<b>Mg<sub>3</sub>Ge</b>	-2,5 dan -3	-2,5 dan -3	<b>PbTe</b>		
<b>Mg<sub>3</sub>Sn</b>					

# Yarim o'tkazgich materiallarning metallardan fundamental farqlari

## Fundamental differences between semiconductors and metals

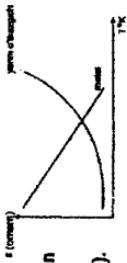
1. Yarim o'tkazgich materiallarda 2 xil zaryad tashuvchilar mavjud. Elektronlar (n). Kovaklar (p). Metallarda zaryad tashuvchilar faqat elektronlardir. (Kovak-kovalent bog'lanishga qatnashayotgan valent elektronlarini yo'qotgan mushbat zaryadga aylangan yarim o'tkazgich materiallarning asosiy atomidir).
2. Yarim o'tkazgich materiallarda zaryad tashuvchi kovak va elektronlarning yashash vaqtini marjuid. Ularning qiyamati  $\tau_n - \tau_p = 10^{-1} + 10^{11}$  sekund oralig'ida o'zgarish mumkin. Metallarda esa zaryad tashuvchilarning yashash vaqtini degan tushuncha yo'q. (Elektronlarning yashash vaqtini elektronning o'tkazuvchanlik sohasida bo'lish vaqtidir, kovaklarning yashash vaqtini esa ularning valent zonada bo'lish vaqtini).
3. Yarim o'tkazgich materiallarda elektronning harakatchanligi metallarda nisbatdan 100 yoki 1000 marba katta bo'lishi mumkin. ( $\mu_n$  - birligi  $sm^2/Vs$  harakatchanlik bu bir birlilik elektron maydonini ta'sirida elektronlarning Dreyf tezligi o'zgarishidir).
4. Yarim o'tkazgich materiallarning solishidirma o'ba'zo'vchanligi harorat ostishni bilan eksponentsiyal qonun bo'yicha ostadi. ( $\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{E}{kT}} \cdot (cm^{-3} \cdot m)^{-1}$ ) metallarda esa harorat ostishi bilan chiziqli xolda kamayadi.  $\sigma = \sigma_0 - \alpha T$ .

There are 2 types of charge carriers in semiconductors. Electrons(n). Holes (p). In metals the only charge carriers are electrons. (Atoms that lose electrons participating in hole-covalent bond turn to positive ion).

There is such a notion as charge carriers (electrons and holes) lifetime in semiconductors. Their value is manageable in the range of  $\tau_n - \tau_p = 10^{-1} + 10^{11}$  seconds. There is no such a notion as lifetime of charge carriers in metals. (The electron's lifetime is its time of being in conductance band, whereas the hole's lifetime is the time of its being in the valence band).

$$\mu_n = \frac{e}{m^2 \pi} v; \mu_p = \frac{e}{m^2 p} v$$

Mobility of electrons in semiconductors could be 100 or even 1000 times more than its mobility in metals. ( $\mu_n - 10^4 - 10^5 \text{ cm}^2/Vs$  Mobility is the change in drift velocity in the unit electric field).

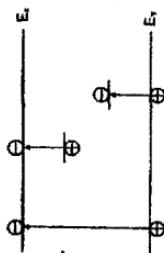


- 5.** Yarim o'tkazgich materiallarning solishtirma o'tkazuvchanligi Krishma atomlarning miqdori o'ta bog'lidir. ( Asosiy atomlar konseentrasiyasining  $10^{-4}$  mlqdorligi Krishma atomlar kiritilganda ularning o'tkazuvchanligi 1000 marta oshishi mumkin) metallarda bunday holat mavjud emas.

- 6.** Yarim o'tkazgich materiallarda taqiqlangan zona mavjud bo'lib ularning miqdori  $E_g = 0.2 + 0.3$  eV gacha o'garishni mumkin. (Taqiqlangan soha kataligi eV bilan o'chanadi va u kivalent bog' lanishiga qatnashroyotgan valent elektronlarini ozodqilishi uchun kerak bo'lgan energiyaga aytiladi).



- 7.** Yarim o'tkazgich materiallarning o'tkazuvchanligini yorug'ilik tasdirida juda katta oraliqda bosqarish mumkin. Metallar o'tkazuvchanligi yorug'ilik tasdirida umuman o'zarmaydi. (Bu esa ichki fotoeffekt hodisasi bilan tushuntirildi, metallarda ichki fotoeffekt holati mavjud emas).

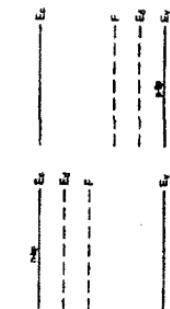


Relative conductivity of semiconductor materials increasingly depends on the concentration of impurity atoms (in times of doping the basic material by impurity atoms in concentration of  $10^{-3}$  of the concentration of basic atoms, their conductivity may increase roughly 1000 times). One cannot find similar trend in metals

There is forbidden band in semiconductor materials and its value can extend to  $E_g = 0.2 + 0.3$  eV (the value of the forbidden band is measured in eV and it equals to the energy required to free the electron participating in the covalent type of binding).

There is the possibility to change the forbidden band's width in wider ranges by subjecting the semiconductor material to light. The conductivity of metals virtually does not change when subjected to light (this is explained by inner photo effect, in metals there is no such thing as inner photo effect).

- 8.** Yarim o'tkazgich materiallar 2 xil n-va p-tip o'tkazuvchanlikka eng bo'ladil. (n-tipli yarim o'tkazgichlarda elektronlar konseentratsiyasi, kovalklar konseentratsiyasidan juda kop bo'ladi,  $n \gg p$  bunday materiallarni, uiar ga donar Krishma atomlari kiritish yo'lli bilan olinadi), p-tipli materiallarda esa  $p \gg n$  (ular akceptor Krishma atomlar kiritish yo'lli bilan olinadi).



Semiconductor materials can expose 2 types of conductivity n- and p-type in n-type of semiconductors the concentration of electrons surpasses the concentration of holes by  $n \gg p$ , such materials could be obtained by doping them with donor atoms). In p-type materials its vice versa  $p \gg n$  (such materials could be obtained by doping them with acceptor atoms).

**9.** Yarim o'tazgich materiallarda relaksatsiya vaqtı materiallarga qaranganda o'ta o'zgaruvchan va katta bo'ladi. (Metallarda  $r \sim 10^{-13}$  relaksatsiya vaqtı bu - tashqi tasiri olingandan keyin nomuvozozanat holatdan muvozanat holat tilkanishi uchun kerak bo'ladiğan vaqtıdır).

$\tau_e$  relaxation time in semiconductor materials compare to metals can change in wider ranges and is relatively high (In metals  $r \sim 10^{-13}$  relaxation time is the time span required for transferring from non-equilibrium state to the equilibrium state).

**10.** Yarim o'tazgich materiallarda elektronlar effektiv massaga ega bo'ladi:  $m_{eff}^2 = \frac{1}{h^2} \frac{\partial^2 E(K)}{\partial K^2}$  ( $m^2 = \frac{1}{h^2} \frac{\partial^2 E(K)}{\partial K^2}$ ) (e-n effektiv massa - bu kristall panjara davriy potensialarning e-n harakatiga tasirini ko'rsatuvchi kattalik bo'llib haqiqiy massaga ega bo'lmagan kattalik).

In semiconductor materials electrons have effective mass  $m_{eff}^2, m_p^2, (m^2 = \frac{1}{h^2} \frac{\partial^2 E(K)}{\partial K^2})$  (the effective mass is the effective mass - is the indicator of influence of crystal lattice of elements of the periodic table on the mobility of electron and does not represent the real physical mass).

**11.** Yarim o'tazgich materiallarning fizik xossalari tashqi tasirlarga (bosim, magnit maydon, radiatsiya...) o'ta sezgirdir.

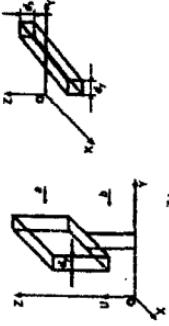
Physical properties of semiconductor materials is very sensitive to various influences (pressure, magnetic field, irradiation and so on).

**12.** Yarim o'tazgichlar materiallar o'ziga xos kimyoriy bog'lanishiga ega bo'llib, bunday  $sp^3$ -tetraedrik kovalent bog'lanish  $= As = Ge = Al = Si = Ge = As = Ge = Si = Ge = Si = Ge =$  bo'ladi.

Semiconductor materials are characterized by specific chemical bonding, and such bonding is achieved by  $sp^3$ -tetrahedral covalent bond or partially by ion-covalent bond.

13. Yarim o'tkezgich materiallarda nano o'chanlik to 'qinuzunligiga ega bo'lgan yang'ik cheljish imumkin. [Fotonjurnalsuessiya va elektrolyunduninessiya, laserlar].

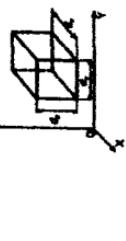
In certain conditions semiconductor materials can irradiate light of certain wavelength (photoluminescence and electroluminescence, lasers).



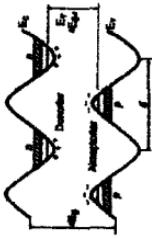
14. Yarim o'tkezgich materiallarda nano o'chanlik strukturlar (kvant nusqasi, k vart [q], kvant chiqurig') bosil qilish bilan uarming fundamental parametrlarin lo'zgartirish va boshqarish mumkin.

De Broil to'qjin usulindagi  $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$  - kvant nusqa  $a_x, a_y, a_z \sim \lambda, a_x, a_y, a_z > \lambda$  kvantipli  $a_x, a_y, a_z \gg \lambda$  kvant chiqurig'i.

By establishing nanoscale structures (quantum dots, quantum wires and quantum wells) in semiconductor materials one can change and manage their fundamental parameters  $a_x, a_y, a_z \sim \lambda, a_x, a_y, a_z > \lambda$  of quantum Broglie wavelength.  $a_x, a_y, a_z \gg \lambda$  quantum well.

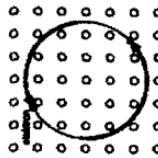


15. Yarim o'tkezgich materiallarda, stidi yoki xajmida tashuvchilar koncentrasiya gradientini hohlegancha hosil qilish mumkin.



In semiconductor materials whether on surface or in the bulk there is the possibility to create gradient of concentration of charge carriers.

16. Yarim o'tkezgich materiallarda elektron-elektron va kovaldar jutligi maxjud. (Ular o'tkezvchanligiga qatnashmagani holda jut bo'llib haraket qiladi).



There are exciton-electron and holes pairs in semiconductor materials (they participate in conductivity in pair state).

## YARIM O'TKAZGICH

O'zbekcha	Ruscha	Englizcha
Ajratmoq	Разделять	uncouple
alohida atom	изолированный атом	atom isolated
Amplitude	Амплитуда	amplitude
Amplitudaqiyati	амплитудное значение	value crest
Ampula	Ампула	ampoule
Aralashma	Примесь	admixture
Aralashma	Примесь	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'limgan zaryad tashuvchi	неосновной носитель заряда	minority
asosiy kattalik	основная величина	quantity fundamental
atom nomeri	атомный номер	number atomic
Avtomatik	автоматический	unmanned
Aynimagan	невырожденный	nonsingular
Birjinsli	однородный	inndiscrete
birjinsli bo'limgan	неоднородный	inhomogeneous
birjinsli maydon	однородное поле	field uniform
bo'linish sirti	поверхность раздела	interface
bog'lanish	Связь	bond
bog'lanish	зависимость	dependence
bog'lanish energiyasi	энергия связи	energy binding (bond)
bosim datchigi	датчик давления	transducer pressure
bug', bug'lar	пар, пары	vaper
bug'lanish	испарение	evaporation
bug'lanish	испарение	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	напряженность	intensity electric
kuchlanganligi	электрического поля	
elektron (kovak)ning	эффективная масса	mass effective electron
effektiv massasi	электрона (дырки)	(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 nafis 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
phototok	фототок	photocurrent
g'adir-budur, go'pol	шероховатый, грубый	rugged
g'ovak	Пора	pore
gaz	Газ	gas
gelio qurilmasi	гелиоустановка	solar power plant
generatsiya tezligi	скорость генераций	rate generation
generatsiya tezligi	скорость генерации	velocity generation
grafik	График	plot
had, energiyaviy sath	член, энергетический уровень	term
hajm	Объём	volume
hajm birligida	в единице объема	volume in unit
harakat, amal, ish	операция	job
harakat, ko'chish	движение, перемещение	movement
harakatchanlik	подвижность	mobility
havfsiz	безопасный	safe
hisob-kitob	Расчет	estimation
hodisa	явление	phenomenon
idish	Сосуд	vessel

<b>inert, sekin</b>	инертный	passive
<b>infraqizil yorug'lik</b>	инфракрасный свет	light infrared
<b>ionlash</b>	ионизация	ionization
<b>ishchi temperatura</b>	рабочая температура	temperature operating
<b>ishlash</b>	обработка	treatment
<b>ishlov berilmagan</b>	необработанный	uncured
<b>ishlov berilmagantebratmoq</b>	необработанный	unprocessed
<b>isitgich</b>	подогреватель	preheat
<b>issiqlikka chidamlı</b>	теплостойкий	heat-resistant
<b>izolyatsiya</b>	изоляция	insulation
<b>jadval qiymat</b>	табличное значение	value tabulated
<b>jo'mrak</b>	кран, вентиль	faucet
<b>joy, kovak</b>	Гнездо	jack
<b>juft son</b>	четное число	number even
<b>kam legirlangan</b>	малолегированный	low-alloy
<b>kambag' allashgan qatlam</b>	обедненный слой	layer depletion
<b>kambag' allashgan soha</b>	обедненная область	reflection depletion
<b>kamera, xona</b>	Камера	chamber
<b>kezish, ko'chish</b>	миграция, перенос	migration
<b>kimyoviy yedirgich</b>	травитель	etchant
<b>kimyoviy yedirish</b>	химическое травление	etching chemical
<b>kimyoviy yuvish</b>	травить, травление	etch
<b>kirishma sathi</b>	примесный уровень	level impurity
<b>kirishma zonası</b>	примесная зона	zone extrinsic
<b>kirishma zonasi</b>	примесная зона	zone impurity
<b>kirishmali markaz</b>	примесный центр	center impurity
<b>Kirishmasiz</b>	беспримесный	uncontaminated
<b>kiritmoq, joriy etmoq</b>	внедрять	implant
<b>ko'chirish hodisasi</b>	явления переноса	phenomena transport
<b>ko'paytirish, kuchaytirish</b>	умножение, увеличение, усилитель	multiplication
<b>ko'rinvuchi yorug'lik</b>	видимый свет	light visible
<b>ko'rsatish</b>	показание	score
<b>Konsentratsiya</b>	концентрация	concentration
<b>kontakt (ulanish) joyi</b>	контактное гнездо	jack pin
<b>kontakt potensial farqi</b>	контактная разница потенциалов	difference contact
<b>Kovak</b>	Дырка	hole
<b>kovshar, kovsharlamоq</b>	припой, запаивать	solder
<b>Kovsharlagich</b>	паяльник	tool soldering
<b>Kremniy</b>	кремний	silicium
<b>Kuchaytirgich</b>	усилитель	intensifier
<b>Kuchaytirish</b>	усиление	amplification

Kuchaytirish	усиление	enhancement
Kuchlanish	напряжение	voltage
kukun, chang	порошок, пыль	dust
kuydirish yoki quritish pechi	печь для обжига или сушки	kiln
kuydirish, qizdirish	Обжиг	kilning
Kuydirmoq	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. sim. Ustuni	миллиметр ртутного столба	millimeter of mercury
model, shakl, nazariya	модель, теория	model
Monokristall	монокристалл	crystal single
moydan tozalamoq	обезжиривать	degrease
n <sup>+</sup> -n turdag'i o'tish	переход типа n <sup>+</sup> -n	junction n <sup>+</sup> -n
Namlik	влажность	humidify
namuna, sinash	образец, проба	sample
namuna, tur	образец, тип	exponent
nazoratdag'i namuna	контрольный образец	sample check
nodir yerli	редкоземельный	rare-earth
nomonoton	немонотонный	nonmonotonic
nomuntazam	нерегулярный	nonregular
n-p-n (p-n-p) turdag'i tranzistor	транзистор типа n-p-n (p-n-p)	transistor n-p-n (p-n-p)
nur chiqarish, nurlantirish	лучеиспускание, облучение	irradiation
nurlanish	излучение	emittance
nurlanish	излучение	radiation
nurlantirishsiz	безызлучательный	nonradiative
o'rtacha yashash vaqt'i	среднее время жизни	life average
o'sish	Рост	growth
o'sish markazi	затравка	crystal seed
o'sish markazi	затравка	seed
o'stirish	выращивание	growing
o'ta yuqori vakuumli	сверхвысоковакуумный	ultra-vacuum
o'tkazuvchanlik elektronni	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	самопишащий прибор	apparatus registering
o'zi yozuvchi asbob	самописец	instrument recording
oksidlanmaslik	неокисляемость	Unoxidizability
olmoq, hosil qilmoq	получать	obtain
oniq qiymat	мгновенное значение	value instantaneus
oqaliq, tirkish	зазор, промежуток	gap
oqim	Струя	jet
oqish, oqim	течение, поток	flow
oraliq qatlam	промежуточный слой	layer interfacial
orgaga urish	Отдача	kickback
ortiqcha	избыток	overbalance
ortiqcha qizish	перегрев	overheat
panjara	решетка	grate
pasayish vaqtı, o'sish vaqtı	время спада, время затухания	time decay
past temperaturali	низкотемпературный	low-temperature
pastki qatlam	нижний слой	underlayer
paydo qilmoq, o'sish markazlari hosil qilmoq	зарождать, образовывать зародыши	nucleate
payvandlangan	запаянный	sealed
p-n o'tish	p-n переход	boundary p-n
p-n o'tish	p-p переход	junction electron-hole
probirka	пробирка	glass test
qarshilik	сопротивление	resistance
qatlamdor	слоистый	schistose
qatlamdor, 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
qiyyayuvchilar oilasi	семейство кривых	family of curves
Qizdirgich	печь	oven
qizdirgich, pech	печь	furnace
qizdirish toki	ток накала	current filament
Qorishma	смесь	interfusion
qorong'ulik qarshiligi	темновое сопротивление	resistance dark
qorong'ulikdagı tok	темновой ток	current dark
Qurilma	установка	erection
qurirish kamerasi	сушильная камера	baker

Quritish	высушивать	desiccate, exiccate
Quritmoq	сушить	bake
quyma blok, chorqirrali bo'lak	слиток, бруск	pig
rezina, kauchuk	резина, каучук	rubber
rivoj markazi	затравка	Nucleator
ruhsat etilgan	разрешенный	permitted
ruhsat etilgan energiyaviy sath	разрешенный энергетический уровень	level permitted energy
ruhsat etilgan soha	нижний край разрешенной	bottom of allowed band
Sakrash	с скачок	jerk
Saqlgich	предохранитель	safeguard
saqlovchi xalqa	охранное кольцо	ring guard
Sath	уровень	level
Sayqallash	шлифовать	abrade
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	ёмкость	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'rvuchni nasos	откачивающий насос	pump dump
Soha	зона	band
soha modeli	зонная модель	model band
sozlash dastasi	ручка настройки	knob tuning
spektrning ko'rinvuchi qismi	волны видимой части спектра	optical waves
ta'minlovchi tok	ток питания	current feed
ta'minot bloke	блок питания	unit supply
ta'qiqlangan energetik soha	запрещенная энергетическая зона	band forbidden
ta'sir etmoq	воздействовать, влиять	affect
Taglik	подложка	back
Taglik	подложка	undercoat
taqiqlangan soha	запрещенная область	region forbidden

taqıqlangan soha kengligi	ширина запрещенной зоны	gap band
taqıqlangan zona	запрещенная зона	zone forbidden
taqsımlanış koeffitsiyenti	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 transduser temperarure-sensing
termoelement	термоэлемент	thermal
termojuft	термопара	pyod
termojuft	термопара	thermocouple
tigel qizdirgich	тигельная печь	oven crusible
tigelli eritish	тигельная плавка	melting crucibly
to'g'rilaqich, 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
tozalash	очистка	sanding
tugun	узел	knot
tugun, joy	узел, место	site
tugunlararo diffuziya	диффузия по междоузлиям	diffusion interstitial
tugunlararo joylashgan atom	внедренный атом	atom interstitial
tutashgan joy, ulangan	соединение	join
tutib olish	захватывать	entrap
uchib o'tish vaqtı	время пролета	time transit
ulanish joyi	спай	weld
ulash, payvandlash	пайка	soldering
ushlab olish	захват	grip
ushlab olish ko'ndalang kesim yuzi	сечение захвата	cross-section capture
ustki qatlamni olib tashlash	удаление поверхности слоя	desurfacing

uzoq infraqizil soha	далняя инфракрасная область	region far infrared
uzuq-uzuq	прерывистость	jerkiness
vakuum jo'mragi	вакуумный кран	tap vacuum
vakuumning buzilishi	ухудшение вакуума	loss of vacuum
valentlik	валентность	valency
Volt-amper tavsifi	вольт-амперная характеристика	characteristic current voltage
xalqa	кольцо	ring
xarakteristika, tavsif	характеристика	characteristic
Xoll effekti	эффект Холла	effect Hall
Xoll harakatchanligi	холловская подвижность	mobility Hall
Xoll potensiallar farqi	холловская разность потенциалов	voltage Hall
xususiy o'tkazuvchanlik	собственная электропроводность	conductivity intrinsic
xususiy yutilish	собственное поглощение	intrinsic absorb
yarimto'lqin	половолна	wave half
yashash vaqtı	время жизни	lifetime
yashash vaqtı	время жизни	lifetime
yo'qotishsiz	без потерь	zero-loss
Yoritilganlik	освещенность	intensity illumination
yorug'lik sezgirlik	светочувствительность	light sensitivity
yorug'likka sezgir	светочувствительный	photosensitive
yoylish vaqtı	длительность развертки	length sweep
yoyma, yoyma	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
P-simon impuls	P-образный импульс	wave flat-topped
(kristallning) o'sish markazi	затравка	etch flat
(potensial) o'ra	(потенциальная) яма	well

## Foydalaniłgan adabiyotlar

1. Teshaboyev A.T., Zaynabiddinov C.Z., Ermatov Sh, Qattiq jism fizikasi. Darslik. –T.: Moliya, 2001. – 164 b.
2. Akramov H., Zaynabiddinov C., Teshaboyev A. Yarim o'tkazgichlarda fotoelektrik hodisalar. O'quv qo'llanma. -T.: O'zbekiston, 1994. – 134 b.
3. Bahodirxonov M.K., Iliiev X.M., Xolmatov A.A., Ярим утказгичлар физикаси асослари дарслик. -Т.: ТошДТУ, 2014. - 186 б.
4. Тешабоев А. Т., Зайнаббидинов С.З., Исмоилов К.А., Эрматов Ш.А., Абдуазимов В.А. Нанозарралар физикаси, кимёси ва технологиялари. Ўкув қўлланма. Т.: Камалак прес, 2014. - 368 б.
5. Teshaboyev A., Zaynobidinov S., Musayev E.A., Yarim o'tkazgichlar va yarimo'tkazgichli asboblar texnologiyasi.O'quv qo'llanma - T.: Talqin - Qaldirg'och, 2006. - 336 b.
6. Нормуродов М.Т., Умирзоқов Б.Е., Пармонқулов И.П. Электрон техника материаллари ва қурилмалари технологияси. Дарслик. - Т.: Мехнат, 2004. – 362 б.
7. Пармонқулов И.П., Умирзоқов Б.Е., Шаҳобиддинов З.Н., Рисбаев А.С., Электрон асбоблар ва қурилмалар ишлаб чиқариш технологияси. Ўкув қўлланма. - Т.: ТДТУ, 2002. – 136 б.
8. Parmonqulov I.P, Umirzoqov B.Ye., Elektron texnika mahsulotlarini yig'ish texnologiyasi. O'quv qo'llanma. –T.: Voris-nashriyot, 2006. - 272b.
9. Илиев Х.М. Ярим ўтказгичли асбоблар ва интеграл схемалар технологияси. Маъruzalap tўplami. -Т.: ТДТУ, 1999. – 90 б.
10. Bahodirxonov M.C., Ibrohimov H., Zikrilllaev H.F., Илиев Х.М. Ярим ўтказгичли асбоблар ва интеграл схемалар технологияси курсига оид атамалар. -Т.: ТДТУ, 1999. -30 б.
11. Мамадалимов А.Т., Турсунов М.Н., Ярим ўтказгичли күёш элементлари физикаси ва технологияси. Ўкув қўлланма. -Т.: ЎзМУ, 2003.-104 б.
12. Бахадирханов М.К., Кобылин Г.О., Тачилин С.А. Физика и технология солнечных элементов. Учебное пособие 1 и 2 часть. –Т.: NISIM, 2007.-149c.

13. Илиев Х.М., Ковешников С.В., Усенкон Ю. Альтернативные источники энергии. Учебное пособие. -Т.: Саёхат, 2007.-146б.
14. Пул-мл.Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. Учебное пособие. – М.: Техносфера, 2010.-336с
15. Мартинес-Дуарт Дж.М., Мартин-Палма Р.Дж., Фчулло-Руеда Ф. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники. Учебное пособие. –М.: Техносфера, 2007.-368с
16. Bahodirxonov M.K., Qurbonova O‘. H, Isayev F.M., Muradagayeva M.V., Nanoelektronikaning fizik tushunchalari bo‘yicha izohli lug‘at. –Т.: Meriyus, 2010.-136b.
17. Zikirillayev N.F., Begimqulova K.Q., Noananaviy qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan izohli lug‘at. -Т.: Meriyus, 2010.-145b.
18. Bahodirxonov M.K., Iliyev X.M., Isayev F.M., Karimov R.A., Elektronika fanidan asosiy tushunchalar izohli lug‘at. –Т.: Meriyus, 2008.-134b.

### **Internet saytlari:**

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>
10. [http://esco-escosys.narod.ru/2003\\_5/index.htm](http://esco-escosys.narod.ru/2003_5/index.htm)

## **1. QATTIQ JISMLAR**

1.1 Qattiq jismlarning fizikasida asosiy tushunchalar.....	9
1.2 Qattiq jismlarning kristall panjaralari.....	11
1.3 Miller indekslari.....	20
1.4 Teskari elementar panjara.....	22
1.5 Qattiq jismlarda kimyoviy bog‘lanish.....	24
1.6 Kristall panjara nuqsonlari.....	26

## **2. YARIM O‘TKAZGICH MATERIALLARI**

2.1 Yarim o‘tkazgichlarning noyob xossalari.....	32
2.2 Yarim o‘tkazgich materiallarda kimyoviy bog‘lanish.....	33
2.3 Yarim o‘tkazgich materiallarida kristall panjara tuzilishi.....	34
2.4 Yarim o‘tkazgich materiallaridagi nuqsonlar.....	37
2.5 Yarim o‘tkazgich materiallariga kirishma atomlar kiritish usullari.....	38
2.6 Kirishma atomlar diffuziyasi.....	40
2.7 Kirishma atomlarning eruvchanligi.....	43
2.8 Binar yarim o‘tkazgich materiallarida kirishma atomlar eruvchanligi.....	46

## **3. YARIM O‘TKAZGICHLARDA ZARYAD TASHUVCHILAR STATISTIKASI**

3.1 Yarim o‘tkazgichlarda tok o‘tkazish mexanizmi.....	52
3.2 Yarim o‘tkazgichlarda tok tashuvchilar tabiatı.....	53
3.3 Fermi–Dirak taqsimoti.....	57
3.4 Elektr neytrallik tenglamasi.....	59
3.5 Xususiy yarim o‘tkazgichlar.....	60
3.6 Kirishma atomli yarim o‘tkazgichlarda Fermi sathi.....	62
3.7 Donor hamda akseptorli kirishma atomlari mavjud bo‘lgan yarim o‘tkazgichlar.....	65
3.8 Birdan ko‘b energetik sath hosil qiluvchi kirishma atomlari mavjud bo‘lgan yarim o‘tkazgichlar.....	66

## **4 . YARIM O'TKAZGICHLARDA FOTOELEKTRIK HODISALAR**

4.1 Fotoo'tkazuvchanlik.....	70
4.2 Zaryad tashuvchilarning yashash vaqtı.....	72
4.3 Yutish yuzasi.....	73
4.4 Rekombinatsion va fotosezgirlikni oshiruvchi markazlar.....	75
4.5 Rekombinatsiya turlari.....	77
4.6 Yorug'likning yarim o'tkazgichlarda yutilishi yoki optik hodisalari.....	78
4.7 Xususiy yutulishlar.....	81

## **5 . QATTIQ JISMLARDA ELEKTRONLARNING ENERGETIK HOLATLARI**

5.1 Elektronlarning atomlardagi energetik holatlari.....	85
5.2 Qattiq jismlarda elektronlar energetik holati.....	87
5.3 Elektronning effektiv massasi.....	96

## **6. YARIM O'TKAZGICHLARDA KINETIK HODISALAR**

6.1 Yarim o'tkazgichlarda kinetik hodisalar.....	102
6.2 Yarim o'tkazgichlarda zaryad tashuvchilarning harakatchanligi..	104
6.3 Boltsman tenglamasi.....	105
6.4 Elektronlarning kristall panjara nuqsonlarida sochilishi.....	107
6.4.1 Elektronlarning zaryadlangan nuqsonlarda sochilishi.....	107
6.4.2 Elektroneytral nuqsonlarda sochilish.....	109
6.4.3 Zaryad tashuvchilarning kristall panjara tebranishlarida sochilishi.....	109

## **7. METALL YARIM O'TKAZGICH KONTAKTI VA p – n O'TISH FIZIKASI**

7.1 Qattiq jismlarda chiqish ishi.....	112
7.2 Metall – yarim o'tkazgich kontakti.....	113
7.3 Omik kontakt.....	117
7.4 Shottki diode.....	118

7.5 p – n o‘tish olish texnologiyasi.....	121
7.6 p – n o‘tish fizikasi.....	123
7.7 p – n o‘tishga tashqi manba ulangandagi holat.....	125
7.8 Geteroo‘tishlar.....	128
7.9 Quyosh elementi.....	132

## 8. TRANZISTORLAR

8.1 Bipolyar tranzistorning tuzilishi.....	139
8.2 Tranzistorning dinamik holatda ishlashi.....	144
8.3 Maydon tranzistorlari .....	145
8.4 Maydonli tranzistorlarning asosiy parametrlari.....	148

## 9. MIKROELEKTRONIKANING RIVOJLANISHIDA TEXNOLOGIYANING O‘RNI

9.1 Kremniyli taglikka mexanik ishlov berish.....	152
9.2 Kremniy sirtini tozalash.....	154
9.3 Abraziv materiallar.....	155
9.4 Yarim o‘tkazgichli plastinkani jilvirlash.....	159
9.5 Fizikaviy va kimyoviy yog‘sizlantirish usullari.....	165
9.6 Yemirilish tezligi.....	166
9.7 Implantatsyaning amaliy usulblari.....	174
9.8 Fotolitografiya.....	177
9.9 Fotolitografiya jarayoni.....	179
9.10 Proyeksiyali eksponirlash.....	183
9.11 Nam kislородли мухитда кремнийни qizdirib oksidlash.....	186
9.12 Tetraetaksisilan $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ ning termik parchalanishidan oksid qatlam o‘stirish.....	188
9.13 Bipolyar ISlarni tayyorlash texnologiyasi.....	189
9.14 Metall Oksid Yarim o‘tkazgich (MOYa) strukturali asosidagi ISlarni texnologiyasi.....	192
9.15 Komplementar MOYa KNS IS.....	195
9.16 Gibrid IS lar tayyorlashning texnologik jarayonlari.....	200

## **10 . NANO O'LCHAMLI YARIM O'TKAZGICHALAR FIZIKASIGA KIRISH**

10.1 Nano fan yo'nalishlari va qo'llanilish sohalari.....	224
10.2 Mikrozarralarning to'lqin xossalari.....	225
10.3 To'g'ri burchakli potensial to'siqlarda elektronlar energiyasi....	227
10.4 Nanoo'lchamli moddalar turlari.....	229
10.5 Nanoo'lchamli kristallarda elektronlar energetik sathlari va kvant holatlar zichligi.....	231
10.6 Yarimo'tkazgichli o'ta panjaralar.....	235
10.7 Nanoo'lchamli strukturalarni hosil qilish usullari.....	236
10.8 Nanoo'lchamli yarimo'tkazgichlar asosidagi yangi elektron qurulmalar.....	240

## **11. KREMNIYDA CHUQUR ENERGETIK SATIH XOSIL QILUVCHI KIRISHMALAR ASOSIDA KUZATILADIGAN FIZIK XODISALAR**

11.1 Kompensatsiyalangan kremniyda fotootkazuvchanlikni infraqizil nur ta'sirida so'nishi .....	245
11.2 Kompensatsiyalangan kremniyda fotootkazuvchanlikni harorat ta'sirida so'nishi.....	248
11.3 Kompensatsiyalangan kremniyda fotootkazuvchanlikni uzoq muddatli relaksasiyasi va qoldiq o'tkazuvchanlik.....	250
11.4 Kompensatsiyalangan kremniyda manfiy magnit qarshilik.....	251
11.5 Kirishma atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniyni tenzo xususiyatlari.....	252
11.5.1 Kompensatsiyalangan kremniyning tenzoxususiyatlarini o'rganishdagi tajriba qurilmalari bir oqli bosim xosil qilish qurilmasi.....	253
11.6 Kirishma atomlar bilan kompensatsiyalangan kremniyning tenzo xususiyatlari.....	254
11.7 Bir oqli bosimni kompensatsiyalangan kremniydagi fotootkazuvchanlik xodisasiga ta'siri.....	256
11.8 Har tomonlama gidrostatik bosimni kompensatsiyalangan kremniydagi kirishma atomlarining xolatiga ta'siri.....	258
11.9 Kompensatsiyalangan kremniydagi past chastotali	

Avtotebranishlar.....	262
11.10 Kompensatsiyalangan kremniydagи avtotebranishlarni dinamik xaos va gisterezis xolati.....	264
11.11 Kompensatsiyalangan kremniydagи avtotebranishlarni tabiatи va o'zaro bog'liqligi.....	266

## **12 . KOMPENSATSIYALANGAN KREMNIY ASOSIDA FIZIK KATTALIKLARNI O'LCHOVCHI DATCHIKLAR**

12.1 Infragizil va integral nurlarni sezuvchi fotopremniklar.....	271
12.2. Kompensatsiyalangan kremniy asosidagi magnit maydon kuchlanganligini sezuvchi datchiklar.....	272
12.3 Kompensatsiyalangan kremniy asosida foton xisblagich.....	273
12.4 Kompensatsiyalangan kremniy asosidagi harorat o'lchagich....	275
12.5 Kompensatsiyalangan kremniy asosidagi tenzodatchiklar.....	277
12.6 Kompensatsiyalangan kremniy asosidagi qattiq jism generatorlari.....	279
12.7 Kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan avtotebranishlar asosida fizik kattaliklarni o'lchovchi tubdan yangi funksional datchiklar.....	281
Ilovalar.....	284
Foydalilanilgan adabiyotlar.....	304

**M. K. Baxodirxonov, N. F. Zikirillayev, X. M. Iliyev**

## **YARIM O'TKAZGICHLAR FIZIKASI**

Bosishga ruxsat etildi. 24.06.2016 y.

Bichimi 60x84<sup>1/8</sup>

“TimesNewRoman” garniturasi.

Bosma tabog‘i 39. Adadi 50.

Original-maket “Extremum-press” MChJ nashriyotida  
tayyorlandi va bosmaxonasida chop etildi.

100053, Toshkent sh., Bog‘ishamol 3.

Tel.:234-44-05

E-mail: Extremum-press@mail.ru

