

**ÓZBEKSTAN RESPUBLIKASÍ JOQARÍ HÁM ORTA ARNAWLI
BILIMLENDIRIW MINISTRLIGI**

BERDAQ ATÍNDAĞ QARAQALPAQ MÁMLEKETLIK UNIVERSITETI

**M.K. Bahadirxanov, Q.A. Ismaylov, Z.M. Saparniyazova,
X.U. Kamalov**

YARÍMÓTKIZGISHLER FIZIKASÍ

Nókis – 2020

Bahadirxanov M.K., Ismaylov Q.A., Saparniyazova Z.M., Kamalov X.U.
“Yarımótkizgishler fizikasi” páninen qollanba. “Bilim”, Nókis – 2020.

Bul qollanba arnalğan. Bul qollanbada tiykarınan yarımótkizgishler fizikasına tiyisli bolğan tiykarǵı túsiniqler keltirilgen. Sonday aq yarımótkizgish zatlar, olardıń dúzilisi hám túrleri, usı yarımótkizgish zatlardaǵı elektronlar hámde gewekler statistikası, olardaǵı zaryad tasıwshılardıń shashırax mexanizmleri, zaryad tasıwshılardıń rekombinaciyası, teń salmaqsızlıqtaǵı zaryad tasıwshılardıń diffuziya hám drefyi, yarımótkizgishlerdegi kontakt hám betlik qublıslar hámde olardıń optikalıq qásiyetleri tuwralı maǵlıwmatlar keltirilgen.

Usı qollanba Abu Rayxan Beruniy atındaǵı Tashkent mámleketlik texnika universitetiniń “Sanlı elektronika hám mikroelektronika” kafedrası hám Berdaq atındaǵı Qaraqalpaq mámleketlik universitetiniń “Yarımótkizgishler fizikasi” kafedrasında “Yarımótkizgishler fizikasi tiykarları” kursı boyınsha kóp jillardan beri oqıtılğan lekciyalar tiykarında tayarlangan.

Pikir bildiriwshiler:

Uteniyazov A.Q. **fizika-matematika ilimleri boyınsha
filosofiya doktori, docent
(Qaraqalpaq mámleketlik universiteti)**

Kamalov A.B. **fizika-matematika ilimleriniń doktori,
docent (Nókis mámleketlik pedagogika
institutı)**

Bul oqıw qollanba Berdaq atındaǵı Qaraqalpaq mámleketlik universiteti oqıw metodikalıq keńesiniń **2020 – jıl 1-iyun sansei** – sanlı bayanlaması menen baspaǵa usınıs etilgen.

I BAP yarımótkizgishler fizikası tiykarları

QATTÍ DENELER

1.1-§. Kirisiw

Sońǵı jıllarda ilim ham texnikanın rawajlanıp baratırǵan waqtında yarımótkizgishli materiyyallargá bolǵan talap tez pát penen rawajlanıp baratırǵanın kóriwge boladı. Bunday talaptın artıwınıń sebebi yarımótkizgishli materiyyallardan tayarlangan ásbap - úskeneler insannın derlik barlıq xızmet etiw sferasın, sonday-aq medicinadan baslap kosmoslıq izzertlewlerge shekem óz ishine aladı. Usınday fizikalıq izzertlewler tiykarın yarımótkizgishler fizikası óz ishine qamtıp alǵan. Adamlar kóp waqıtlardan beri qattı denelerdiń dúzilisi, olardıń túrli qásiyetlerin biliwge qızıqqan, alımlar usı baǵdarda úziliksiz ráwishte izzertlewler alıp bargan, isbilermen injenerler, oyshıllar hár qıylı wazıypalardı atqarıwshı is qurallar, ásbaplar, qurılmalar oylap tapqan. Klassikalıq fizika quramında Qattı denelerdiń klassikalıq fizikası túrlenip, bunday denelerdiń mexanikalıq, elektrlik, magnitlik, jıllılıq qásiyetlerin úyreniw baǵdarında alıp barılǵan ilimiy izzertlewler natiyjesinde bir qansha zárúr nızamlar tabılǵan bolsada, bul tiykarında texnika baǵdarında úlken izzertlewler ámelge asqan edi.

Biraq, 20-ásirdiń birinshi shereginde Kvantlar teoriyasınıń maydangá shıǵıwı hamde tez pát penen rawajlanıwı usı ásirdeń 30-jıllarınıń baslarında qattı denelerdiń kvant fizikası tiykarları islep shıǵılıwına alıp keldi. Bul atom kvant fizikasınıń dawamlı rawajlanıwı bolıp, qattı deneler klassik fizikasınıń qollanıwı shegarasın anıqlap bermesten, bálkim qattı deneler haqqında kóz qarasın joqarı darejege alıp shıqtı, kvant fizikası negizinde qattı denelerdiń barlıq qásiyetleri qaytadan kórip shıǵıldı hám tiykarǵı nızamlar dizimi anıqlandı.

Sonday – aq, qattı deneler dúzilisi, elektrlik qásiyeti hám t.b. sıpatları boyınsha túrlerge ajratıldı, olardıń hár biri tikkeley úyrenip shıǵıldı.

1.2-§.Qattı deneler fizikasındaǵı tiykarǵı túsinipler

Qattı dene – anıq formaǵa iye bolǵan hám onı payda etken atomlar óziniń teń salmaqlıq jaǵdayı átirapında belgili bir temperaturaǵa sáykes baraqulla terbeliske iye bolǵan zattıń halına aytıladı.

Qattı deneler atomlıq dúzilisine qaray 3 túrge bólinedi:

1. Monokristallar – qattı deneni quraǵan atomlar óz - ara tártipli hám periodlı jaylasqan jaǵdayda bolıp, bunda qattı dene qanday ólshemde bolıwına qaramastan ondaǵı hár qanday atom óziniń jaqın hám uzaq atomları menen birdey tártip hám periodlı dúzilisine iye boladı. Tábiyatta monokristallar (almaz, kvarc) kem ushraydı. Ádette olar jasalma jol menen alınadı.

2. Polikristallar – ólshemleri $1 \div 100 \mu m$ li monokristall dáneshelerden quralǵan qattı dene. Bunda monokristall bóleksheleri aralıǵında atomlardıń tártipli hám dáwirli dúzilisi buzılıwınan tısqarı olar ortasında belgili boslıq payda boladı.

3. Amorf deneler – bunday qattı denelerde atomlardıń jaqın qońsı atomlar menen tártipli hám dáwirli jaylasıwına iye bolsada, onnan uzaqlasqan sayın atomlardıń dáwirli hám tártipli jaylasıwı buzılıp baradı. Aralıq uzaqlasqan sayın bunday buzılıw sonshellı kúshli baqlanadı. Sonıń ushın ilimiy tilde atomlar jaylasıwında jaqın tártip bar, biraq uzaq tártip bolmaǵan qattı denelerge amorf deneler dep ataymız.

Qattı deneler ózleriniń elektr hám jıllılıq ótkizgishligine qaray tómendegi túrlerge bólinedi:

Metallar – joqarı elektr hám jıllılıq ótkizgishlikke iye, temperatura tómendewi menen ótkizgishligi artıp baratúǵın, joqarı plastiklik qásiyetine iye bolǵan qattı dene. Kópshilik metallar óte tómend temperaturada ($T = 0,1 \div 23 K$) óte ótkizgishlik qásiyetine iye boladı.

Yarım ótkizgishler – elektr ótkizgishligi metallardıń elektr ótkizgishliginen kishkene ($\sigma = 10^3 \div 10^{-10} (Om \cdot sm)^{-1}$), qosımta atomlar koncentraciyasına

óte sezgir, temperatura kemeyiwi menen elektr ótkizgishligi eksponencial nızam menen kemeyetúgın, tómén temperaturalarda ($T = 1 \div 2 K$) dielektrik qásiyetine iye bolğan qattı deneler.

Dielektrikler – elektr hám jıllılıq ótkizgishligi júdá kem hám sırtqı elektr maydanı tásirinde polyarizaciyalanıwına iye bolğan qattı deneler.

Segnetoelektrikler – bunday kristallar dielektrik bolıp, belgili temperatura aralığında óz–ózinén poliyarizaciyalanatuğın sırtqı tásirge óte sezgir qattı deneler.

Ferromagnit qattı deneler – Kyuri temperaturasınan tómén temperaturalarda ion yamasa atomlar magnit momentleriniń (metall bolmağan qattı denelerde) yamasa toplanğan elektronlar magnit momentleriniń (metallarda) ferromagnetik tártibi.

Kompozicion materiallar – jeke texnologiya tiykarında anıq muğdarda alınğan, fizikalıq qásiyetleri hár qıylı bolğan zatlar aralaspasınan quralğan qattı dene. Kompozicion materiallardıń fizikalıq qásiyetleri olardı qurağan zatlar qásiyetlerinen ulıwma parıq qıladı. Tómenдеgi kestelerde bir neshe ótkizgishlerdiń ayırım qásiyetleri keltirilgen.

1.1 – keste. Ótkizgishlerdiń salıstırma qarsılıǵı.

№	Ótkizgishler	ρ	
		$Om \cdot mm^2 / m$	$Om \cdot m$
1	Alyuminiy	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	Altın	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 polat	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	1,12	$1,12 \cdot 10^{-6}$
16	Qalay	0,12	$1,2 \cdot 10^{-7}$
17	Platina	0,107	$1,07 \cdot 10^{-7}$
18	Sınap	0,96	$9,6 \cdot 10^{-7}$
19	Qorgasın	0,208	$2,08 \cdot 10^{-7}$
20	Gúmis	0,016	$1,6 \cdot 10^{-8}$
21	Shoyın	1,0	$1,0 \cdot 10^{-6}$
22	Cink	0,059	$5,9 \cdot 10^{-8}$

1.2 – keste. Óte ótkizgishlik.

Element	Kritikalıq temperatura T_c , K	H_c , Gs
Al	1,196	99
Cd	0,56	30
Ga	1,091	51
Hf	0,09	—
Hg α (romboedr)	4,15	411
In	3,4	293
Ir	0,14	19
La α	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 α	0,68	—
U γ	1,8	—
V	5,3	1020
W	0,012	1
Zn	0,875	53
Zr	0,65	47

1.3 – keste. Eñ tiykargı yarımotkizgish materiallardıń parametrleri.

	Ge	Si	GaAs	GaP	CdS	CdTe	ZnS	ZnS
Atomlar sanı, (sm ⁻³)	4,42 10 ²²	5,0·10 ²²	4,42·10 ²²	5,02·10 ²²	4·10 ²²	1,46·10 ²²	5·10 ²²	
Atom massası, g/mol	72,6	28,09	144,63	100,7	144,46	240	97,45	
Tesiliw kernewi, V/sm	~ 10	~ 30	~ 40					
Kristall strukturası	Almaz	Almaz	Cink obmanka sı	Cink obmankası	Vyursit	Cink obmanka sı	Cink obmanka sı	Vyursit
Tıgızlıǵı, g/sm ³	5,3267	2,328	5,32	4,07	4,82	5,86	4,09	4,1
Salıstırmaı dielektrik	16	11,9	13,1	11,1	5,4	10,2	5,2	

sinirivsheñlik								
Ötkizgishlik zonasındağı effektiv halatlar tıǵızlıǵı, N_c, sm^{-3}	$1,04 \cdot 10^{19}$	$2,8 \cdot 10^{19}$	$4,7 \cdot 10^{17}$	$8,6 \cdot 10^{19}$	$1,04 \cdot 10^{19}$	$2,1 \cdot 10^{19}$	$2,9 \cdot 10^{19}$	$2,9 \cdot 10^{19}$
Valent zonasındağı effektiv halatlar tıǵızlıǵı, N_v, sm^{-3}	$6,0 \cdot 10^{18}$	$1,04 \cdot 10^{19}$	$7 \cdot 10^{18}$	$5,2 \cdot 10^{19}$	$8,32 \cdot 10^{19}$	$9,6 \cdot 10^{19}$	$1,42 \cdot 10^{19}$	$1,42 \cdot 10^{19}$
Menshikli yarımótkizgishtiñ salıstırmalı qarılıǵı $\Omega \cdot \text{sm}$	47	23	10	41,6	52,6	14	18	

1.4 – keste. Yarımótkizgish materiallar.

Material	Element yamasa birikpeler	Atalıwı	Kristall strukturası	Reshetka turaqlısı ($\text{\AA}$) 300 K de
Element	C	Uglerod	D	3,56683
	Ge	Germaniy	D	5,64613
	Si	Kremniy	D	5,43095
	Sn	Qalay	D	6,4892
IV-IV	SiC	Karbit 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 Antimonid	Z	6,4794
II-VI	CdS	Kadmiy Sulfid	Z	5,832
	CdS	Kadmiy Sulfid	W	a=4,16; c=6,756
	CdSe	Kadmiy Selen	Z	6,05
	CdTe	Kadmiy Tellur	Z	6,482
	ZnO	Cink Oksid	R	4,58
	ZnS	Cink Sulfid	Z	5,42
	ZnS	Cink Sulfid	W	a=3,82; c=6,26
IV-VI	PbS	Qorgasın sulfide	R	5,9362
	PbTe	Qorgasın tellurid	R	6,462
	PbSe	Qorgasın selenid	R	6,12

D – almaz, W – vyursit, Z – cink obmankası, R – as duzı.

1.5 – keste. Dielektrikler.

Dielektrikler	Salıstırmalı elektr qarsılığı ρ (Om·m) (T=300K)
Bakelit	10^{16}
Benzol	$10^{15} \dots 10^{16}$
Qağaz	10^{15}
Distrlengen suw	10^4
Teñiz suwı	0,3
Quriq terek	$10^9 \dots 10^{13}$
Hól jer	10^2
Kvarc shiyshe	10^{16}
Kerosin	$10^{10} \dots 10^{12}$
Mramor	10^8
Parafin	$10^{14} \dots 10^{16}$
Parafin may	10^{14}
Pleksiglas	10^{13}
Polistirol	10^{16}
Polixlorvinil	10^{13}
Polietilen	$10^{10} \dots 10^{13}$
Silikon may	10^{14}
Slyuda	10^{11}
Shiyshe	$10^{10} \dots 10^{13}$
Transformator	10^{14}
mayı	10^5
Farfor	10^{16}
Shifer	10^{18}

1.6 – keste. Ferromagnetikler ushın ferromagnit Kyuri temperaturasınıń mánisleri.

Zat	Formula	Ferromagnetik qa'siyetleri	Zat	Kyuri temperaturasi'nda $T_c, ^\circ\text{C}$
Temir	Fe	1043	RbNiF ₃	139
Kobalt	Co	1403	CsNiF ₃	150
Nikel	Ni	631	Gd ₃ Fe ₅ O ₁₂	564
Gadoliniy	Gd	289	MgFe ₂ O ₄	713
			GdFe ₂	789
			Fe ₃ O ₄	858
			SmCO ₂	1020

1.7 – keste. Ayrım segnetoelektriklerdiń qásiyetleri.

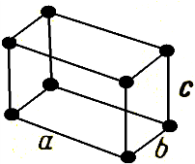
Zatlar	Ximiyalıq formulası	Fazalıq ótiw temperaturası, $^\circ\text{C}$.	Maksimal spontan polarizaciya nıw P ($\mu\text{Kl}\cdot\text{sm}^{-2}$)	Simmetriyalardıń noqatlıq toparları	
				Polyarsız faza	Polyarlı faza
Bariy titanat	BaTiO ₃	133	25	m3m	4mm
Duz segnet	KNaC ₄ H ₄ O ₆ ·4H ₂ O	-18-24	0,25	222	2
Triglitsin sulfat	(NH ₂ CH ₂ COOH) ₂ ·H ₂ SO ₄	49	2,8	2/m	2
Kaliy Digidrofosfat	KH ₂ PO ₄	-150	5,1	m	2
Kaliy Dideyterofo sfat	KD ₂ PO ₄	-51	6,1	m	2
Litiy niobat	LiNbO ₃	1210	50	m	3m

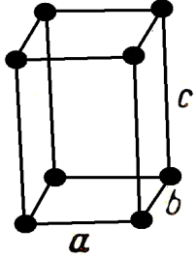
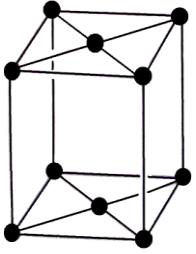
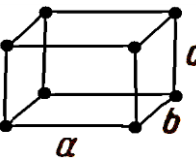
Biraqniy ftorberrilat	$(\text{NH}_4)_2\text{BeF}_4$	-97	0,15	mmm	2
Godolin molibdat	$\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$	159	0,18	m	2
Vismut titanat	$\text{BiTi}_3\text{O}_{12}$	675	—	$4/\text{mmm}$	M

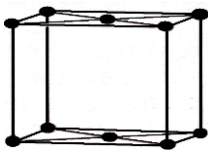
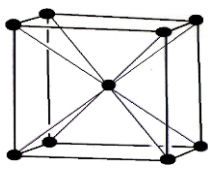
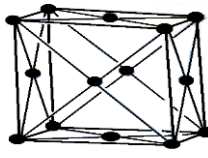
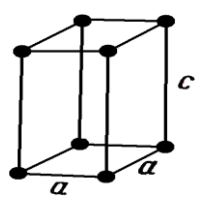
1.3-§. Qattı denelerdiń kristall pánjereleri

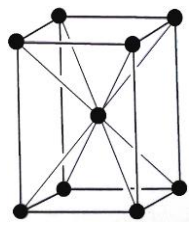
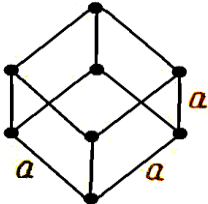
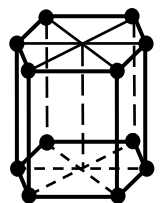
Kristall degende, biz qattı deneni qurawshı atomlardıń tártipli hám dáwirli jaylasıwın túsinemiz. Bunda atomlar keńislikte bir-biri menen hár túrli múyeshlerdegi 3 bağıt boylap dáwirli jaylasqan boladı. Kristallardağı qálegen atomdı alıp eń jaqın qońsı atomlar tiykarında dúzilgen (a, b, c) kólemge iye bolǵan geometriyalıq forma bul berilgen kristalldıń elementar pánjeresi dep ataladı. Demek, bul elementar yacheykanı a, b, c bağıtları boyınsha kóshiriw esabınan qálegen ólshemdegi kristall payda qılıw múmkin. Elementar yacheyka tiykarın quraǵan (a, b, c) bağıt boyınsha vektorlar shaması kristall pánjere turaqlısı dep ataladı. Demek, kristalldıń eń kishkene bólinbeytuǵın halatı bul elementar yacheyka bolıp xizmet qıladı.

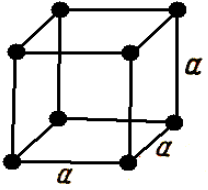
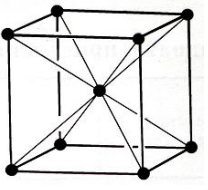
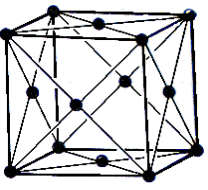
Kristall pánjereniń atomlarınıń a, b, c bağıtları arasındaqı múyeshler (α, β, γ) hám a, b, c bağıtlar mánisine qarap kristall pánjereler dúzilisın 14 túrge bóliwimiz múmkin. Olar Bravye elementar yacheykaları dep ataladı. Bul 14 túr kristall yacheykalardı 7 topaǵa ajratıw múmkin.

Reshetka túrleri – Bravye reshetkaları			
kr. Triklin pánjere ru. Триклинная	Tuwrı múyeshleri bolmaǵan, qaptal uzınlıqları hár túrli	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

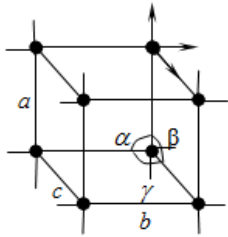
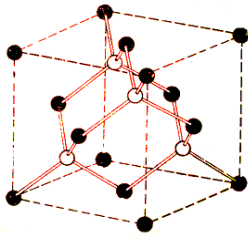
решётка en. Triclinic lattice	bolgan geometriyalıq formadağı pánjere.		
kr. Monoklin pánjere ru. Моноклиная решётка en. Monoclinic lattice	Qaptal uzunlıqları (a, b, c) hár túrli bolgan, a hám c hámde b hám c tárepler arasındagı múyesh 90°, biraq a hám b tárepi arasındagı múyesh 90° qa teń bolmağan pánjere.	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$	
kr. Tiykarı oray lasqan monoklin pánjere ru. Моноклиная решётка с центрирован- ными основаниями en. Basecentered monoclinic lattice	Monoklin pánjereniń tiykarları oraylarında atom jaylasqan boladı.	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$	
kr. Romb tárizli pánjere ru. Ромбическая решётка en. (Ortho) rhombic lattice	Forması tuwrı múyeshli parallelopipetten ibarat pánjere.	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	

kr. Ultani oraylasqan romb tárizli pánjere ru. Ромбическая решётка с центрированными основаниями en. Base centered rhombic lattice	Romb tárizli pánjereniń ultanları oray-larında atom jaylasqan boladı.	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^0$	
kr. Kólemi oraylasqan romb tárizli pánjere ru. Ромбическая решёткаобъём- ноцентрирован- ной en. Body-centered rhombic lattice	Romb tárizli pánjereniń orayında atom jaylasqan boladı.	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^0$	
kr. Tárepleri oraylasqan romb tárizli pánjere ru. Ромбическая решётка гранецентриро- ванная en. Face-centered rhombic lattice	Romb tárizli pánjereniń tárepleri oraylarındaǵı atom jaylasqan boladı.	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^0$	
kr. Tetragonal pánjere ru. Тетрагональная решётка en. Tetragonal	Tiykarı kvadrat bolǵan tuwrı múyeshli parallelopiped formasındaǵı	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^0$	

lattice	pánjere.		
kr. Kólemi oraylasqan tetragonal pánjere ru. Тетрагональная решётка объёмноцентрированная en. Body-centered tetragonal lattice	Tetragonal pánjereniń orayında atom jaylasqan boladı.	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^0$	
kr. Romboedrik pánjere (Trigonal pánjere) ru. Ромбоэдрическая (Тригональная) решётка en. Rhombohedral (trigonal) lattice	Tárepleri bir-birine teń, múyeshleri de bir – birine teń hám 90^0 qa teń bolmağan geometriyalıq formadağı pánjere yamasa ultanları hám tárepleri romblardan ibarat bolğan pánjere.	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^0$	
kr. Geksagonal pánjere ru. Гексагональная решётка en. Hexagonal lattice	Ultanı tuwrı altı múyeshli prizma formasındağı pánjere.	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^0$ $\gamma = 120^0$	

kr. Kub tárizli pánjere (Ápiwayı kub reshetka) ru. Кубическая решётка en. Cubic lattice	Forması kub kórini- sindegi pánjere. Kub kóriniindegi r pánjereniń úsh túrli kórinisi bar: ápiwayı, kólemi oraylasqan hám tárepleri oraylasqan.	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
kr. Kólemi oraylasqan kub ru. Кубическая решётка объёмноцентрированная en. Body-centered cubic lattice	Forması kub kóriniindegi biraq orayında bir atom jaylasqan pánjere.	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
kr. Tárepleri oraylasqan kub ru. Кубическая решётка гранцентрированная en. Face-centered cubic lattice	Forması kub kóriniindegi biraq kubtıń altı tárepleri ortalarında birewden atom jaylasqan pánjere.	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	

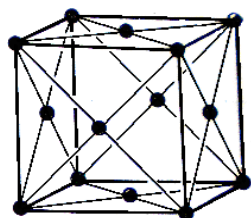
Elementar yacheykalar óz ishine alǵan atomlar sanına qarap, ápiwayı hám quramalı (atomları tıǵız jaylasqan) túrlerge bólinedi. Olar tómendegi kestege keltirilgen.

kr. Elementar kristall pánjere ru. Элементарная кристаллическая решётка en. Elementary crystal lattice	Kristall pánjere turaqlı (a, b, c) lar tiykarında qurılğan eń kishkene pánjere. Elementar kristall pánjereni 3 túrli bağıtqa óz-ózone sáykes ráwishte jıljıtiw arqalı qálegen ólshemdegi kristaldı alıw múmkin.	
kr. Quramalı kristall pánjere ru. Сложная кристаллическая решётка en. Complex lattice	Elementar pánjereniń tek túyinlerinde, bálki túyinler aralıq hám kólemde atomlar jaylasqan boladı. Mısalı, ápiwayı kub pánjerege bir atom tiyisli bolsa, kólemi oraylasqan pánjerege 2 atom, tárepleri oraylasqan pánjerege 4 atom tiyisli boladı. Pánjerede atomlar sanı $N = \frac{A}{8} + \frac{B}{4} + \frac{C}{2} + D$ A – pánjere túyinlerindeki, B – qırlarındağı, C – táreplerindeki, D – kólemindeki atomlar sanı.	 Cink sulfidi kristall reshetkasi

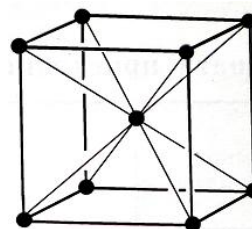
Elementar yacheykaniń óz ishine alğan atomlar sanın tómendegishe esaplaw kerek: Mısalı, kub elementar yacheykada hár bir túyinde jaylasqan atom bir waqıttıń ózinde sonday 8 elementar yacheyka túrinde qatnasqanlıǵı ushın túyinde jaylasqan atomlar sanı A nı tabıw ushın 8 ge bóliw kerek. Sonda $A/8$ boladı.

Demek, túyinde jaylasqan atomnıń $1/8$ bólegine sol elementar yacheyka tiyisli boladı. Eger kub yacheyka tárepleri oraylasqan bolsa (1.1, a – súwret), onda táreplerinde turǵan atom 2 sonday elementar yacheyka dúzilisinde qatnasıp atırǵanı ushın ondağı atom sanı B nıń yarımı yaǵnıy $B/2$ usı qaralıp atırǵan elementar yacheykaǵa tiyisli boladı. Eger atomlar kub yacheykaniń qırları arasında jaylasqan bolsa, ondağı atomlardıń $1/4$ bólegine usı elementar yacheyka

tiyisli boladı. Qırındaǵı atomlar sanı C bolsa, onda bul yacheykaǵa tiyisli atomlar sanı $C/4$ boladı. Eger kub pánjere kólemli oraylasqan bolsa, (1.1, b – súwret), onıń kólemindegi atom tek usı yacheykaǵa tiyisli boladı.



(a)



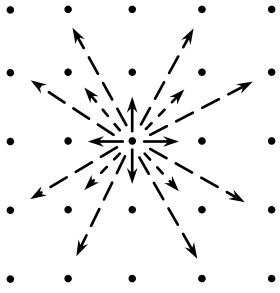
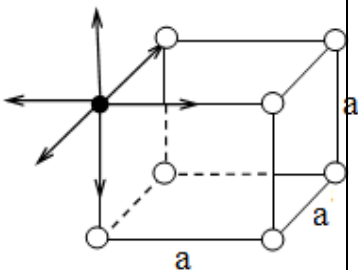
(b)

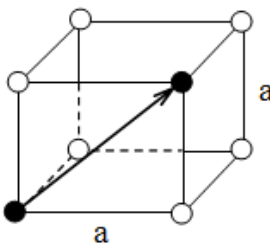
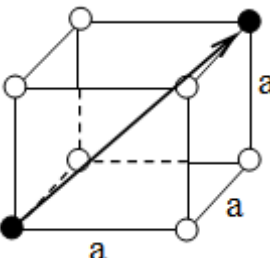
1.1 – súwret. Tárepleri oraylasqan kub yacheyka (a), kólemli oraylasqan kub yacheyka (b).

Solay etip, biz úyrenip atırǵan hár qanday elementar yacheykaǵa tiyisli atomlar sanın tómendegishe anıqlaw múmkin:

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

Kristallarda jáne **koordinacion san** degen túsinik bar. Bul kristalldaǵı qálegen atomnıń eń jaqın qońsı atomları sanın kórsetedi. Bunday qońsı atomlar qaralıp atırǵan atomǵa salıstırǵanda jaqın, uzaq hám jánede uzaǵıraq jaylasıwına qarap kordinacion san hár túrli tártipke iye boladı. Mısalı, kub kristalda 1- tártipli koordinacion san bul qaralıp atırǵan atomnıń eń jaqın qońsı atomlar sanın, 2- tártipli koordinacion san bolsa onnan keyingi aralıqta jaylasqan qońsı atomlar sanın, 3- tártipli koordinacion san bolsa 2- tártipli koordinacion sannan keyingi aralıqta jaylasqan atomlar sanı. Solay etip, bul tártip kristallarda $1 + n$ ge shekem dawam etiwı múmkin, yaǵnıy koordinacion sanlar N – tártipli bolıwı múmkin. Sonı aytıw kerek, kristallarda qálegen atom ushın 1, 2, 3, ... n tártipli koordinacion sanı hám qaralıp atırǵan atom menen qálegen koordinacion sandaǵı aralıq turaqlı boladı. Bul degen sóz, kristallarda barlıq waqıt jaqın hám uzaq tártip bar. Olar tómendegi kestedeki keltirilgen:

Koordinacion san. Jaqın hám uzaq tártip		
kr. Koordinacion san ru. Координационное число en. Koordination number	Kristaldaǵı hár qanday atomnıń eń jaqın qońsılar sanı. Qońsılar qaralıp atırǵan atomǵa salıstırǵanda jaqın, uzaq hám jánede uzaq bolıwı múmkin. Bunday qońsı sanı da olar arasındǵı aralıq kristaldaǵı barlıq atomlar ushın bárqulla birdey boladı. Bunday qońsılar 1, 2, 3, ..., <i>n</i>-tártipli qońsılar yamasa 1, 2, 3, ..., <i>n</i>-tártipli koordinacion sanlar dep ataladı. Hár bir koordinacion tártipli koordinacion qońsı sanı da olar arasındǵı aralıq barlıq atom ushın birdey hám turaqlı boladı. Bul kristall tiykarı esaplanadı.	
kr. 1-tártipli koordinacion san ru. Координационное число первого порядка en. Koordination number of first order	Kub kristall pánjerede 1-tártipli koordinacion sanlar sanı 6 bolıp olar arasındǵı aralıq $d = a$, yaǵniy pánjere turaqlısına teń.	

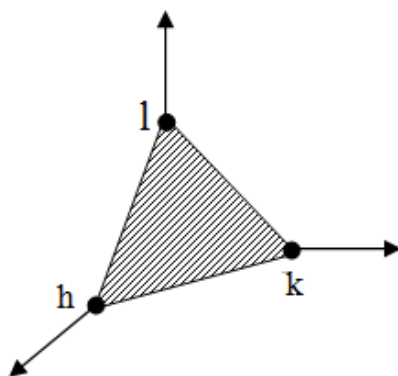
kr. 2-tártilpli koordinacion san ru.Координационное число второго порядка en.Koordination number of second order	Kub kristall pánjerede 2-tártilpli koordinacion sanlar sanı 12 hám olar arasındagı aralıq $d = a\sqrt{2}$ ge teń.	
kr.3-tártilpli koordinacion san ru.Координационное число третьего порядка en.Koordination number of third order	Kub kristall pánjerede 3-tártilpli koordinacion sanlar sani 8 bolıp, olar arasındagı aralıq $d = a\sqrt{3}$ ge teń.	

Kristallardan ózgesheligi amorf zatlarda jaqın tártip bar bolıp, uzaq tártip buzıladı, yaǵnıy qatań uzaq tártipke iye emes.

1.4-§. Miller indeksleri

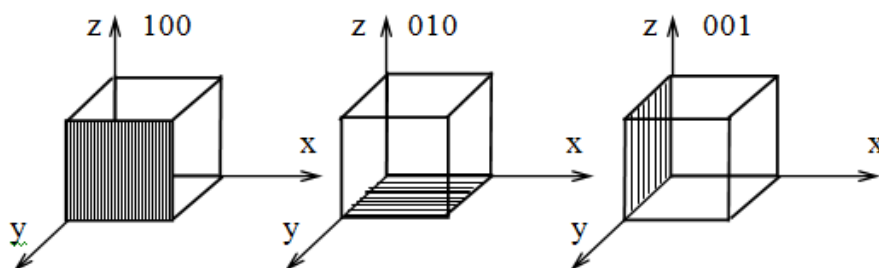
Kristallar meyli ol tábiyǵiy bolsın, yamasa jasalma jol menen alınǵan bolsın, olar birdey atomlardan (almaz, *Ge*, *Si*) yamasa 2-3 túr atomlardan dúzilgen bolıwı múmkin (*NaCl*, *LiF*, *GaAs*). Demek, kristallar mono atomlıq yamasa quramalı atomlıq kristallargá bólinedi. Kristallarda atomlar jaylasqan tegislik hám onıń baǵıtın anıqlaw tek kristaldıń fizikalıq qásiyetleri bálkim, olar tiykarında jaratılatuǵın elektron ásbaplardıń qásiyetlerine de tásir etedi. Kristall reshetka

tegislilikleri ádette Miller indeksleri (belgileri) menen anıqlanadı. Bunda qaralıp atırğan tegisliktiń x, y, z koordinata kósherleri menen kesiliskeń noqatların x_0, y_0, z_0 dep belgilep alsaq hám bul x_0, y_0, z_0 lerdiń reshetka turaqlısına bólistiriliwi $\frac{x_0}{a}; \frac{y_0}{b}; \frac{z_0}{c}$, (a, b, c reshetka turaqlıları) qandayda bir pütün san mánislerin beredi. Mısalı, 2; 4; 1. Endi bul sanlardıń kerı mánislerin alıp, $\frac{1}{2}; \frac{1}{4}; \frac{1}{1}$; olardı sonday kishkene pütün sanǵa bóleyik, shıqqan nátiyjeler pütün san formasında ańlatılsın. Mısalı, $\frac{1}{2}; \frac{1}{4}; \frac{1}{1}$ (bulardıń barlıǵına bólinetuǵın eń kishi pütün san 4 boladı). Onda (2; 4; 1) Miller indeksleri esaplanadı. Ádette bulardı (h, k, l) menen belgileymiz. Mine usı Miller indeksleri jeke yamasa óz - ara parallel bolǵan tegislilikler toparın ańlatadı.



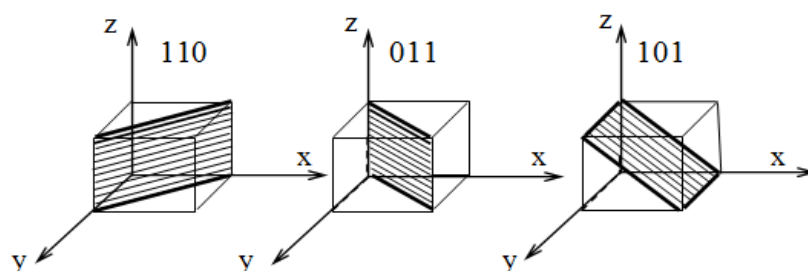
1.2 – súwret. Miller indeksleri.

x kósherine perpendikulyar bolǵan tegislilikler (1; 0; 0) belgisi menen, y kósherine (0; 0; 1) indeksleri menen ańlatıladı.



1.3 – súwret. x, y hám z kósherlerine perpendikulyar bolǵan tegislilikler.

Eger indeks $(1; 1; 0)$ bolsa, z kósherine parallel biraq, x hám y kósherlerin birdey aralıqta kesgen tegisliklerdi ańlatadı. Tap sonday $(0; 1; 1)$ yamasa $(1; 0; 1)$ de bar boladı.



1.4 – súwret. Bir kósherge parallel, qalǵan kósherlerdi birdey aralıqta kesgen tegisliklerdiń kórinisi.

Eger tegislikti úsh koordinata kósheri x , y , z ti birdey aralıqta kesgen bolsa, bunday tegislik $(1; 1; 1)$ menen ańlatıladı.



1.5 – súwret. Tegislikti úsh koordinata kósheri x , y , z lerdi birdey aralıqta kesgen tegisliklerdiń kórinisi.

Eger tegislikler koordinata kósherleriniń teris táreplerin kesken bolsa, onda olardıń indeksleriniń ústine teris belgisi qoyıladı. Mısalı, x kósheriniń teris mánisin kesken tegislik $(\bar{h}, k, l)$ yamasa x , y , z kósherleriniń teris mánislerin kesken tegislik $(\bar{h}, \bar{k}, l)$ dep belgilenedi.

Solay etip, Miller indeksleri yamasa belgileri kristall pánjerededegi hár túrli tegislikler jaylasıwın kórsetedi. Ádette kristall óstirilip atırǵanda aldınnan qanday tegislik baǵıtı boyınsha ósiriwi anıqlanadı hám soǵan sáykes baǵıtqa iye bolǵan diametri júdá kishi monokristall (zatravka) dan paydalanıladı.

1.5-§. Keri elementar pánjere

Tuwrı elementar pánjereni sáwlelendiriwshi tiykargı vektorlar $\bar{a}$; $\bar{b}$; $\bar{c}$ bolıp, bular tiykarında qálegen shamadağı kristall pánjereni payda etiw múmkin. Bunıń ushın bul vektorlardı óz bağıtları boyınsha qálegen muǵdarda kóshiriledi hám payda bolǵan kristall pánjere kólemi tómendegishe ańlatıladı:

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

Kristallardağı elektronlardıń elektr energetik halatın tolıq sáwlelendiriw ushın hámde kristallarda rentgen nurlarınıń difrakciyasın tereńirek túsiniw ushın keri elementar pánjere túsiniǵı kiritiledi. Bul keri pánjereniń tiykargı vektorları tómendegishe anıqlanadı:

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

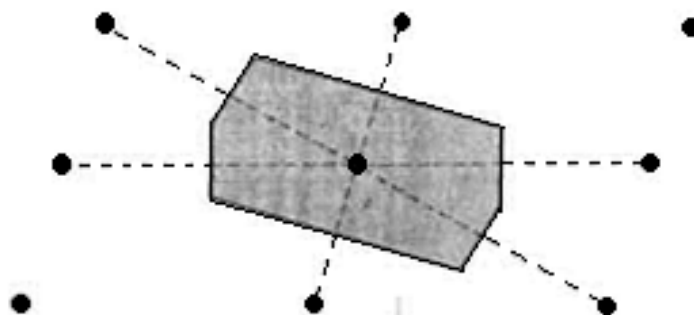
bunnan kórinip turıptı, keri pánjere vektorları $\bar{A}$, $\bar{b}$ hám $\bar{c}$, $\bar{B}$ bolsa $\bar{a}$ hám $\bar{c}$ ǵa $\bar{C}$ bolsa $\bar{a}$ hám $\bar{b}$ larǵa perpendikulyar halda boladı. Bunda keri elementar pánjere kólemi

$$V = \frac{(2\pi)^3}{V_{duris}}, \quad (1.4)$$

ge teń. Eger biz tárepleri a ǵa teń bolǵan kub kristall pánjereni alsaq, onda keri pánjere tárepleri (1.3) formula boyınsha $A = 2\pi/a$ boladı hám bunday keri pánjere de ápiwayı kub reshetka boladı.

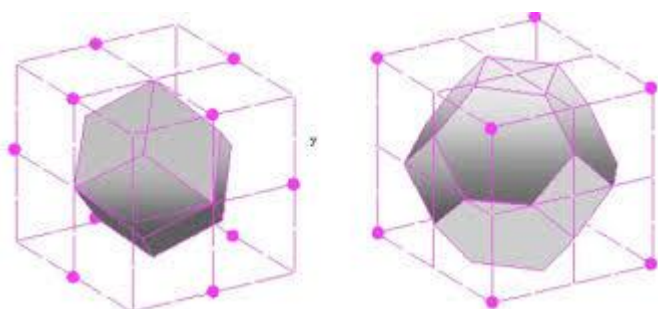
Keri elementar pánjereni Vigner-Zeyts usulı menen sáwlelendiriw múmkin. Bunda Bravye reshetkasındaǵı qálegen túyinnen tuwrı sıızıq arqalı jaqın túyinleri

birleştiriledi. Onnan soń bul sıızıqlardı teń ekige bóletuǵın hám olarǵa perpendikulyar sıızıqlar ótkiziledi. Usı sıızıqlar kesiliskeń betlerde payda bolǵan forma Vigner-Zeyts yacheykası dep ataladı.



1.6- súwret. Eki tárepleme Bravye pánjeresi ushın Vigner- Zeyts yacheykası.

Keri elementar pánjere Bravye reshetkasındaǵı barlıq bar bolǵan simmetriya elementlerin óz ishine aladı. Sonıń ushın da keri elementar pánjere ishinde elektron óziniń barlıq energetik halatlarına iye boladı hám bul pánjere menen shegeralangán kólemdi birinshi Brilliyen zonası dep ataladı.

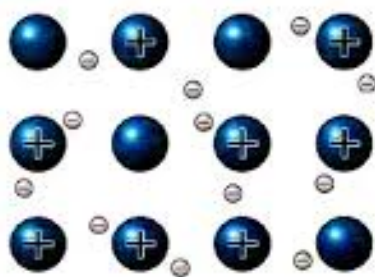


1.7-súwret. Vigner-Zeyts yacheykaları (kesilgen oktaedrik hám rombik dodekaedrik kórinisi).

1.7-§.Qattı denelerde ximiyalıq baylanıs

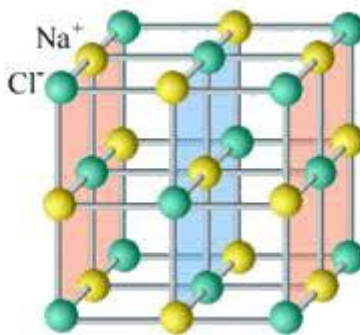
Qattı denelerdi qurawshı atomlardı qanday kúshler óz - ara baylanıstırıp turǵan, bul kúshlerdiń tábiyatı qanday? Mine usınday tábiyatqa kóre qattı denelerde ximiyalıq baylanıstı tiykarınan 4- túrge bóliw múmkin— metall baylanıslar, ion baylanıslar, kovalent baylanıs hám Van-der-Vaals baylanıslar.

Ximiyalıq baylanıslardıń tábiyatı sonı kórsetedi, qanday túrdegi ximiyalıq baylanıs bolıwına qaramastan, qattı deneni quraǵan atomlar ximiyalıq baylanıs nátiyjesinde óziniń sırtqı elektron qabatların elektron menen toltıradı. Yaǵnıy 8-topar elementleri inert gaz atomları siyaqlı boladı. Metall baylanıs tiykarınan kristalda dáwirli jaylasqan oń ionlar menen ulıwmalasqan erkin valent elektronları arasındaǵı óz - ara elektrostatikalıq tásir kúshlerinen ibarat boladı. Mısalı, eń jaqsı metallar *Cu*, *Ag* hám *Au* dı alsaq, bulardıń sırtqı elektron qabatları $3d^{10}4s^1$, $4d^{10}5s^1$, $5d^{10}6s^1$ – yaǵnıy olarda *d* – elektron qabıǵı tolǵan, sonıń ushın s^1 – elektronlar erkin halǵa ótip, elektron gazi yamasa elektron bultın payda etken. Bunda elektronlar koncentracıyası atomlar koncentracıyasına teń, bunday elektronlar metallarda joqarı elektr ótkizgishlikti támiyinleydi.



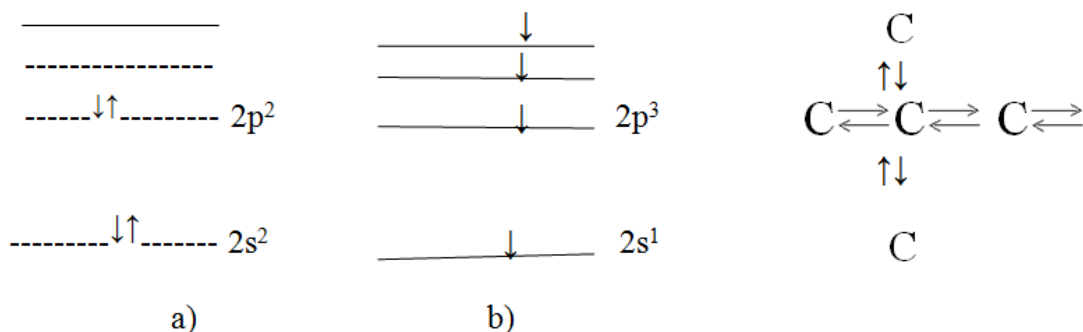
1.8 – súwret. Metall baylanıs.

Ion baylanısta – kristalldı quraǵan atomlardıń birewi óziniń elektronları menen toltırıw múmkin bolmaǵan sırtqı valent elektronın ekinshi atomǵa beriw jolı menen oń ionǵa aylanıwında elektron qabıǵın, ekinshi atom bolsa, onnan alǵan elektron esabınan óziniń sırtqı elektron qabıǵın toltıradı hám teris ionǵa aylanadı. Mısalı, *NaCl* *Na* – atomınıń elektron qabıǵı $1s^22s^22p^63s^1$, *Cl* – atomınıń elektron qabıǵı $1s^22s^22p^63s^23p^5$. Demek, *Na* atomınan bir elektron *Cl* atomına ótiwi menen Na atomı $1s^22s^22p^6$ hám *Cl* da hám $1s^22s^22p^63s^23p^6$ sırtqı qabıǵı tolǵan. *NaCl* kristalında teris hám oń ionlar izbe-iz jaylasqan boladı.



1.9 – *súwret. Ionlı baylanıs.*

Kovalent baylanıs– buni gomopolyarlı baylanıs depte ataydı. Bunday baylanısta kristaldaǵı qońsı atomlar qarama-qarsı spinge iye bolǵan valent elektronlar eki atom arasında ulıwma alıw jolı menen elektron qabıqları toladı. Elektronlar bunda bir atomnan ekinshi atomǵa tolıq ótpegenligi ushın bunday baylanısta oń yamasa teris ionlar payda bolmaydı, barlıq atomlar elektroneytral halda bolıwı menen birge valent elektronlar ximiyalıq baylanısına qatnasadı, erkin elektronlar payda bolmaydı. Sonıń ushın da kovalent baylanısqa iye bolǵan kristallardıń elektr ótkizgishligi metallarǵa salıstırǵanda judá kem boladı.

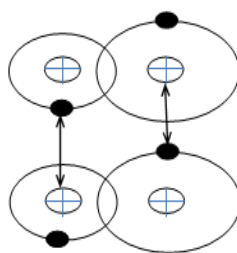


1.10 - *súwret. Kovalentli baylanıs.*

Mısal ushın, uglerod atomlarınan quralǵan almaz kristalı kovalent baylanıstıń eń ideal túri esaplanadı. Bunda uglerod atomları jeke qaralǵanda onı sırtqı elektron qabıǵında elektronlar $2s^2 2p^2$ halatta jaylasqan boladı (1.10, a – *súwret*) uglerod kristalında bolsa, kristall pánjere potensial maydan tásirinde valent elektronlar basqasha jaylasadı (1.10, b – *súwret*).

Endi bul atom óziniń tolmaǵan 2s hám 2p qáddilerinde, spinleri qarama – qarsı bolǵan tórt qońsısınan elektronlar alıw jolı menen, hám óziniń sırtqı elektron qabıǵına elektronlar sanın 8 ge jetkizip yaǵnıy $2s^2 2p^6$ toltıradı. Bunday kovalent baylanısqa qatnasatuǵın barlıq atomlardıń elektron qabıqları toladı hám uglerod atomlarınıń barlıq valent elektronları ximiyalıq baylanısta qatnasadı. Bunday baylanıs biraz kúshli baylanıs bolıwı menen, erkin elektronlar bolmaǵanlıǵı sebepli dielektrik qásiyetine iye boladı.

Van-der-Vaals baylanısları basqa baylanıslarǵa salıstırǵanda óte kúshsiz baylanıs bolıp, bunday baylanıs óte tómén temperaturalarda ($T \sim 1 \div 4 K$) hám joqarı basım astındaǵı inert gaz atomları payda etken kristallarda júzege keledi. Bunda atomlardaǵı elektronlar júdá kishkene waqıt ishinde óz yadrosı menen dipol payda etiw menen bul nárse pútin qalǵan atomlardıń polyarizaciya bolıwına hám nátiyjede atomlar óz – ara baylanısıp, kristall payda bolıwına alıp keledi.



1.11 – súwret. Van-der-Vaals baylanısı.

1.6-§. Kristall pánjere defektleri

Kristall pánjere defektleri – bul kristallardaǵı atomlardıń dáwirlilik hám tártipli jaylasıwınıń buzılıwına ayıladı. Defektlerdi olardıń geometriyalıq ólshemlerine qarap úsh túrge bóliw múmkin – noqatlıq, sıızıqlı hám kólemli. Noqatlıq defektler geometriyalıq ólshemleri, pánjere turaqlısınan ádewir úlken bolmaǵan defektlerge ayıladı. Noqatlıq defektler óz tábiyatına kóre jáne bir neshshe túrlerge bólinedi:

1. Kristaldaǵı qosımta atomları, yaǵnıy kristall pánjereni quraǵan tiykarǵı atomlardan tısqaqı hár qanday atomlar defekt boladı. Sebebi, olar ózleriniń atom

radiusi hám massası menen tiykarǵı atomlardan parqı bolǵanı ushın olar hátteki pánjeredegi tiykarǵı atom ornın iyelegen bolsa, onıń atom radiusi sebepli pánjere turaqlısı ózgeredi, yaǵnıy dáwirlik buzıladı. Ádette eń taza metall kristallar (tazalıǵı 99.999 %) bolǵanda ondaǵı qosımta atomlar sanı keminde $10^{-3} \%$, yaǵnıy $(5 \div 10) \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}$ muǵdarda boladı.

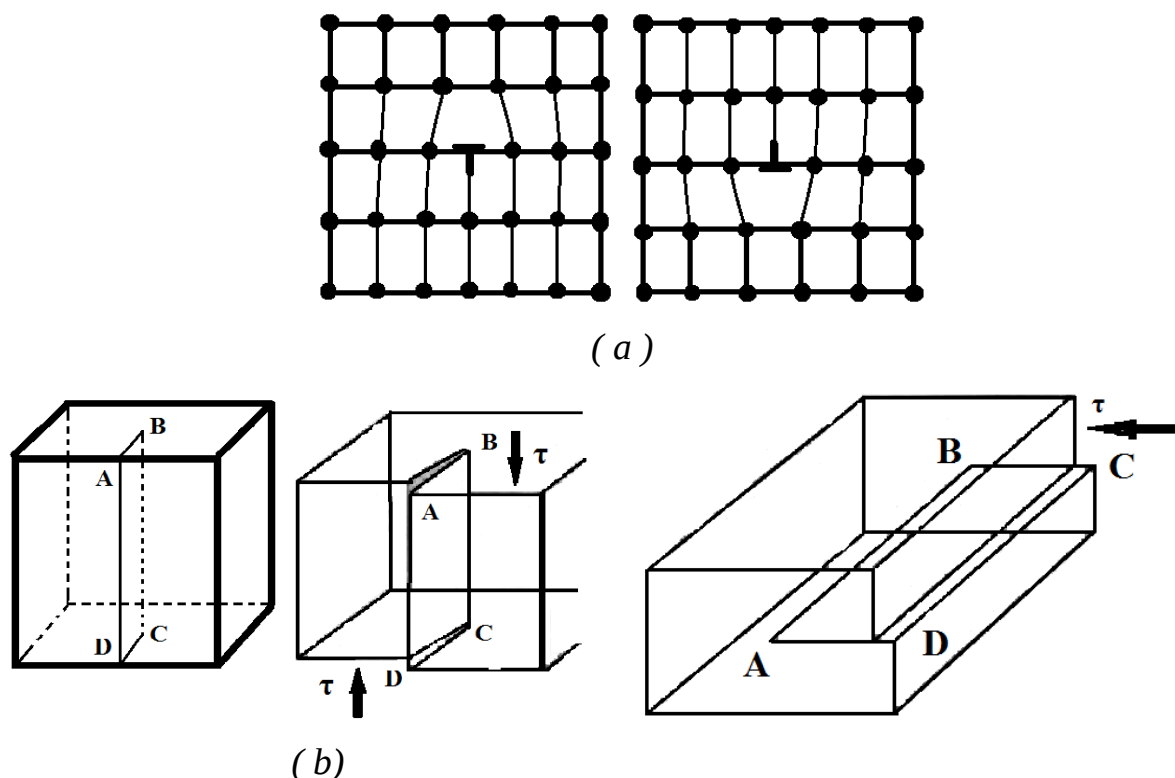
2. Vakanciya– yaǵnıy kristall pánjere túyinińdegi atomnıń bosap qalǵan ornı. Hár qanday temperaturada (tek $T = 0 \text{ K}$ den basqa) atomlar ózleriniń kinetikalıq energiyası ($E_k = kT$) sebepli barlıq waqıt óz teń salmaqlıq halatı átirapında terbelip turadı. Bunday atomlardıń óz ornınan ketiwi, túyinler arasına jaylasıwı esabınan vakanciya payda boladı. Bunday vakanciylardıń berilgen temperaturadaǵı koncentraciyası

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

ańlatpa menen anıqlanadı. Bul jerde N_s – kristallardaǵı atomlar koncentraciyası, E_V – vakansiya payda bolıwı ushın kerek bolǵan energiya, E_V niń mánisi kristallardıń tábiyatına, ximiyalıq baylanıslar túrine qarap $E = 1 \div 5 \text{ eV}$ átirapında boladı. Ion kristallarda (NaCl) vakanciylar, qaysı atom ornına payda bolıwına qarap, olar tábiyatı 2 túr boladı.

3. Kristallarǵa úlken energiyaǵa iye bolǵan radioaktiv nurlar (α, β, γ) tásir etkende noqatlıq defektler payda boladı. Bunday defektler radiyacion defektler dep ataladı. Bunda energiyası atomlardıń kristaldaǵı baylanıs energiyasınan júdá úlken bolǵan elektron, neytron yamasa γ nurları atomlar menen soqlıǵısıp olardı óz ornınan shıǵarıp taslaydı. Nátiyjede, túyinler aralıq atomlar payda boladı. Bular birlemshi radiyaciyalıq defektler dep ataladı. Radiyaciya tásiрі uzaq bolǵan halatlarda, bunday vakanciya hám túyinler aralıq atomlar óz-ara ushrasıp divakanciya yamasa kóbirek vakanciylar toplanıwı, bular ekilemshi radiyaciya defektleri dep ataladı. Radiyacion defektler túrleri hám olardı koncentraciyası hámde kristaldaǵı bólistiriliwi radioaktiv nurlardıń energiyası da kristalǵa tásir etiw waqtına baylanıslı.

Sızıqlı defektler—bul kristall pánjereniń bir sızıq boyınsha buzılıwı (sızıq tuwrı sızıq bolıwı shárt emes). Sızıqlı defektlerdiń eni bir yamasa bir neshe pánjere turaqlısınan artıq bolmağan halda, olardıń uzunlıǵı pútin kristall uzunlıǵı boyınsha bolıwı da múmkin, bunday defektlerdi dislokaciya dep ataydı.



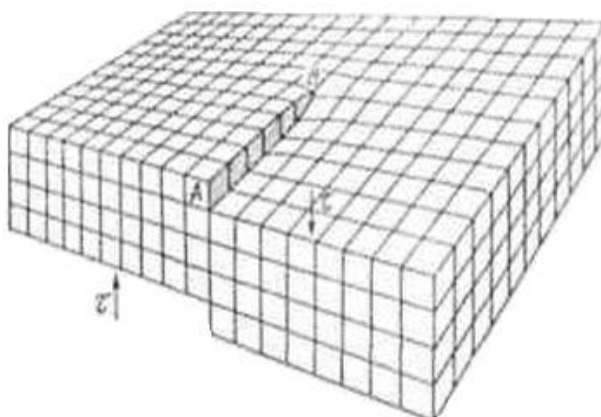
1.12 - súwret. Sızıqlı dislokaciya (a), jılǵıw júzege kelgen sızıqlı dislokaciya (b).

Dislokaciylar óz tábiyatına qarap 2 túrde bolıwı múmkin— shegaralıq hám buramalı. Shegaralıq dislokaciylar ideal kristalldiń belgili bir betine deformaciya tásir etiw arqalı ústingi kristall tegisliginiń astındaǵı tegisligine salıstırǵanda jılǵıw esabınan payda boladı.

Buramalı dislokaciya – kristalldiń bir bólegin ekinshi bólegine parallel, biraq qarama-qarsı kúsh baǵıtı boyınsha deformaciya qılınǵan halatda júzege keledi. Bul tómendegi súwrette óz sáwlesin tapqan (1.13-súwret) (bul jerde τ —jılǵıw vektorı). Demek, buramalı hám shegaralıq dislokaciylar bul kristallardıń bir bólegin ekinshi bólegine salıstırǵanda jılǵıǵan shegaraları. Bunday jılǵıw kúshleri vektorları shegaralıq dislokaciyalarda perpendikulyar,

buramalı dislokaciyalarda bolsa parallel. Deformaciya waqıtında kristaldıń deformaciyaǵa ushraǵan bóleginiń deformaciyaǵa ushramaqan bólegine salıstırǵanda jılıw shegarası júzege keledi, bul bolsa dislokaciya sıızǵı dep ataladı. Ádettegi kristallarda bar bolmaǵan dislokaciya tıǵızlıǵı $N = 10^2 \div 10^4 \text{ sm}^{-2}$ ge tuwrı keledi. Úlken tıǵızlıqdaǵı dislokaciya payda etiw ushın kristallardı joqarı basım menen deformaciyalawǵa tuwrı keledi. Dislokaciya kristallardıń mexanikalıq bekkemligin hám basqa qásiyetlerin ózgertiredi.

Kólemli defektlerge – tiykarınan kristall ishinde júzege keletuǵın kirispe atom klasterleri kiredi. Klaster – bul belgili koncentraciyadaǵı kirispe atomlar yamasa noqatlıq defektlerdiń kristall pánjerede belgili dúziliske iye bolǵan halatı. Klasterler bir neshe n atomdan baslap, millionǵa shekem atomlardan quralǵan bolıwı múmkin.



1.13 – súwret. Buramalı dislokaciya.

I bapqa tiyisli sorawlar:

1. Qattı dene dep nege aytıladı?
2. Qattı deneler fizikalıq qásiyetlerine kóre qanday túrlerge bólinedi?
3. Kristall degende ne túsiniledi?
4. Kristall pánjere degenimiz ne?
5. Kristallar dúzilisine kóre neshe túrge bólinedi?

6. Miller indeksi degenimiz ne?
7. Koordinacion san degenimiz ne hám ol neni kórsetedi?
8. Qattı deneler qanday ximiyalıq baylanıslarǵa iye?
9. Kovalent baylanıstıń ion hám metall baylanıslardan tiykarǵı parqı?
10. Elementar hám kerı elementar pánjere degenimiz ne?

II BAP

YARÍMÓTKIZGISH MATERIALLARDÍŇ TÚRLERI

2.1-§. Ápiwayı yarımótkizgishler

Eń keń tarqalǵan yarımótkizgishlerdiń bir neshshe túrlerin bayan etip keltiremiz. Keń tarqalǵan yarımótkizgish gúmansız Si elementi esaplanadı. Germaniy (Ge) menen birge uqsas strukturalı yarımótkizgishler úlken klassı payda etiledi. Si hám Ge kristall strukturaları birdey: almaz hám α – qorgasında («kúl reń» qalayı depte ataladı). Bul strukturada hár bir atom tort bir – birine jaqın, tetraedr payda etiwshi atom menen oralǵan boladı. Tetraedrik baylanısqa iye yarımótkizgishler electron sanaatınıń tiykarı hám zamanagóy texnologiyanıń zamini esaplanadı. Elementler dáwirlik kestesiniń V hám VI toparınıń bazıbir elementleri yaǵnıy fosfor (P), altın gúgúrt (S), selen (Se) hám tellur (Te) da yarımótkizgishler esaplanadı. Bul elementler bir neshe túrli kristall strukturalarda bolıwı múmkin, hámde shiyshe formasında alınıwı múmkin. Mısalı, Se monoklinli hám trigonal kristall strukturalarda yamasa shiyshe formasında (onı polimer dep ataw múmkin) óstiriledi.

2.2-§. Binarlı birikpeler

Dáwirlik kesteniń III hám V gruppası elementlerinen (GaAs ke uqsas) payda bolatuǵın birikpelerdiń qásiyetleri IV gruppası birikpeleriniń qásiyetlerine júdá uqsas boladı. IV gruppası elementlerinen III – V birikpelerge ótiwde baylanıs ionlı

boladı. Ionlılıq yarımótkizgishler qásiyetlerine zárúr ózgerislerge alıp keledi. Ol ionlar ortasındağı kulon óz –ara háreketi hámde electron zonalı strukturada fundamental energiyasın ózgerttiredi. Ionlılıq keńeyedi hám onıń roli ZnS sıyaqlı II - VI birikpelerde artadı. Nátiyjede kópshilik II - VI birikpeli yarımótkizgishlerde qadağan etilgen zona keńligi 1 eV dan úlken boladı. Quramında awır element – sınap telluridi (Hg) bolğan birikpeler bunnan sırtta qaladı. Sınap telluridi (Hg Te) kúl reń qorǵasınǵa uqsas qadağan zonalı yarımótkizgish esaplanadı.

Úlken qadağan etilgen zona keńligindegi II-VI yarımótkizgishli birikpeler displey hám lazerlar jaratıwda, tar qadağan etilgen zonalı II-VI yarımótkizgishler infraqızıl priyomnikler tayarlawda keń qollanıladı. I-VIII (CuCl) gruppa birikpelerinde qadağan etilgen zona úlken ionlıq sebepli (>3 eV) dan úlken bolıwı múmkin. Olardıń kópshiligi yarımótkizgish emes, bálkim izolyator esaplanadı. Ionlar ortasındağı kulonlar óz – ara háreketi sebepli kristalldıń iiesiw energiyasınıń artıwı quramında tetraedrik baylanıs emes, bálkim 6 koordinaciyalı atomlarǵa iye tas duzı strukturasınıń payda bolıwı ushın qolaylı sharayat jaratadı. IV hám VI gruppa elementlerinen payda bolıwshı jup birikpeler, yaǵnıy qorǵasın sulfide (PbS), PbTe Ba qalayı sulfidi (SnS) de yarımótkizgishler esaplanadı. Bul birikpelerdiń úlken bólegi altı eseli koordinaciyanıń payda bolıwına imkan jaratıladı. Ulken ionlanıwına qaramay, olar sınap xalkogenidlerine uqsas júdá tar qadağan etilgen zonalarǵa iye. Tar zonalı yarımótkizgishler IV-VI infraqızıl nurlanıw priyomnikleri sıpatında qollanıladı, GaN, III-V gruppa keń zonalı birikpesi spektrdiń hawa reńli aralığın nurlandıırıwshı svetodiod hám lazerlar ushın isletiledi.

2.3-§.Oksidler

Kópshilik oksidler jaqsı izolyatorlar esaplanadı. CuO hám Cu₂O - keń tarqalğan yarımótkizgishler. Miss eki oksidi (Cu₂O) mineral (kuprit) sıpatında ushraydı, bul klassik yarımótkizgish, olardıń qásiyetleri intensive úyreniledi.

Oksidli yarımótkizgishlerdiń ósiw processı tolıq túsiniqli emes, sonıń ushın házirgi waqıtta olardıń qollanılıwı sheklengen. Tek ǵana cink oksidi (ZnO) esaplanadı, II-VI gruppası birikpesi jabısqaq lenta hám plastirdegi ingredient sıpatında ózgerttirgish sıpatında qollanılardı. Biraq keltirilgen halat kópshilik mıs oksidlerinde joqarı ótkiziwsheńliktiń jaratılǵanınan keyin ózgergen. Myuller hám Bednarc tárepinen jaratılǵan joqarı temperaturalı joqarı ótkizgishler toparınıń birinshi aǵzası 2 eV qadaǵan etilgen zona keńligine iye yarımótkizgishlerge (La_2CuO_4) tiykarlanǵan. Úsh valentli lantan (La) eki valentli bariy (Ba) yamasa stronciy (Sr) ler La_2CuO_4 ke gewek halatındaǵı zaryad tasıwshılar sıyaqlı kiritiledi. Tasıwshılar jeterli koncentraciyaga iye bolǵanında yarımótkizgishler joqarı ótkiziwsheń metallǵa aylanadı. Házir bul materiallar toparında $\text{HgBaCa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$ joqarı ótkiziwsheńlikke ótiw temperaturası joqarı boladı. Joqarı basım astında ol $T_C=135\text{ K}$ ge jetedi. Biraq bul record keyinirek jańalandı.

2.4-§.Qatlamlı yarımótkizgishler

Qorǵasın iodidi (PbI_2) molibden disulfidi (MoS_2) Ba galliy selenidi (GaSe) sıyaqlı yarımótkizgishli birikpeler óziniń qatlamlı kristall strukturası menen xarakterlenedi. Qatlamlar ishinde olar kovalent baylanıslarǵa iye bolıp, Van der-Valls baylanısına sıyaqlı kúshlirek esaplanadı. Bunnan tısqarı qatlamlar ortasındaǵı óz – ara háreketin olardıń ortasına interkalyaciya dep atalıwshı sırtqı atomlardı kirgiziw arqalı ózgerttiriw múmkin.

2.5-§.Organikalıq yarımótkizgishler

Poliacetilen $[(\text{CH}_2)_n]$ hám poliadicetilen sıyaqlı kóplegen organikalıq birikpeler yarımótkizgishler esaplanadı. Organikalıq yarımótkizgishler hesh qanday elektron ásbaplarda házirshe qollanılmay atırıptı, biraq olar keleshekte qollanılıwı múmkin. Organikalıq yarımótkizgishlerdiń noorganikalıq

yarımótkizgishlerden abzallığı sonda, olardı berilgen kerekli qásiyetleri menen alıw ańsat. Mısalı, baylanıs baylanıslarǵa iye birikpeler, yaǵnıy – $C = C - C =$ úlken optikalıq sıziqsızlıq penen xarakterlenedi, sonıń ushın optoelektronikada qollanıw múmkin. Kerekli halatlarda bul birikpelerdiń qadaǵan zonaların ximiyalıq formulasın ózǵerttiriw jolı menen organik emes yarımótkizgishlerge salıstırılmalı ózgeriwi ańsat C_{60} (fulleren) sıyaqlı uglerodtıń jańa formaları yarımótkizgishler esaplanadı. Grafit plastinasınan ibarat bir neshe nanometer diametrinde trubka formasındaǵı uglerodlardan biri nanotrubka sıpatında tanıw múmkin. Bul uglerodli nanotrubkalar hám olardıń «aǵayınleri», BN-nanotrubkalar menen nanosekund elektronikaǵa ullı keleshek támiyinlenedi. Olar dúzilisine baylanıslı halda metall yamasa yarımótkizgishler bolıwı múmkin.

2.6-§.Magnitli yarımótkizgishler

Magnit ionlarınan ibarat kóplegen birikpeler, yaǵnıy evropiy (Eu) hám marganec (Mn) yarımótkizgishli hám magnitlik qásiyetlerine iye. Mısalı, magnit yarımótkizgishlerge EuS hám $Cd_{1-x}Mn_xTe$ túrindegi qattı aralaspalar kiredi. Keyingi magnit ionları quramına qarap ferromagnetizm hám antiferromagnetizm hám antiferromagnetizm sıyaqlı hár túrli magnitlik qásiyetlerin júzege shıǵaradı. Quramında magnit ionları úlken bolmaǵan koncentraciyaǵa iye yarımótkizgishlerdiń magnit qattı aralaspaları yarım magnit ótkizgishler dep ataladı. Keyingi waqıtta bul qattı aralaspalardıń qollanıluwı menen itibarın tartadı. Olardaǵı Faradey aylanıwı nomagnit yarımótkizgishlerge salıstırǵanda altı tártipten úlken bolıwı múmkin. Magnito – optikalıq ónimliligi kúshliligine kóre bul materiallar optikalıq modulyator sıpatında qollanıluwı múmkin. $Mn_{0.7}Ca_{0.3}O_3$ túrindegi perovskitler óz qásiyetlerine qarap, magnit maydanına kúshli baylanıslı bolǵan metal – yarımótkizgishlerden joqarı, bul gigant magnit qarsılıq hádiysesi GMQ qa alıp keledi.

2.7-§. Basqa hár túrli yarımótkizgishler

Sanalıp ótilgen kategoriyalarǵa tiyisli bolmaǵan kóp yarımótkizgishler bar. Mısalı, SbSI yarımótkizgish esaplanadı, ol tómén temperaturada segnielektrik qásiyetke iye. I-III-VI₂ hám II-IV-V₂ ulıwma formulalı (AgGaS₂ wa ZnSiP₂ каби) birikpeler xolkopirit strukturasında kristallanadı. Bul birikpelerdegi baylanıs tetraedrik, olar jıltıraq cink tas strukturasına iye III-V hám II-VI gruppá yarımótkizgishleriniń analogları dep esaplaw múmkin. V gruppá hám VI gruppá elementlerinen payda bolǵan birikpeler Al₂Se₃ formulası sıyaqlı da kristall formasında, hám shiyshe formasındaǵı yarımótkizgishler esaplanadı. Bul ótkizgishlerdiń kópshiligi qızıqlı qásiyetlerge iye, biraq qollanılıwınıń sheklengenligi sebepli itibardı tartpaydı. Olardıń barlıǵı yarımótkizgishler fizikası baǵdarı ósiw hám keńeyiwi ushın úlken imkaniyatlardıǵa iye.

III BAP. ÓSIRIW USÍLLARÍ

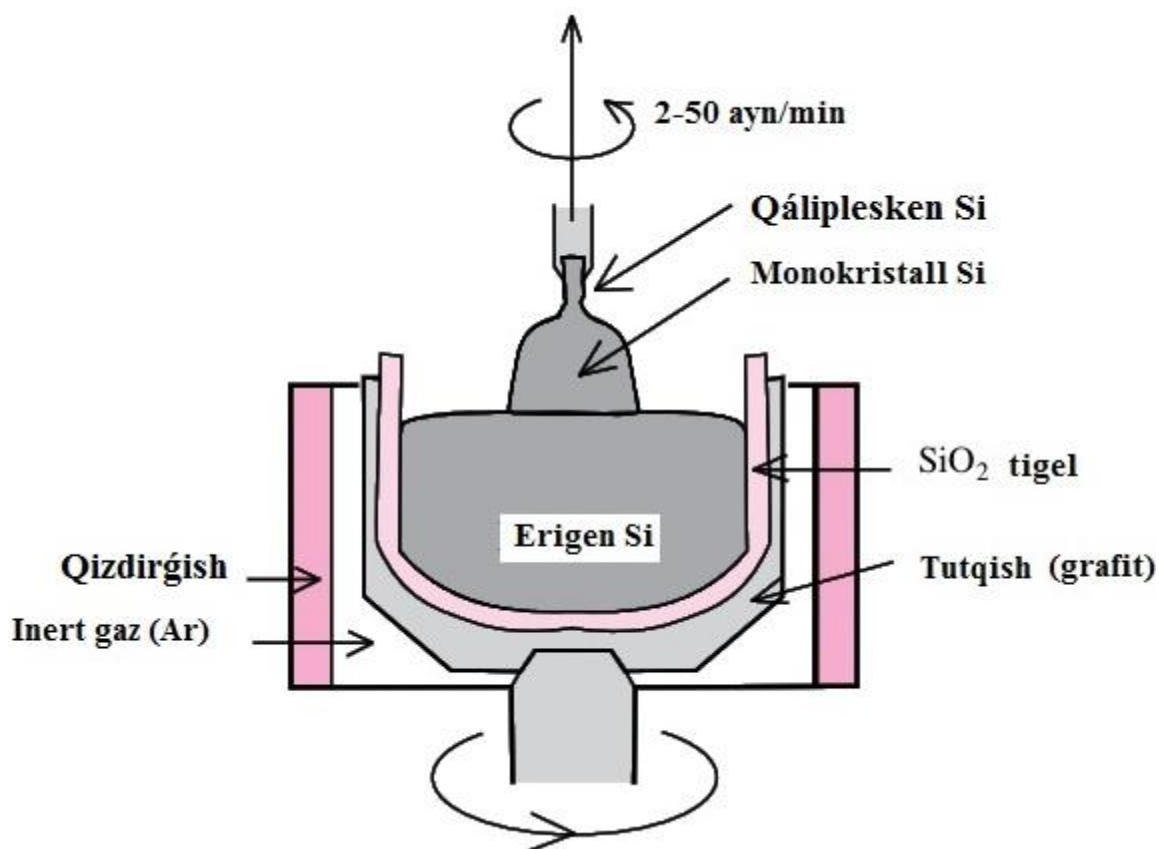
Yarımótkizgishlerdiń elektronika sanaatında keń qollanılıwı sebeplerinen biri olardı alıw metodların jaqsı islep shıǵılǵanlıǵı sebep boladı. Sanaatda qollanılıwı óz náwbetinde bul metodlardıń rawajlanıwına imkan beredi. Mısalı, Ge monokristalların ósiriw metodları kóp jıllar dawamında rawajlandırıp kelgenligi ushın házirgi waqıtta alınıwı boyınsha eń taza materiallar qatarına kiredi. Házir izotopik taza Ge alıw múmkin (tábiyiy Ge bir izotopqa iye). Ámeliy jaqtan kremniydiń ideal monokristalları 30 sm li ústin formasında alınadı. ²⁸Si taza izotobı kristalları tábiyiy kremniyge salıstırǵanda joqarı temperaturalı ótkiziwsheńlikke iye. Bul kristallardaǵı dislokaciýalar tıǵızlıǵı jámi 1000 sm⁻³, aralaspalar koncentraciyası bolsa – trillion (10¹²) niń bir bóleginen kemin quraydı.

Kristallardıń ósiriw usılları boyınsha kóplegen zamanagóy jetiskenlikler yarımótkizgishlerdiń qollanılıwın hár túrli tarawlarǵa bóliniwine alıp keledi. Mısalı, molekulyar – nurli epitakciya (MNE) hám metallorganik puwlardan gaz fazalı epitakciya bir monoqatlam anıqlıqtaǵı kristallardı óstiriwge shuqurları dep

atalıwshı jasalma kristall strukturalardı sintezlewge kishkene ólshemli nanostrukturalardı islep shıǵarıwdaǵı házirgi processke taglikli atomlar jıyındısıńnıń qáiletin qollaw yamasa kvant noqatlarda strukturanı óz – ózin shólkemlestiriwge alıp keliwshi deformaciya sebepli erisilgen. Barlıq ósiriw usılları kóp qullanılatuǵınlarınń qısqasha bayanı hár bir fizik ushın yarımótkizgishler baǵdarı boyınsha tiykarlı maǵlıwmat beredi.

3.1-§.Choxral usılı

Choxral usılı kristallardıń Si kristalında qosqan halda kólemli yarımótkizgishlerdi ósiriw ushın tiykarǵı usıl esaplanadı. Baslangısh material eritpesi tigelde alınadı. Tamızǵı kristall eritpeniń joqarı, salıstırmalı suwıǵıraq bólegi menen birlestiriledi hám eritpeden bir waqıtta áste – aqırın shıǵarıp alınadı. Tamızǵıda kristalldıń ósiwi júzege keledi.



1.1-рәс. Monokristall kremniydi ósiriw ushın Choxral pechiniń sxemasınıń súwretleniwi

Choxral usılındaǵı eń joqarı jetiskenlik (1.1-рacм) Si monokristallarınıń dislokaciyasız ósiwi ushın Dasha texnikasın jaratıw esaplanadı.

Ádette ósiw tezligi minutına bir neshe millimetrди quraydı, aylanıwı bolsa cilindr formasındaǵı kristallardı alıwın támiyinleydi. Usı barısta tayarlangan kremniyli quymalar 30 sm den úlken diametrge iye.

Eritpeni orap turǵan tigel hám gaz materialı kristallardaǵı fonlı aralaspalardıń kóbeyiwine alıp keledi. Mısalı, Si degi keń tarqalǵan aralaspalar uglerod (grafit tigeline) hám kislorod esaplanadı. GaAs monokristalları hám indiy fosfidi (InP) ádette Choxral usılı menen jetistiriledi, lekin eritpe hawadan eritilgen bor oksidinen ushıwshı anionpuwların shıǵıp ketiwiniń aldın alıw ushın izolyaciyalanadı. Quramında ushıwshań komponentleri bar kapsulalı suyıq kapsulalı Choxral usılı dep ataladı. Usı metod penen jetistirilgen GaAs de bordıńpatas aralaspası bar boladı.

3.2-§. Bridjmen usılı

Bridjmen usılında Choxral usılı sıyaqlı tamızǵı kristall eritpe menen kontaktta boladı. Biraq tigel uzınlıǵı boylap temperature gradienti jaratıladı, sebebi tamızǵı kristall aldındaǵı temperatura eritiw noqatınan tómén boladı. Tigel konvekciya aǵımların qadaǵalaw ushın gorizontaı yamasa vertical jaylasıwı múmkin. Kristalldıń ósiwine qarap temperatura gradienti pech boylap jaylasqan qızdırgıshlar járdeminde tigel boylap yamasa tamızǵı kristalı bar bolǵan ampulanıń pech ishinde áste háreketleniwi arqalı jıljıyadı.

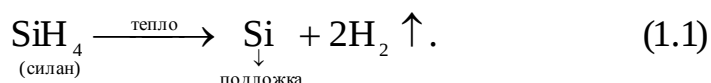
3.3-§. Gaz fazasınan ximiyalıq epitaksiya

Monokristallardı óstiriw ushın Choxral usılı sıyaqlı Bridjmen usılı da qollanıladı. Quramalı kristalldıń juqa qatlamın óstiriw úlken monokristallardı óstiriwden arzanıraq túsedı. Kóbinese ásbaplar kólemin kristallarda óstirilgen juqa

qatlamlardan tayarlanadı. Bunday qatlamnıń qalıńlıǵı 1 mkm yamasa onnan kemirek. Únemlew tárepten alıp qaraytuǵın bolsaq kristall tagliginde joqarı sıpatlı juqa qatlamdı óstiriw usılın qollaw tuwrı boladı.

Bul juqa joqarı qatlamnıń kristall strukturasınıń joqarı sapasın támiyinlew ushın onıń kristall strukturası taglik strukturasına uqsas yamasa tap ózi bolıwı múmkin, olar pánjereleriniń turaqlısı bolsa deformaciyanı minimumǵa keltiriw ushın, bir – birine jaqın bolıwı kerek. Bunda juqa qatlam payda etiwshi atomlar taglik sıyaqlı kristallografik sıyaqlı kristallografik baǵıtqa iye monokristall payda bolıwına umtıladı. Bunday hallarda nátiyjeli plyonka taglikke epitaksiyal súrtiledi. Tap usınday ximiyalıq quramǵa iye monokristall plyonkasınıń súrtiliwi gomoepitaksiya dep ataladı. (Máselen, Si plyonkasınıń Si kólemli kristallına súrtiw). Eger plyonka uqsas strukturalı taglikke súrtilse, ósiw processı basqa ximiyalıq quramlı geteroepitaksiya dep ataladı (mısalı, Si tagligine Ga As plyonkasınıń ósiwi).

Epitaksiyal plyonkalardı qattı, suyuq hám gaz aǵımı shamasın qadaǵalaǵan halda anıq qadaǵalaw ańsat boladı. Ximiyalıq gaz fazalı epitaksiya (XGF) da zárúr ximiyalıq elementlerge iye gazlar taglik jaqınında reakciyaǵa kirisedi. Reakciya nátiyjesinde taglikde reactor ishinde yarımótkizgishlerdiń juqa qatlamı payda boladı. Taglik temperaturası ádette epitaksiyal ósiwde zárúr esaplanadı hám alınatuǵın plyonkanıń sıpatın belgileydi. Si plyonkasın alıwdıń standart reakciyası tómendegi kóriniske iye.



Bayan etilgen usıl menen júdá taza Si alıw múmkin, sebebi H₂ reakciyasınıń zıyanlı tásiiri gaz esaplanadı hám ańsat shıǵarıp taslanadı. Bul usıdın basqa abzallıǵı júdá anıq legirlew esaplanadı, P hám As fosfin (PH₃) hám arsin (AsH₃) gazları túrinde kiritiliwi múmkin. 3-4 gruppanıń yarımótkizgishli

birikpeleri tiykar sıpatında trimetil galliy $[Ga(CH_3)_3]$ sıyaqlı metallorganik birikpelerdi qollağan halda XGE járdeminde óstiriw múmkin. Máselen, Ga As plyonkası

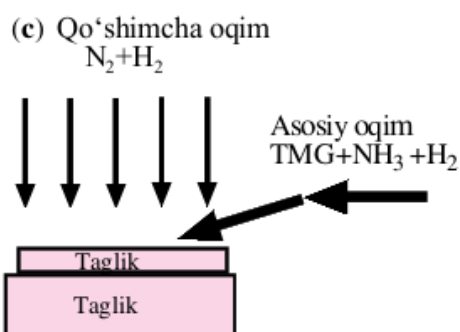
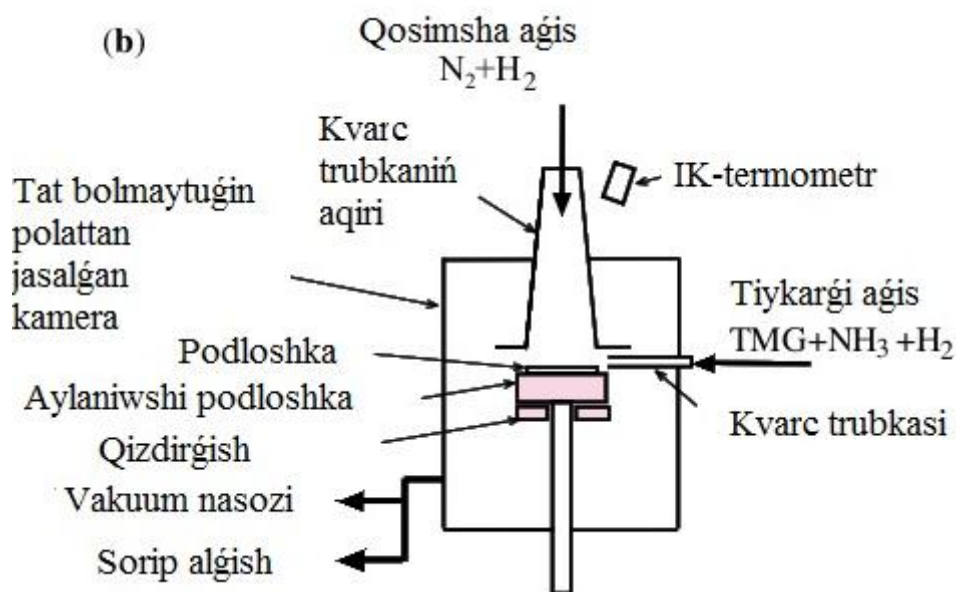
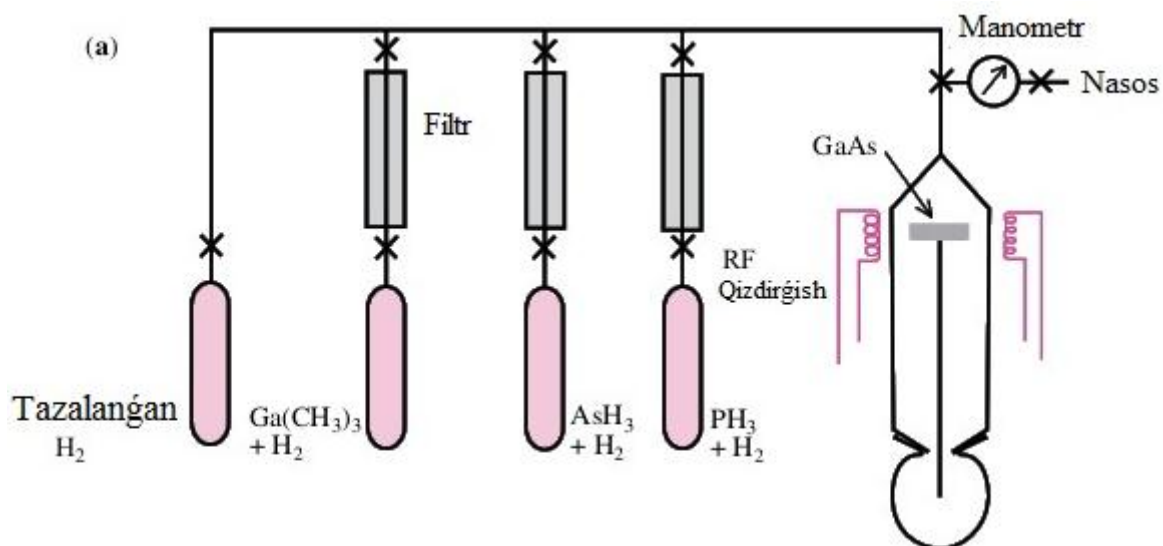


reakciyası járdeminde óstiriliwi múmkin.

Epitaksial plyonkalardıń metallorganik gazlar járdeminde óstiriw metodı metal organic birikpelerdiń puwlarınan gaz fazalı epitaksiya Эпитаксиал плёнкаларнинг металлорганик газлар ёрдамидаўстириш методи металл органик бирикмаларнинг буғларидан газ фазали эпитаксия (МОБPGFE) dep ataladı. Ósiw ushın sáykes keletuǵın qurılma sxeması 1.2 a – súwrette kórsetilgen. GaN ósiwi ushın kiritilgen keying modifikaciya 1.2 b – súwrette kórsetilgen 1.2 v – súwrette taglik janında eki gaz aǵımınıń Oz – ara háreketleniw detalları berilgen.

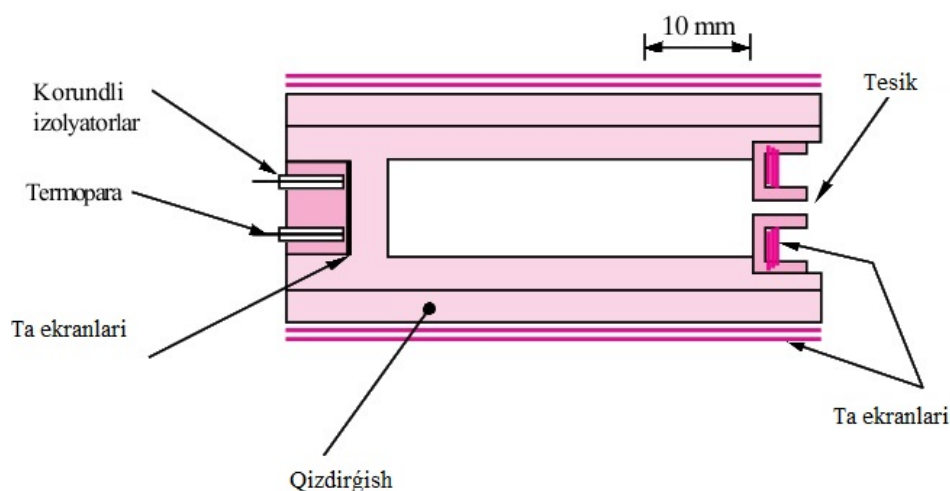
3.4-§.Molekulyar nurlı epitaksiya

XGE de gazlar reaktorga salıstırǵanda joqarı basımda (ádette 1 tordan joqarı) uzatıladı. Nátiyjede reaktorda qaldıq gazlar kórinisinde pataslandırıwshı aralaspalardıń joqarı koncentraciyası bolıwı múmkin. Bul mashqalanı júdá joqarı vakuum (JJV) sharayatında úlgilerdi óstirip hal etiw múmkin. (10^{-7} tordan tómén basım joqarı vakuum, 10^{-11} tor átrapındaǵı basım bolsa júdá joqarı nakuum esaplanadı). Reagentler molekulyar bawlar kórinisinde kirgiziliwi múmkin. Molekulyar bawlar baslanǵısh materialdı júdá kishkene tesikli yacheykada puwlanǵansha qızdırıw arqalı jaratıladı. Bunday yacheyka effuziya yacheykası (knudsen yacheykası) dep ataladı hám onıń sxeması 1.3 – súwrette kórsetilgen. Par yacheykadan kishkene aperture arqalı shıǵıp atırǵanda onıń molekulaları (yamasa atomları) jaqsı kollirmirlengen baw payda etedi, sebebi JJV yacheykadan sırtqa ushıp shıǵıp ketip atırǵan molekulalar (yamasa atomlar) ǵa ballistikalıq



1.2 - súwret. Metall – organikalıq gaz fazalı epitaksiya ushın qurılmanıń sxemalıq kórinisi. Nakamuranıń avtorlıǵı menen birge usınılǵan eki aǵımlı GFEMOS – qurılması (b). Tósemeli beti janındaǵı gaz aǵımları sxeması (v).

tárizde soqlıǵısıwsız 1 metr aralıqqa shekem háreketleniwine imkan beredi. Epitaksiyal ósiriw júz berip atırǵan plyonkanıń tagligine ádette bir neshe molekulyar bawlaw baǵıtladıǵan, yarımótkizgish payda bolıwı baǵıtladıǵan, olarda yarımótkizgish payda bolıwı hám onı legirlew ushın kerekli elementler bar. Sonıń ushın bayan etilgen ósiriw usılı molekulyar bawlı epitaksiya (MBE) dep ataladı.

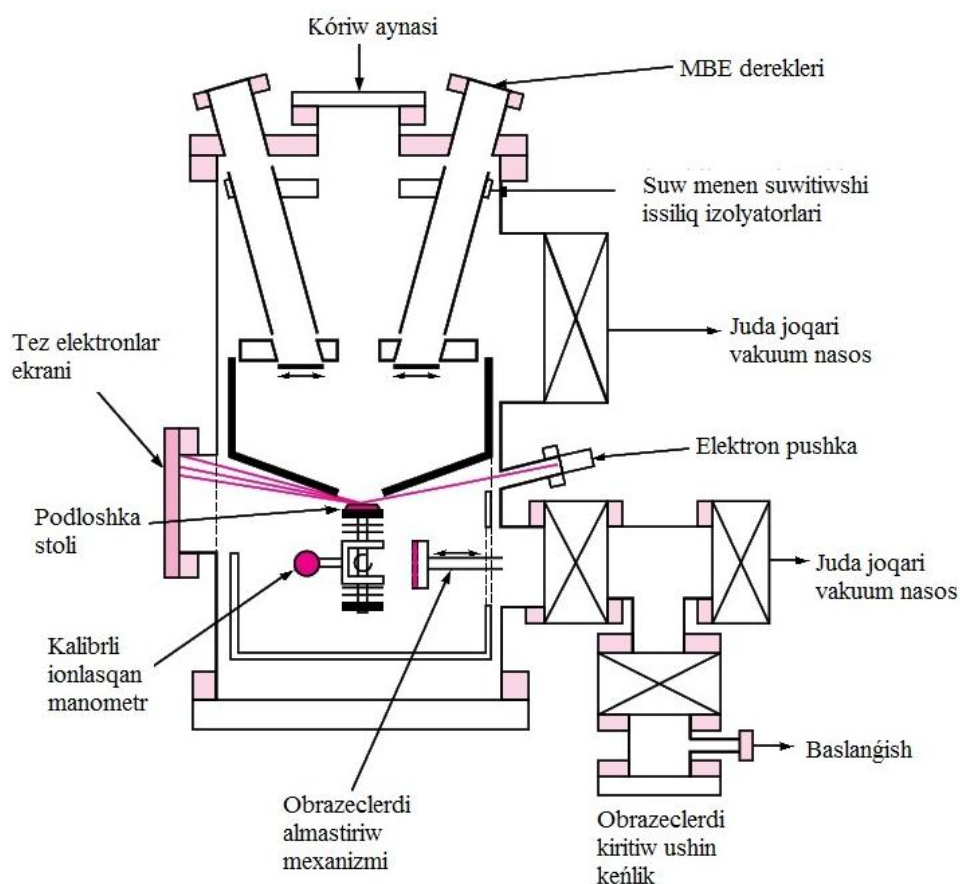


1.3 – súwret. Effuzion yacheykanıń sxemalıq kórinisi (Knudsen yacheykası)

1.4 – súwrette MBE tiplik qurılmasınıń konstrukciyası berilgen. MBE ósiriw usılında taglikde reagentler kocentraciyası kristall stexiometriyasın qadaǵalaw qıyın, kristall stexiometriyasına bul metoddı qollanıwdıń imkanı bar, sebebi JJV electron hám ionlardan zond sıpatında ósiriw processinde bettiń halatı hám alınatuǵın plyonka sıpatın baqlaw ushın paydalanıwǵa imkaniyat beredi. Ionlarǵa tiykarlanǵan zondlaw ádette masspektometriya járdeminde ámelge asırıladı. Elektronlar menen menen baylanıslı qadaǵalaw usılları Oje electron spektroskopiya (OES), áste electron diffrakciyası (ÁED), tez pát penen elektronlardı qaytarıw diffrakciyası (TEQD) hám rentgen hámde ultrafiolet fotoemission spektroskopiya (RFES hám UFES). Kóbinese MBE qurılmalarında DBE qollanıladı.

DBE tipli sisteması joqarı energiyalı (10÷15 keV) elektronlar bawların payda etiwshi electron pushkadan ibarat, ol júdá úlken túsiw múyeshı astında

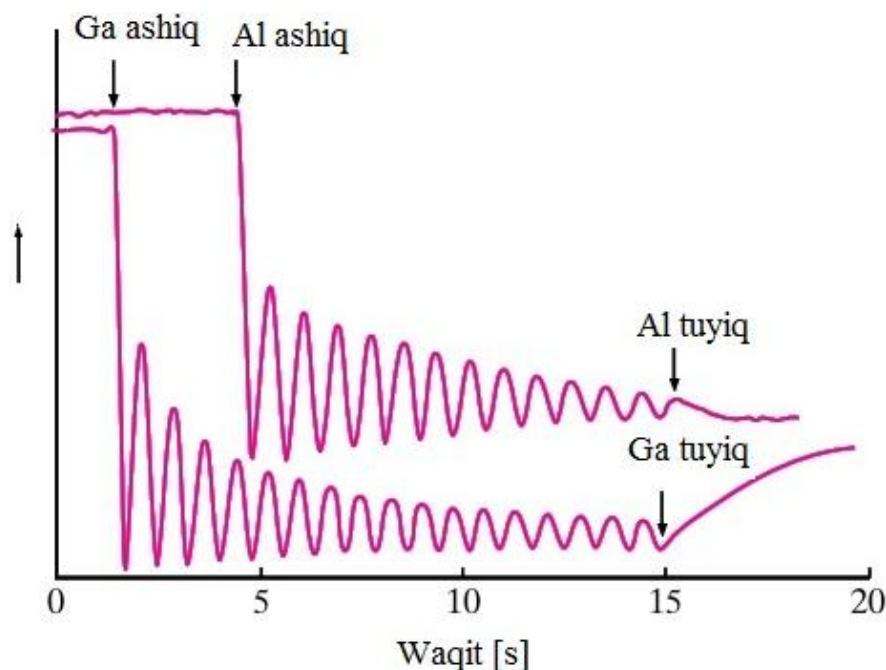
(jıljıwshı túsiw) taglik betine baǵıtlanǵan boladı. (1.4 - súwret). Qayıwshı elektronlar difrakciyası 1.4 – súwrette DBE ekranı sıyaqlı belgilengen lyuminoforlı ekranda qurılmanıń qarama - qarsı tárepinde kórinedi. Bul difrakciya súwretleniwi járdeminde beti geometriyası hám morfologiyasın anıqlaw múmkin. Bunnan tısqarı nol tártipli difrakciya bawınıń (yamasa ayna bawı) intensivligi de sóniwshı oscilyatorlar (DBE oscilyatorları dep atalıwshı) baqlanadı, olar ósiw tezligin baqlawǵa imkan beredi.



1.4-рәсм. Мәләкүләр – бәллі әпітәксия қурылмасының схемалық көрінісі

1.5 – súwrette GaAs/AlAs kvant shuqırlıǵınıń ósiw waqtındaǵı DBE oscilyatorlarına missal keltirilgen. Kvant shuqırlıqları quramına júdá juqa qatlamǵa iye (10 nm den kishkene qalınlıqtaǵı) yarımótkizgishler bolǵan sintezlengen strukturalar esaplanadı. Olar qadaǵan etilgen zonası úlken keńlikke iye basqa yarımótkizgishtiń eki juqa qatlam ortasında jaylasqan. Hár bir

oscillyaciya CaAs yamasa AlAs. Bir dana 1.5 súwrettegi molekulyar qatlamnıń ósiwine sáykes keledi. Usınday quramalı stexlometrik qatlamlar qanday óstiriliwin tısındırıw ushın Ga yamasa Al atomları As atomlarına salıstırǵanda Ga As tagliginde ańsaraq shógedi. Sebebi mishyak joqarı temperaturada ushıwshań, mishyak hár qanday atomları Ga yamasa Al atomları menen taglikde reakciyaǵa kirispegen qızdırılǵan taglikde shókpeydi.



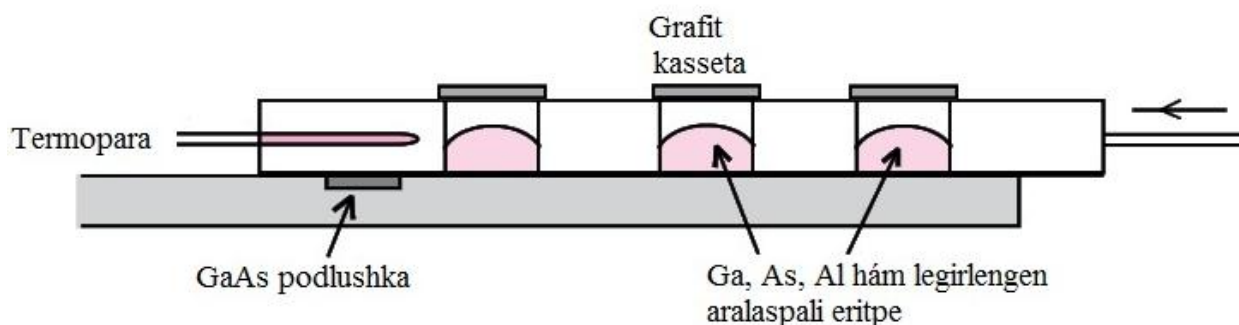
1.5 - súwret. GaAs taglikte GaAs yamasa AlAs plyonkasınıń ósiw processinde difrakciyalanǵan tez elektronlardıń aynada súwretlengen elektron bawındaǵı intensivlik oscillyacıları.

Zaslonlar járdeminde molekulyar bawlardı qadaǵalaw hám DBE oscillyacılar járdeminde ósiwin baqlap mono qatlam artınan mono qatlam sıyaqlı juqa plyonkalardı óstiriw imkanıyatı payda boladı.

MBE metodı joqarı sıpatlı kvant shuqırılıqlarınıń ósiwi ushın qollanıladı. Onıń sawdada qollanıwı uzaq waqt dawamında ósiwi hám joqarı bahası (MBE ni ápiwayı ornatiw 500000 AQSH dolları turadı). Sonıń ushın MBE metodı joqarı sıpatlı plyonkalardıń laboratoriyada óstiriw sharayatların úyreniw ushın qollanıladı, sanaat islep shıǵarıwda bolsa GFEMOS metodınan paydalanıladı.

3.5-§.Suyiq fazalı epitaksiya

Yarımótkizgishli plyonkalar suyuq fazadan epitaksiyal óstiriliwi múmkin. Suyiq fazalı (SFE) GaAs lazerli diodlardı óstiriw ushın júdá qolaylı usıl esaplanadı. Ga yamasa In sıyaqlı 3 grupp metalı As ushın eritiwshi sıpatında isletiledi. Eritiwshi GaAs taglik penen kontaktta suwıtılǵanda, ol As ushın qurǵaq boladı hám GaAs bóleksheleri payda bolıwı baslanadı. Bir neshe eritpelerge iye kassetanı qollaǵan halda Бир неча эритмаларига эга кассетани қўлаган ҳолда (1.6 – súwret) hár túrli quramlı epitasiyal qatlamlardı (qısqasha epiqatlamlar) óstiriw múmkin. SFE niń avzallıǵı qurılmanıń arzanlıǵı hám ápiwayılıǵı bolıp tabıladı. Biraq, onda MBE de ámelge asırılatuǵın ósiw sharayatların qadaǵalaw dárejesine jetiw qıyınraq boladı.



1.6 - súwret. Kristallardı suyuq fazalı epitaksiya metodı arqalı óstiriw qurılması

Demek, monokristall hám yarımótkizgishlerdiń juqa epitaksiyal qatlamların óstiriw ushın túrli metodlar qollanıladı. Choxralskiy yamasa Bridjmen usılları kólemli kristalllardı óstiriw ushın isletiledi. Juqa plyonkalardı jaratıw ushın tómen baha hám ósiw tezliginiń joqarılıǵı ushın SFE usılınan paydalanıladı. Eger 100 nm den az qalınlıqqa iye epitaksiyalqatlamlar kerek bolsa, GFEMOS yamasa MPE metodların qollanıw zárúr.

Aqırǵı jıllarda oksidli yarımótkizgishlerdiń ósiwi ushın optikalıq aynalı keń qollanıw keń tarqalǵan.

IV BAP

4.1-§. Yarımótkizgishlerdiń ájayıp qásiyetleri

Yarımótkizgish materiallar óziniń tómendegi ájayıp qásiyetleri menen házirgi zaman elektronikasını, mikroelektronikasını hám nanoelektronikasınıń tiykarı esaplanadı:

1. Yarımótkizgish materialınıń salıstırmalı qarsılıǵı temperatura artıwı menen (0 K nen) eksponencial nızam menen kemeyedi. Mısalı, kremniydiń temperaturası $T = 100\text{ K}$ den 300 K ge kóterilgende, onıń salıstırmalı qarsılıǵınıń mánisi $10^{24}\text{ Om} \cdot \text{sm}$ den $2 \cdot 10^5\text{ Om} \cdot \text{sm}$ ge shekem, yaǵnıy 10^{18} ese kemeyedi. Usı aralıqta eń jaqsı metall Au nıń salıstırmalı qarsılıǵı bar joǵı 17% artadı. Demek, yarımótkizgishlerdiń elektr qásiyetlerin temperatura járdeminde júdá úlken aralıqta basqarıw múmkin eken. Bul yarımótkizgishlerge tán ájayıp qásiyet.

2. Yarımótkizgish materiallardıń salıstırmalı qarsılıǵı kirispe atomlarına júdá sezgir. Mısalı, eger jáne usı Au ge biz 30% mıs yamasa InGa qossaq, onıń salıstırmalı qarsılıǵı bar joǵı 3% ózgeredi eken, bul jaǵdayda menshikli 1 kg Si ge $0,001\text{ mg}$ yaǵnıy Si degi atomlar sanınan 10^9 ese kem bolǵan B , P yamasa Sb di qosatuǵın bolsaq, onıń salıstırmalı qarsılıǵı 10^3 ese asadı. Demek, bólme temperaturasında Si salıstırmalı qarsılıǵın tek qosımta atomlar koncentraciyası $10^{11} \div 10^{19}\text{ sm}^{-3}$ ge asırıw esabınan onıń salıstırmalı qarsılıǵı $\rho \sim 10^5\text{ Om} \cdot \text{sm}$ den $\rho \sim 10^{-3}\text{ Om} \cdot \text{sm}$ ge shekem ózgerttiriw múmkin. Demek, yarımótkizgishlerge qosımta elementleri kiritilgende olardıń qásiyetlerin keskin ózgerttiriwi hámde olardıń ájayıp qásiyetke iye ekenliginen derek beredi.

3. Yarımótkizgish materiallarında metallardan parqlı túrde 2 túrli tok tasıwshılar yaǵnıy, elektron hám gewekler de bar. Bul degen sóz bir yarımótkizgish materialı tiykarında elektron ótkizgishlikke iye bolǵan n – tip yamasa gewek ótkizgishlikke iye bolǵan p –tip material alıwımız múmkin. Mine

usı qásiyet “Qattı deneler elektronikasına” tiykar bolıwshı diod ($p - n$) hám tranzistorlardıń jaratılıwına hámde házirgi zaman mikro hám nanoelektronikanıń payda bolıwına hám rawajlanıwına tiykar boldı. Yarımótkizgish materiallarınıń mine bul óte ájayıp qásiyeti adamzat ómirinde texnika baǵdarı boyınsha texnika revolyuciya dáwirin baslap berdi.

4. Metallarda ulıwma iye bolmaǵan túsiniq tok tasıwshılar (elektron hám geweklerdiń) jasaw waqtın basqarıw jolları yarımótkizgishler tiykarında ulıwma taza túrdegi elektron áspablar jaratıw imkaniyatın berdi. Bular – lazerler, fotoelementler hám basqalar. Yarımótkizgishlerde tok tasıwshılardıń jasaw waqtı júdá úlken aralıqta ($10^3 \div 10^{-11} \text{ s}$) júdá tez isleytuǵın házirgi zaman esaplaw mashinaları payda bolıwına alıp keldi.

5. Metallarǵa qaraǵanda yarımótkizgish materialları elektrlik, optikalıq hám magnit qásiyetleri sırtqı tásirge (magnit maydan, radiaciya, basım, jaqtılıq hám t.b) júdá sezgir boladı. Mine bul ájayıp qásiyet – texnikanıń túpten jańa dáwiri jaratılıwına sebep boldı. Bul bolsa házirgi zaman esaplaw texnikası, robototexnika hám diagnostika tarawlarınıń joqarı dárejede rawajlanıwına tiykar boldı.

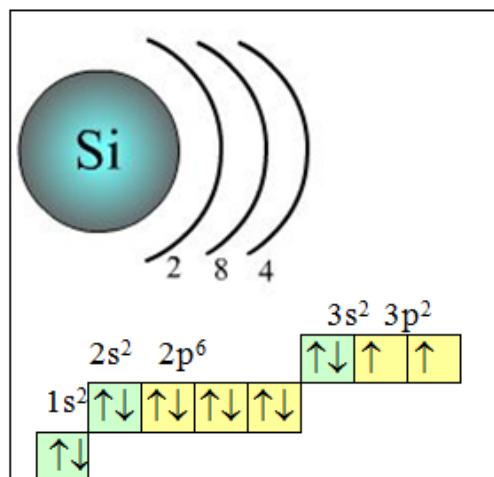
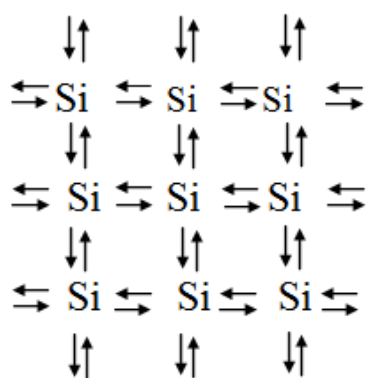
6. Yarımótkizgish materiallarınıń metallardan jáne bir ózgeshe qásiyeti, bul tok tasıwshılar háreketshenligi tek joqarı mánislerge de bálkim, temperatura hámde defektlerge júdá baylanıslılıǵı bolıp tabıladı.

Yarımótkizgishlerdiń tiykarǵı ájayıp qásiyetleriniń fizikalıq mánisin hám olardıń mazmunın kitabımızdıń sońǵı baplarında keltiremiz.

4.2-§. Yarımótkizgishli materiallarda ximiyalıq baylanıs

Tiykarınan yarımótkizgish materiallarındaǵı ximiyalıq baylanıs bul kovalent baylanıs bolıp esaplanadı. Yarımótkizgish materialların quraytuǵın atomlardıń tiykarǵı bólegi s hám p elektron qabıqları tolmaǵan bolǵanı ushın, kristall payda bolǵanda, ondaǵı barlıq atomlardıń sırtqı elektron qabıqları tolıwı shárt. Nátiyjede

kristaldağı hár bir atomnıń sırtqı qabıǵında elektronlar sanı 8 ge jetip s^2p^6 halatına ótedi. Bunday baylanısta spinleri bir–birine qarama–qarsı bolǵan 2 elektron, eki atom ortasında ulıwma bolǵan halda, eki atomdı baylanıstırıp turadı. Mısalı, **Si** kristalın kóretuǵın bolsaq (2.1-súwret), ondağı atomlardıń valent elektronlarınń halatı s^1p^3 halatta bolıp, bunday atom tórt tárepindegi qońsılarınıń birewinen, qarama–qarsı spinli elektronlardı qabıl qılıwı menen, s^2p^6 halatına ótedi.

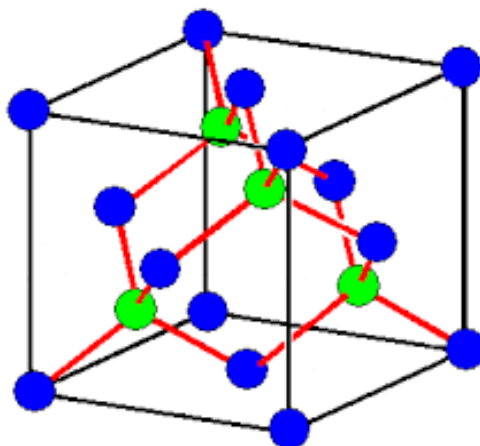


4.1 - súwret. **Si** de elektron qabıqlarınıń tolıwı hám **Si** kristalınıń kovalent baylanısı.

Sonıń ushın bunday baylanıslardı s^1p^3 gibrid baylanıslar dep ataw qabıl qılınǵan. Yarımótkizgish materiallarında kovalent s^1p^3 baylanıs bar bolıwı ushın kristall usınday atomlardan quralǵan bolıwı kerek, onda kristalldı payda etken 2 qońsı atom valent elektronları jıyındısı 8 ge teń bolıwı kerek. Bunday kristallar **Si** (s^2p^2), **Ge** (s^2p^2), **Sn** (s^2p^2), **C** (s^2p^2) yamasa III-topar elementleri **Ga**, **In** (s^2p^1) hám V-topar elementleri **As**, **Sb**, **P** (s^2p^3), bunda bir elektron V-topar ulıwma atomlarınan III-topar atomlarına ótedi hám nátiyjede III hám V-topar atomlarınń elektronlar sanı 4 tewden yaǵnıy s^1p^3 boladı yamasa II-topar elementleri **Cd**, **Zn** (s^2p^2) hám VI-topar elementleri **S**, **Se**, **Te** (s^2p^4), bul jaǵdayda VI-topar elementleri (s^2p^4) nen 2 elektron tolıǵı menen II-topar elementleri (s^2) ne ótedi hám nátiyjede hár eki atomda s^1p^3 halatları payda boladı hámde s^1p^3 tetraedrik kovalent baylanıs payda etedi.

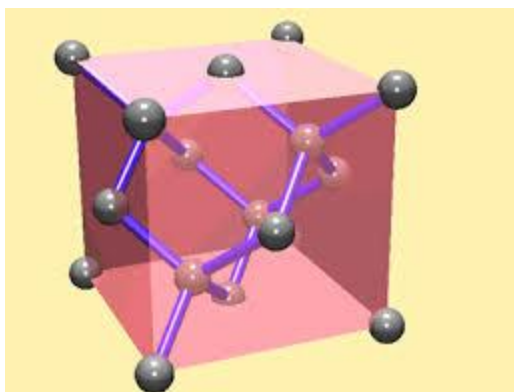
4.3-§. Yarımótkizgish materiallarında kristall pánjere dúzilisi

Yarımótkizgish materiallar kristall pánjere dúzilisi tiykarıan 4 túrli dúziliske almaz, sinkovoy obmanka, vyursit hám as dúzı kórinisinde ushraydı. Almaz kristall pánjere— bul tárepleri oraylasqan eki kub elementar pánjereniń bir- birine salıstırǵanda kólem dioganalı sherek bólegi boyınsha jılǵıǵanda payda boladı.



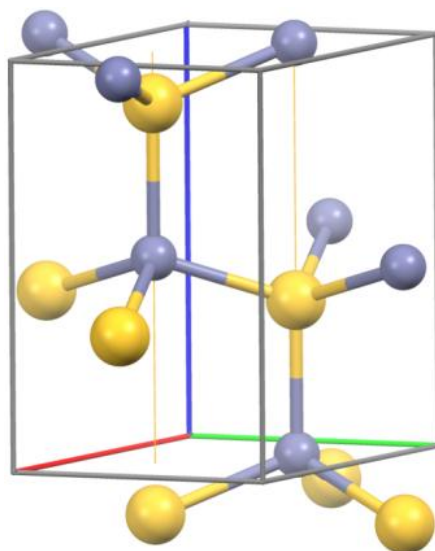
4.2- súwret. Almaz kristall pánjeresi.

Sinkovoy obmanka kristall pánjere – bul tárepleri oraylasqan eki kub elementar pánjereniń kólem dioganalı boyınsha 1/4 bólegi jılǵıǵan halatta payda boladı. Biraq bunıń Almaz túrindegi pánjereden parqı usınday, bul tárepleri oraylasqan bir kub elementar pánjere tek birdey atomlardan, ekinshisi usınday pánjere bolsa basqa túr atomlardan quralǵan boladı.



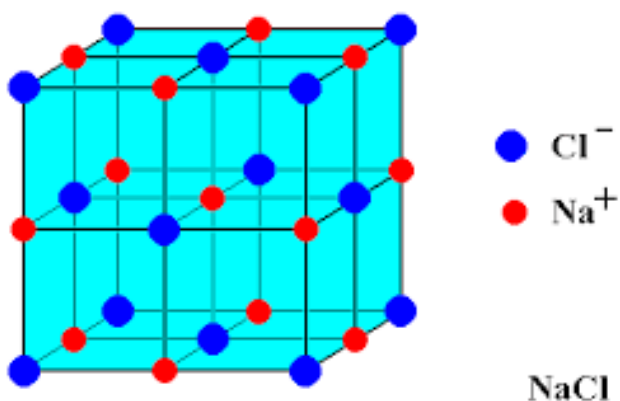
4.3-súwret. Sinkovoy obmanka kristall pánjeresi.

Vyursit elementar kristall pánjere – bul atomları tıgız jaylasqan eki geksoqonal elementar yacheykası bir-birine kiritilgen halda payda boladı. Bunday kristall pánjerelerde atomlar sinkovoy obmanka pánjeresindegi tetroedrdegidey 4 jaqın atomlar menen oralğan boladı.



4.3- súwret. Vyursit kristall pánjeresi.

Ás duzı elementar pánjeresi – bul eki tárepleri oraylasqan kub elementar yacheykalardıń bir-birine kiritilgen halda payda bolıw. Bunday pánjerede bir atom basqa eń jaqın altı atom menen oralğan boladı.



4.4- súwret. Ás duzı kristall pánjeresi.

Tómendegi kestege yarımótkizgish materialları qanday elementar pánjere halında ekenligi hám pánjere turaqlıları keltirilgen:

Material	Element yamasa birikpe element or compound	Atalıwı Name	Kristall srukturası Crystal structure	Pánjere turaqlısı 300 K (Å) Lattice constant at 300K (Å)
I	C	Uglerod Carbon (diamond)	D	3,56683
Element	Ge	Germaniy Germanium	D	5,64613
	Si	Kremniy Silicon	D	5,43095
	Sn	Qalayı 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	Galiy Arsenid Gallium arsenide	Z	5,6533
	GaN	Galiy Nitrid Gallium nitride	W	a=3,189; c=5,185
	GaP	Galiy Fosfid Gallium phosphide	Z	5,4512
	GaSb	Galiy Antimonid Gallium antimonide	Z	6,0959
III-V	InAs	Indiy Mishyak Indium arsenide	Z	6,0584
	InP	Indiy Fosfid Indium phosphide	Z	1 5,8686
	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	Sulfid cink Zinc sulfide	Z	5,420
	ZnS	Rux Sulfid Zinc sulfide	W	a=3,82; c=6,26

	PbS	Qorgasın Sulfid Lead sulfide	R	5,9362
IV-VI	PbTe	Qorgasın Tellur Lead telluride	R	6,4620
	PbSe	Qorgasın Selen Lead selenide	R	6,12

D-almaz; W-vyursit; Z-sinkovoy obmanka; R-kamenniy sol D-diamond; W - wurtzite; Z-zincblende; R- rock salt

4.4-§. Yarımótkizgishli materiallardağı defektler

Metallardan parqlı halda defektler yarımótkizgish materiallarınıń barlıq fizikalıq qásiyetlerine júdá úlken tásir kórsetedi. Sonıń ushın defektler tábiyatına hám koncentraciyasına qarap, yarımótkizgish materialları qásiyetlerin maqsetke muwapıq basqarıw múmkin. Yarımótkizgish materiallarındagı defektler olardıń ólshemlerine qarap, tap basqa qattı deneler sıyaqlı noqatlı, sıziqlı hám kólemli defektlerge bólinedi. Bunnan tısqarı yarımótkizgish materiallarda defektler elektr aktiv hám elektr neytral halında bolıwı múmkin. Elektr aktiv defekt degende, kristall pánjere defektleri payda bolıwı menen ondağı tok tasıwshılar muğdarı ózgeredi, yaғniy elektronlar hám gewekler koncentraciyası artıwı yamasa kemeyiwı múmkin, nátiyjede yarımótkizgish materiallarınıń ótkizgishligi ózgeredi. Bul metallarda ushıramaytuğın qubılıs.

Eger defekt yarımótkizgish materiallarda elektron hám gewekler ózgeriwine tásir etpese bunday defektler elektroneytral defektler dep ataladı.

Elektr aktiv defektlerge erkin elektronlar hám gewekler payda etiwshi kirispe atomlar, vakanciyalar hám radiyacion defektler kiredi. Erkin elektronlar

hám geweklerdiń defekt bolıwına sebep, erkin elektronlar kovalent baylanıstı úziwi esabınan payda bolǵanlıǵı ushın baylanısı buzılǵan atom oń zaryadlangan ion halına ótedi. Gewek bolsa, kovalent baylanısı buzılıwı esabınan oń ionǵa aylanǵan yarımótkizgish materialınıń tiykarǵı atom halı bolıp tabıladı. Sonı da aytıp ótiw zárur, qosımta atomlarınıń barlıǵı da elektr aktiv defekt bola almaydı. Eger qosımta atomlarınıń valent elektronları sanı, yarımótkizgish materialınıń tiykarǵı atom valent elektronları sanına sáykes kelse, bunday atom kovalent baylanısın tolıq támiyinlegenini ushın, qosımsha erkin elektronlar hám gewekler payda etpeydi. Sızıqlı defektlerge – dislokaciya kiredi. Dislokaciýalar da elektr aktiv defekt halatlarında ushıraydı. Yarımótkizgishlerde defektlerdi óz tábiyatına qarap teń salmaqlıqtaǵı, teńsalmaqsızlıqtaǵı hám kvazi teń salmaqlıqtaǵı defektlerge bóliw múmkin. Teń salmaqlıqtaǵı defektlerge berilgen temperatura energiyası kT ǵa sáykes keletuǵın kristall pánjere defektlerine aytıladı. Kristall ósirilip atırǵanda diffuziya jolı menen kirgizilgen barlıq qosımta atomlarınıń halatı, ósirilip atırǵan yamasa diffuziya qılınıp atırǵan temperaturadan tómén barlıq temperaturalarda teńsalmaqsızlıq halatda boladı. Bunday defektler álbette waqıt ótiwi menen ástelik menen óz teń salmaqlıq halatına qaytıwı múmkin. Eksiton bul – óz - ara baylanısqa hám bárqulla birlesip háreket etetuǵın elektron hám gewekler juplıǵına aytıladı. Eksiton júdá tómén temperaturalarda boladı. Eksitonlar elektr aktiv defektler emes. Yarımótkizgish materiallarında kirispe atomlar halatı joqarıda kórsetilgendey qosımta atomları elektr aktiv hám neytral halatlarda bolıwı múmkin. Elektr aktiv kirispe atomlar óz tábiyatına kóre 3 túrli jaǵdayda ushıraydı. Egerde kirispe atomlar valent elektronlar sanı yarımótkizgishdegi tiykarǵı atomlar valent elektronlarınan kóp bolsa, olarda kirispe erkin elektronlar payda bolıwına alıp keledi. Bunday atomlar-donor qosımta atomları dep ataladı. Eger kirispe atomlar valent elektronlar sanı yarımótkizgish materialı tiykarǵı atomlar valent elektronlar sanınan kem bolsa, gewekler payda etedi. Bunday qosımta atomlar-akceptor qosımta atomlar dep ataladı. Bazıbir qosımta atomlar yarımótkizgish kristall pánjeresinde

elektronlar hám gewekler ózgeriwine alıp keliwi múmkin, bunday qosımta atomlar amfoter kirispe atomlar dep ataladı.

4.5-§. Yarımótkizgish materiallarına qosımta atomlardı kiritiw jolları

Joqarıda keltirilgendey, yarımótkizgishlerdiń fizikalıq qásiyetlerin yaǵnıy, olardı ótkizgishlik, fotosezgirlik hám magnit qásiyetlerin júdá úlken masshtabda basqarıwdıń tiykarǵı jolı bul bunday materiallarǵa kerekli hám anıq koncentraciya muǵdarında qosımta atomlar kiritiw bolıp esaplanadı. Házirgi zaman texnologiyası boyınsha qosımta atomlar 3 túrli jol menen kiritiledi. Kristallardı ósiriw waqıtında, diffuziya jolı hám ion implantaciya jolı menen de kiritiledi.

Monokristallardı berilgen baǵıt boyınsha ósiriw usılların eń tiykarǵılarınan biri bul Choxral usılı bolıp esaplanadı. Bul usıl menen ósirilgen Kremniy monokristalı tómendegi 4.6-súwrette keltirilgen. Bunda arnawlı kvarc tigillerdi, yarımótkizgish materialları suyıltırılǵan halda bolıp, bunday suyıqlıq betine anıq oriyentaciyasına ([111], [110], [101]) iye bolǵan jıńışke monokristall (zatravka) túsiriledi. Zatravka suyıq yarımótkizgishke tiygeninen soń, ol óz kósherinde aylanıwı menen birge ástelik penen (1÷3 mm) joqarıǵa minutına koterile baslaydı. Nátiyjede usı zatravka baǵıtına sáykes halda, suyıq dene kristall halına aylanadı.



4.6 – súwret. Choxral usılı menen alınǵan **Si** monokristalı.

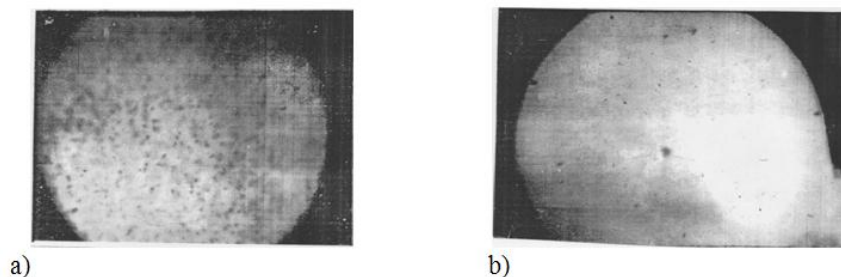
Bunda suyuq haldaǵı denede payda bolatuǵın monokristalldıń qanday fizikalıq parametrlerine iye bolıwın támiyinleytuǵın bor, fosfor, mishyak yamasa basqa qosımta atomların kerekli muǵdarda qosıp, olardıń pútkil suyuqlıq boyınsha tegis bolıstırılıwı támiynlenedi. Qosımta atomlarınıń bunday usıl boyınsha kiritiliwı, ólshemleri hár qıylı bolǵan, biraq birdey fizikalıq parametrlerge iye bolǵan monokristallar alıw ushın isletiledi. Qosımta atomlarınıń yarımótkizgish material kristallarına kiritiwdiń ekinshi usılı bul diffuziya járdeminde islenedi. Bul usılda tiykarınan qosımta atomların belgili bir juqa qatlamların payda etiw ushın qollanıladı. Bunday usılda kiritilip atırǵan qosımta atomlar koncentraciyası, onıń diffuziya qılınıp atırǵan temperaturasındaǵı eriwshenligi, qansha qalıńlıqqa kiriwi bolsa diffuziya koefficienti menen shegaralanadı. Bul usıl házirgi zaman mikrosxemalar hám diskret yarımótkizgishli áspablar jaratıw processinde tiykarǵı usıl esaplanadı.

Qosımta atomlar kiritiwdiń úshinshi usılı bul kirispe atomların vakuumda arnawlı jollar menen olardıń energiyasın arttırıp, kristall betin qosımta atomlar menen bombalaw. Nátiyjede kirispe atomları (ionları) energiyaǵa sáykes halda betinen bir neshe $10 \text{ \AA}$ nan bir neshe $100 \text{ \AA}$ ge shekem kiredi, yaǵnıy yarımótkizgish materialınıń betindegi júdá juqa qatlam qosımta atomları menen bayıtıladı. Bunday usılda kiritilgen atomlardı elektr aktiv halına keltiriw ushın kristall belgili temperaturaǵa qızdırıladı, bunnan tısqarı qosımta atom ionları menen bombalanǵan kirispe atomları jetip barǵan jerine shekem radiacion defektler payda boladı, eger ionlar energiyası hám dozası joqarı bolatuǵın bolsa onda kristall beti amorf halǵa keliwi múmkin. Bul usıldan paydalanǵanda kristall betinde qálegen koncentraciyadaǵı qosımta atomlar payda etiw múmkin.

4.6-§. Qosımta atomlar diffuziyası

Diffuziya jolı menen qosımta atomlar kiritiw házirgi zaman mikroelektronikasında hár túrli quramalı integral sxemalar jaratıw texnologiyası

processiniń eń tiykarǵı etaplarınan esaplanadı. Diffuziya processı 2 tiykarǵı túsinik: qosımta atomlar eriwshenligi hám olardıń diffuziya koefficienti menen anıqlanadı. Eriwshenlik berilgen temperaturada diffuziya jolı menen kristallǵa kiritiw múmkin bolǵan atomlar koncentraciyası. Eriwshenlik, qosımta atomlar radiusı, massası hám olar sırtqı elektron qabıǵındaǵı elektronlar sanına, yarımótkizgishtiń tiykarǵı atomlarınan qanshelli parıq qılǵanlıǵına baylanıslı. Bul parıq qansha úlken bolsa, bunday qosımta atomlarınıń kristall pánjere túyinlerinde jaylasıw itimallıǵı sonshelli kem bolıwı menen birge olardıń eriwshenlik mánisleri de kem boladı. Eger qosımta atomlar menen yarımótkizgishtiń tiykarǵı atomları arasındaǵı parıq qansha úlken bolsa, bunday halda qosımta atomlar kristall pánjere aralıǵında jaylasıw itimallıǵı kóp boladı. Bunday qosımta atomları bar kristall pánjereli yarımótkizgish materiallar túyinler arasında payda bolǵan qattı dene qosımta dep ataladı. Bularǵa: *Si* ge *Zn*, *Fe*, *Ni*, *Co*.



4.7- súwret. a). Diffuziya processinde *Si* monokristalına *Ni* atomları kiritilip atırǵan waqıtta infraqızıl nurda alınǵan súwret b) salıstırılıwshı úlgi.

Eger qosımta atomlar menen yarımótkizgishtiń tiykarǵı atomları arasındaǵı parıq qansha kem bolsa bunday atomlar kristall pánjere túyinlerinde jaylasıw itimallıǵı kóp bolıwı menen birge olardıń eriwshenligi de joqarı dárejede boladı. Bunday yarımótkizgish materiallar orınbasar qattı dene qosımtaları dep ataladı. Mısalı, bularǵa *Si* ushın *B*, *In*, *Ga*, *P*, *As*, *Sb* . . .

Ulıwma qosımta atomları atomlar eriwshenligi temperaturaǵa baylanıslılıǵı tómendegishe anıqlanadı:

$$N = N_0 e^{-\frac{E_r}{kT}}. \quad (4.1)$$

Bul jerde N – berilgen temperaturada qosımta atomlar eriwshenligi, k – Bolcman turaqlısı, T –temperatura, E_r –eriwshenlik energiyası, N_0 –temperatura sheksiz bolganda eriwshenlik mánisi.

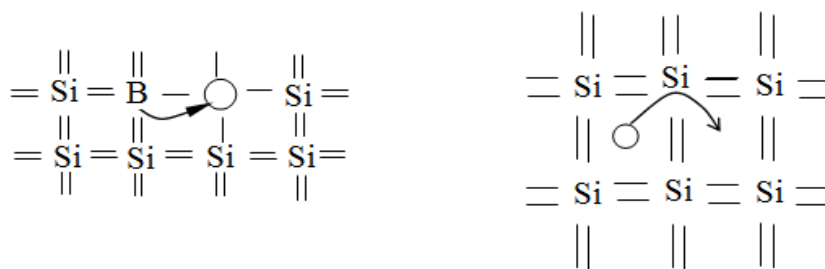
Atomlardın yarımótkizgish material betinen diffuziya nátiyjesinde kólem bóylap kirip barıw tezligin kórsetetuğın shama bul diffuziya koefficienti dep ataladı. Diffuziya koefficientiniń mánisi hám qosımta atomları parametrleri de diffuziya tezligine baylanıslı.

$$D = D_0 e^{-\frac{E_d}{kT}}, \quad (4.2)$$

D_0 –temperatura sheksiz bolgandağı diffuziya koefficienti, E_d –diffuziyanıń energiya aktivliligi (yağniy atomlardın kristall pánjere ishinde bir teń salmaqlıq halatınan ekinshi teńsalmaqlıq halatına ótiwi ushın zárúr bolğan energiya).

Eger qosımta atomlar túyinler boyınsha diffuziya qılınatuğın bolsa, onda E_d mánisi túyinde turğan atomnıń 3 qońsısı menen baylanısın úziw ushın kerek bolğan energiya hám atom qońsı túyin ornına ótiwi ushın ol jerde vakanciya payda bolıwı ushın kerek energiyalar jıyındısına teń boladı. Bunday qosımta atomlar ushın *Si* de E_d mánisi $E_d = 3 \div 5 \text{ eV}$ ға teń boladı. Eger atom túyinler aralıq diffuziya qılınıp atırğan bolsa, onda E_d mánisi atom turğan túyinler aralıq ornınan qońsı usınday orınğa ótiwi ushın zárur bolğan energiyalar menen, atom 2 túyin ortasınan ótip atırғanda sırtqı qabıq elektronlar óz - ara iyteriw kúshlerin jeńiw ushın sarplanıp atırğan energiyalar jıyındısına teń boladı. Bunday qosımta atomlar ushın E_d mánisi $E_d = 0,5 \div 2,5 \text{ eV}$ átirapında bolıwı múmkin. Mısalı, *Li* hám *Fe* atomlarınıń *Si* de $t = 1000^\circ\text{C}$ temperaturadağı diffuziya koefficienti

$D_{Li} \sim 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, $D_{Fe} \sim 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$. Bor (B) yamasa fosfor (P) da $t = 1200^\circ\text{C}$ temperaturada diffuziya koefficienti $D_B = 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$, $D_P = 2 \cdot 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$.

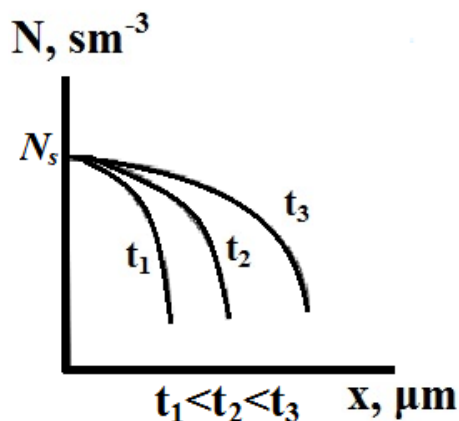


4.8– súwret. Si kristalına bazıbir elementlerdi diffuziya jolı menen kiritiw.

Diffuziya processinde berilgen waqıtta qosımta atomlardıń kólem boyınsha bolıstırılıwi diffuziya waqıtında qosımta atomlar muǵdarına qarap 2 túrli bolıwı múmkin. Eger diffuziya processinde dene sırtındaǵ ı yamasa diffuziya júz berip atırǵan ortalıqta qosımta atomlar koncentrasiyası, qosımta atomlardıń diffuziya bolıp atırǵan temperaturadaǵı eriwshenliginen júdá úlken bolsa, yaǵnıy diffuziya processinde qosımta atomlardıń betindegi mánisi derlik ózgermey qalsa, bunday jaǵdaydı shegaralanbaǵan derekten diffuziya dep ataydı hám onıń bólistiriliwi tómendegi teńlik penen anıqlanadı:

$$N = N_s \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right), \quad (4.3)$$

bul jerde D – diffuziya koefficienti, t – diffuziya waqtı, x – diffuziya tereńligi, N_s – qosımta atomlarınıń betindegi koncentrasiyası.

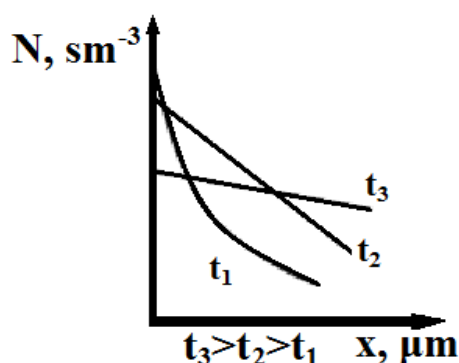


4.9 – súwret. Shegaralanbaǵan derekten diffuziyanıń bolıstırılıwi.

Bunday halat turaqlı derek arqalı bolıp atırğan diffuziya halatı dep ataladı. Eger diffuziya processinde qosımta atomlardıń dene betindegi koncentraciyası ózgeretuǵın bolsa, bunday haldı shegaralanǵan derek arqalı diffuziyalanıw dep ataydı hám onıń bolistiriliwi tómendegi teńlik penen anıqlanadı:

$$N(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right), \quad (4.4)$$

bul jerde Q – diffuziya waqtında 1 sm^2 betten yarımótkizgishke kiritilgen qosımta atomları muǵdarı, D – diffuziya koefficienti, t – diffuziya waqtı, x – diffuziya tereńligi.



4.10 – súwret. Shegaralanǵan derek arqalı diffuziyanıń bolistiriliwi (hár túrli waqt boyınsha diffuziyalanadı).

4.7-§. Kirispe atomlardıń eriwshenligi

Qosımta atomlardıń kristallda eriwshenligi – berilgen temperaturada diffuziya nátiyjesinde kristallǵa kiritiwi múmkin bolǵan maksimum atomlar koncentraciyasına ayıladı. Demek, usı temperaturadaǵı eriwshenlikten artıqsha atomlardı kristall pánjerege kiritiw múmkin emes. Eriwsheńlik temperaturaǵa baylanıslı bolıp, temperatura artıwı menen eksponencial nızam menen artıp baradı hám tómendegi qatnas penen anıqlanadı:

$$N = N_o \exp\left(-\frac{E}{kT}\right), \quad (4.5)$$

bul jerde $N_o - T = \infty$ bolǵanda eriwshenlik, E – eriwshenlik energiyası, k – Bolcman turaqlısı. Kristall pánjerege diffuziya jolı menen kiritilgen qosımta atomlar hár túrli halatlarda bolıwı múmkin – tek túyinlerde jaylasıwı, tek túyinler aralıq jaylasıwı hámde basqa atomlar yamasa defektler menen kompleks payda etken halda da ushraydı. Teoriyalıq esaplawlar sonı kórsetedi, qosımta atomlardıń túyinlerde jaylasıwı ushın tómendegi shártler orınlanıwı tiyis, yaǵnıy yarımótkizgishtiń tiykarǵı atomları hám qosımta atomlar radiusları bir – birine júdá jaqın bolıwı hám olardıń parqı 14% den aspaı kerek. Sonıń menen birge tiykarǵı atom hám qosımta atomnıń sırtqı qabıǵındaǵı elektronlar sanı júdá az muǵdarda parıq qılıwı kerek. Mısalı, Ge atomlarınıń valent elektronları sanı, atom radiusi hámde kristall dúzilisi Si atomlarınan júdá az parıq qılǵanlıǵı ushın Ge kremniy kristalında sheksiz eriwshenlik qásiyetine iye. Qosımta atomlarınıń túyinler arasında jaylasıwı ushın qosımta atomlardan atom radiusi qansha kem hám olardıń valent elektronları, yarımótkizgish tiykarǵı atom valent elektronları qansha kóp parıq qılıwı tiykarǵı sebep boladı. Mısalı, Li atomları kremniy kristalında 100% túyinler arasında jaylasadı. Biraq júdá kóp qosımta atomları bir waqıttıń ózinde hám túyinlerde hám túyinler arasında jaylasıwı múmkin. Mısalı, Cu, Fe, Mn, Ni – atomları kremniyde usınday halatlarda boladı. Qosımta atomlar diffuziya koefficienti menen, olardıń eriwshenligi ortasında anıq baylanıs bar, yaǵnıy diffuziya koefficienti qansha úlken bolsa, olardıń eriwshenligi sonshelli kem boladı. Diffuziya jolı menen kiritilgen atomlardıń barlıǵı da elektroaktiv bólmaydı, yaǵnıy olar qadaǵan etilgen zonada bazıbir energetik qáddi payda etip, qosımta elektron yamasa gewek payda etpeydi. Bunday qásiyetke kóbirek diffuziya koefficienti úlken bolǵan hám tiykarınan túyinler arasında jaylasqan qosımta atomları iye boladı. Mısalı, nikel qosımta atomlarınıń $t=1250^{\circ}C$ da eriwshenligi $N = (4 \div 5) \cdot 10^{17} sm^{-3}$ bolsa, olardan tek $4 \cdot 10^{14} sm^{-3}$ elektroaktiv atom esabında gewekten akceptor energetik qáddi payda etedi. Kiritilgen atomlardıń tiykarǵı bólegi 99.9% i elektroneytral halatta qalıp, hár túrli

basqa defektler menen kompleksler payda etedi. Usınday qásiyetke *Fe, Mn, Co, Cd*.... hám basqalarda iye. Qosımta atomlarınń eriwshenligine tásir qılatuǵın jáne bir shama bul olardıń segregaciya koefficienti – *k*. Bul shama qosımta atomlarınń yarımótkizgish materialları olardıń erigen (*N_y*) (suyıq) hám qattı dene (*N_s*) halatındaǵı yaǵnıy fazalıq teń salmaqlıq halatındaǵı koncentraciyalarınń qatnasına teń.

$$k = \frac{N_{qattı}}{N_{suyıq}}, \quad (4.6)$$

k – qosımta atomlardıń tábiyatına baylanıslı bolıp, ol qansha úlken bolsa, yaǵnıy 1 ge jaqınlassa, onıń eriwshenligi sonshellı úlken boladı. Tórende kremniy kristalında bazıbir qosımta atomlardıń eriwshenligi hám segregaciya koefficientiniń mánisleri keltirilgen:

4.1- keste. Kremniyde qosımtalardıń eriwshenlik hám bólistiriw koefficienti.

Qosımta	Maksimal eriwshenlik,	Segregaciya koefficienti, %	Maksimal temperatura, °C
Cu	$3 \cdot 10^{18}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$	1300
Ag	$2 \cdot 10^{17}$		1350
Au	$1 \cdot 10^{17}$	$3 \cdot 10^{-5}$	1250
Li	$4 \cdot 10^{19}$	$1.3 \cdot 10^{-2}$	1200
B	10^{20}	0,9	1200
Al	$1.7 \cdot 10^{20}$	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

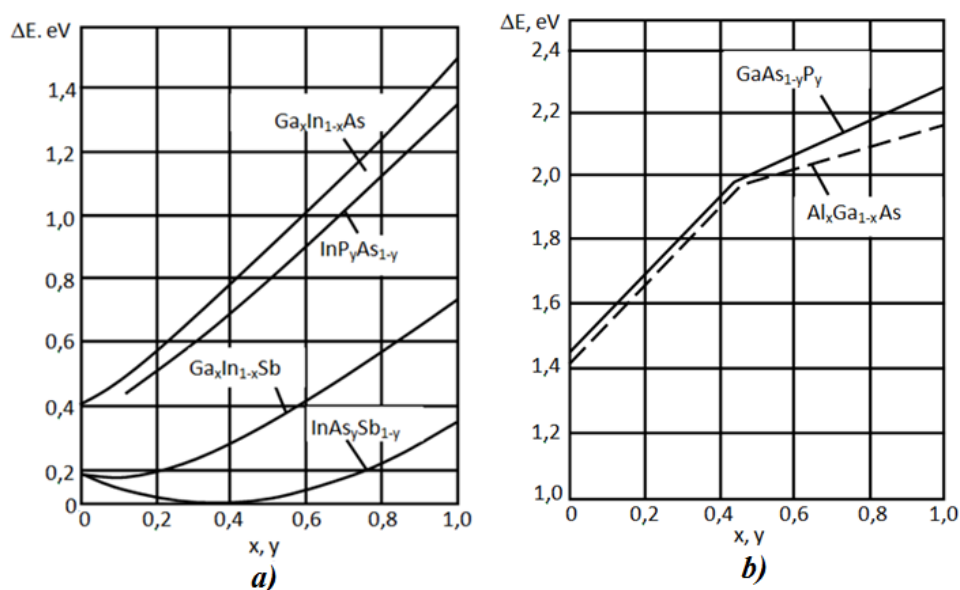
Cr	10^{16}		1200
Fe	$5 \cdot 10^{16}$	$8 \cdot 10^{-6}$	1250
Co	$2 \cdot 10^{16}$		1250
Ni	$7 \cdot 10^{17}$		1250
Mn	$2 \cdot 10^{16}$		1250
Re	10^{16}		1250
Ru	10^{17}		1260
Os	10^{16}		1300
Rn	10^{16}		1250
Ir	$5 \cdot 10^{16}$		1250
Pd	$4 \cdot 10^{16}$		1250
Pt	10^{16}		1250
Sm	10^{18}		1300
Gd	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

Sonı aytıp ótıw kerek, bazıbir kirispe atomlar erıwsheńligi barlıq waqıtta (2.5) ańlatpa menen anıqlanbaydı. Olardıń eń úlken erıwsheńligi belgili temperaturaǵa shekem ósip barıp soń kemeyedi. Mısalı, *Cu* atomların kremniyde eń úlken erıwsheńligi $t = 875^{\circ}C$ da $N = 4 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ ge teń bolıp, keyin temperatura artıwı menen ol kemeyedi.

4.8-§. Binar yarımótkizgish materiallarında qosımta atomlar erıwsheńligi

Elementar yarımótkizgish materiallar kremniy, germaniyden parqlı halda $A^{III}B^V$ yamasa $A^{IV}B^{VI}$ yarımótkizgish materiallarda qosımta atomlardıń túyinindegi halatı hár túrli boladı. Bunıń sebebi qosımta atomı *Si* mısalı, *GaAs* da *Ga* atomı ornın iyelese, ol donör wazıypasın atqaradı, yamasa eger ol *As* atomı ornın iyelegende ol endi akceptor qosımta atomı wazıypasın atqaradı. Sonıń menen birge *Si* qosımta atomınıń *GaAs* erıwsheńligi de onıń qanday turǵanına baylanıslı boladı. Sebebi joqarı temperaturada diffuziya qılınǵanda *GaAs*

kristalında **As** atomları ornında kóbirek vakanciyalar payda boladı. Usıǵan sáykes halda qosımta atomların **As** atom ornın iyelewi júz beredi. Kerisinshe tómenirek temperaturada ($t < 800^{\circ}\text{C}$) qosımta atomları diffuziya qılınǵanda olardıń **Ga** atomları ornında jaylasıw itimallıǵı asadı. Sonı da aytıp ótiw kerek, $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$ hám $A^{\text{IV}}B^{\text{VI}}$ yarımótkizgish materiallarında izovalent (valentligi birdey) qosımta atomların diffuziyası sebepli, túpten jańa quramalı yarımótkizgish materialların jaratıw múmkin. Mısalı, **GaAs** kristalına III – topar elementlerinen **Zn** yamasa **Al** diffuziya qılınǵanda olar álbette **Ga** atom ornın iyelewi menen birge olardıń eriwshenligi júdá úlken boladı. Sonıń esabınan mısalı, **Zn** kirispe atomların bir neshe % kiritiw jolı menen taza $\text{Zn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ – materiall payda etiledi.



4.11 – s úwret. Qadaǵan etilgen zona keńliginiń $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$ birikpeleri tiykarındaǵı qattı denelerdiń quramına baylanıslılıǵı ($T = 300\text{ K}$).

Endi bul jerde **Zn**, **Ga** ornınıń belgili bir bólegin iyelegeni ushın ol hesh qanday energetik qáddi payda etpegen ximiyalıq baylanıstı buzbaǵan halda jańa quramalı elementar pánjere $\text{Zn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ – payda etiledi. Bunday pánjereniń fundamental parametrleri – qadaǵan etilgen zona keńligi, zaryad tasıwshılar

háreketshéńligi *GaAs* dan túpten parıq etedi. Bul parametrlerdı *Zn* tiń eriwshéńligin asırıw jolı menen *ZnGa* materialları fundamental parametrlerine shekem ózgettiriw múmkin. Tómendegi 4.11-súwrette bunday halat júdá jaqsı sáwlelengen.

Usıǵan uqsas *V* – topar elementleri atomlarınıń $A^{III}B^V$ degi eriwshéńliginiń júdá úlken ekenligi esabınan olardı diffuziya qılıw jolı menen jańa tiptegi yarımótkizgish materialları $GaAs_xP_{1-x}$ yamasa $GaAs_xSb_{1-x}$ lar jaratıladı. $A^{III}B^V$ yarımótkizgish materiallarına hám izovalent II yamasa VI – topar elementlerin diffuziya jolı menen kiritiw arqalı jańa – $Cd_xZn_{1-x}S$, CdS_xSe_{1-x} materialların jaratıw múmkin. Izovalent qosımta atomlarınıń eriwshéńligin $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$ – yarımótkizgish materiallarında sheksiz eriwshéńligi tek ǵana jańa quramalı yarımótkizgish materialların jaratıw imkaniyatın berip qoymastan, bálkim bir kristallda málim qalınlıqqa iye bolǵan jańa tipdegi geteroótiwler jaratıw imkanın beredi. Mısalı, $Ga_xAl_{1-x}As$ – *GaAs* hám soǵan uqsas. Bunday jańa tiptegi geteroótiwler júdá aktiv isleytuǵın hám basqarılatuǵın yarımótkizgishli lazerler hám fotoelementler jaratıw imkaniyatı asadı. Tómendegi keste quramalı yarımótkizgishlerdiń qadaǵan etilgen zona keńliginiń izovalent qosımta atomlar muǵdarına baylanıslı ózgeriwi keltirilgen:

4.2 – keste. Quramalı yarımótkizgish materiallarınıń qadaǵan etilgen zona keńligi.

$GaAs_{0,88}Sb_{0,12}$	1,21 eV
$Ga_{0,47}In_{0,53}As$	0,75 eV
$Ga_{0,5}In_{0,5}Sb$	0,36 eV
$Ga_{0,3}In_{0,7}Sb$	0,24 eV
$InAs_{0,2}P_{0,8}$	1,1 eV
$Ga_{0,13}In_{0,87}As_{0,37}P_{0,63}$	1,05 eV
$GaAs_{0,45}P_{0,55}$	1,977 eV
$Al_{0,4}Ga_{0,86}As$	1,59 eV
$Al_{0,4}Ga_{0,86}As$	1,62 eV
$Ga_{0,612}In_{0,388}As$	0,95 eV

CdGaAs ₂	0,55 eV
CdSnP ₂	1,15 eV
ZnGeP ₂	2,2 eV
AgZnSe ₂	1,2 eV
AgZnS ₂	2,0 eV
AgGaS ₂	2,7 eV
CuAlS ₂	3,5 eV

IV bapqa tiyisli sorawlar:

1. Yarımótkizgishlerdiń metallardan tiykarǵı parqı nelerden ibarat?
2. Yarımótkizgishlerde ximiyalıq baylanıs tábiyatı qanday?
3. *Si, GaAs* hám *Cd* materiallarda ximiyalıq baylanısı kórsetiń?
4. Yarımótkizgish materiallarınıń qanday kristall dúzilisi bar?
5. Kristall pánjere defektleri dep nege ayıladı, noqatlıq defekt degenimiz ne?
6. Frenkel hám Shottki defektleri bular qanday defektler?
7. Defektlersiz kristall alıw múmkinbe?
8. Temperaturaǵa júdá sezgir defektler bul...?
9. Yarımótkizgishlerge kirispe atomların qanday jol menen kiritiw múmkin?
10. Diffuziya degenimiz ne hám ol qashan júz beredi?
11. Kirispe atomlardıń diffuziya koefficienti nelerge baylanıslı?

V BAP

5.1-§. Yarımótkizgishlerde tok ótiw mexanizmi

Qattı denelerden ótip atırǵan tok tıǵızlıǵı J , materialdıń salıstırmalı elektr ótkizgishligi hám denege qoyılǵan maydanǵa tuwrı proporcional:

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

yamasa

$$J = \frac{E}{\rho}, \quad (5.2)$$

ρ –materialdın salıstırmalı qarsılıǵı, ρ hám σ lerdin mánisleri materialdın tábiyatına baylanıslı. Ekinshi tárepten tok tıǵızlıǵı J bul vektorlıq shama bolıp, ol kesim betinen waqıt birliginde ótip atırǵan zaryad tasıwshılar muǵdarın kórsetedi. Eger tok tasıwshılar (elektronlar) tezligi birdey dep esaplansa, onda tok tıǵızlıǵı tómendegige teń boladı:

$$J = -en\vartheta, \quad (5.3)$$

e – elektronnıń zaryadı, n – elektronlar koncentraciyası, ϑ – elektronlar dreyf tezligi. Toktıń baǵıtı elektronnıń dreyf tezliginiń baǵıtına keri bolǵanı ushın teńlik aldında «-» (minus) belgisi qoyılǵan. Elektr maydan qóyılmaǵanda elektronlar xaotik háreket qılǵanı ushın olar tezlikleriniń vektorlıq jıyındısı nolge teń. Demek, tok tıǵızlıǵı hám nolge teń. Elektron elektr maydanı esabınan tezleniw aladı. $eE = ma$ demek, elektron eki soqlıǵısıw arasında óziniń tezligin $\vartheta = at$, $a = \vartheta/t$, $eE = m\vartheta/t$, $\vartheta = eEt/m$ ge ózgerttiredi. Sonı esapqa alıw kerek, elektron hár bir soqlıǵısqannan soń, yaǵnıy óz baǵıtın azǵana ózgerttirgen halda, yaǵnıy tezligi usınday mániske artadı, sonıń ushın da bul jerdegi t – elektrondi elektr maydan esabınan alǵan teńsalmaqsızlıq jaǵdayınan teńsalmaqlıq jaǵdayına keliwi zárur bolǵan relaksaciya waqıtı τ ǵa teń dep qabıl qılındı. Onda elektronnıń ortasha dreyf tezligi $\vartheta = -eE\tau/m$ di (5.3) ańlatpaǵa qóyıp, tómendegi ańlatpa keltirip shıǵarıladı:

$$j = en \cdot \frac{eE\tau}{m}, \quad j = \sigma E, \quad \sigma = en\mu, \quad (5.4)$$

bul jerde μ - háreketsheńlik [$sm^2/V \cdot s$].

Demek, háreketsheńlik bul bir birlik elekt maydanı qoyılǵanda elektronlar dreyf tezliginiń ózgeriwi tok tasıwshılar háreketsheńligi dep ataladı, onıń birligi [$sm^2/V \cdot s$].

Solay etip, qattı deneler elektr ótkizgishligi (σ) nı anıqlaytuǵın tiykarǵı parametrler bul - elektron zaryadı, elektronlar koncentraciyası hám

háreketsheńligi eken. Tok tasıwshılar háreketsheńligi yarımótkizgish materiallarında júdá úlken áhmiyetke iye. Sebebi bul shama yarımótkizgishler tábiyatı, dúzilisi, ondaǵı qosımta atomlar koncentraciyası hám temperaturası, jaqtılıqqa qarap júdá úlken aralıqta ózgeriwi múmkin. Yarımótkizgishlerdegi tok tasıwshılardıń háreketsheńligi tuwralı keyingi baplarda tóqtalıp ótemiz.

5.2-§. Yarımótkizgishlerdegi zaryad tasıwshılar statistikası.

Bul lekciyamızda ulıwma ótkiziwsheńlik zonadaǵı (erkin) elektronlar hám valent zonadaǵı erkin geweklerdiń tıǵızlıǵı anıqlanadı hámde olardıń bir qansha shamalarǵa baylanıslı ekenligi analiz qılınadı.

Kvant fazalı yasheyka. Bul-bir kvant jag'dayına tuwra kelgen faza (halat) lar kólem iesaplanadı. Onı tómendegi pikir júrgiziwler tiykarında anıqlaymız. Kristall tor hám onıń tor (reshetka) turaqlısına dárejeli bolǵan L- qabırǵalı kubdan ibarat bolsın. Bul jaǵdayda elektronnıń tolqın funkciyası

$$\Psi_{\vec{k}}(\vec{r}) = U_{\vec{k}}(\vec{r}) \cdot e^{i\vec{k}\vec{r}} = U_{\vec{k}}(x, y, z) e^{i(k_x x + k_y y + k_z z)} \quad (5.5)$$

kóriniste berilip, onıń dáwirli shárti

$$U_{\vec{k}}(x, y, z) \exp[i(k_x x + k_y y + k_z z)] = U_{\vec{k}}(x + L, y + L, z + L) \cdot \exp[i(k_x(x + L) + k_y(y + L) + k_z(z + L))] \quad (5.6)$$

boladı. Bul shárttiń qanaatlanıwı ushın

$$K_x = \frac{2\pi g_x}{L}; \quad K_y = \frac{2\pi g_y}{L}; \quad K_z = \frac{2\pi g_z}{L} \quad (5.7)$$

qatnaslar orınlı bolıwı kerek. Bunda g_x, g_y, g_z – pútin sanlar. Bul sanlardı bir úshlik mánisine bir kvant jaǵday (K_x, K_y, K_z , lardıń bir úshlik mánisi, yaǵnıy k vektordıń bir mánisi) tuwrı keledi. Haqıyqattan, $\Delta g_x=1, \Delta g_y=1, \Delta g_z=1$, bolǵanda, bul úshlik mániske sáykes keledi

$$(\Delta K_x \Delta K_y \Delta K_z) = (2\pi/L)^3 \quad (5.8)$$

Shama bir kvant jaǵdayǵa tuwrı kelgen tolqın vektor fazası kólemin bildiredi.

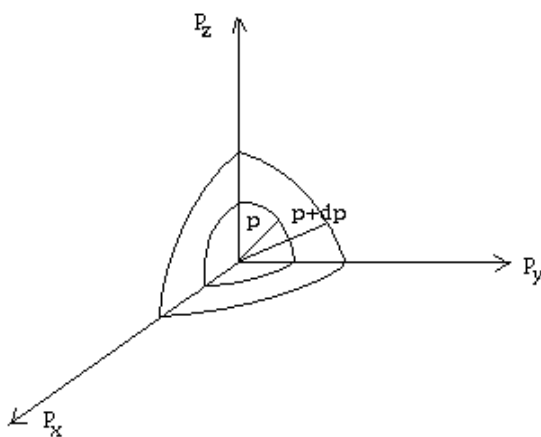
Biraq, $p_x = \hbar k_x$, $p_y = \hbar k_y$, $p_z = \hbar k_z$ ekenligin itibarǵa alsaq, ol halda

$$(\Delta p_x \Delta p_y \Delta p_z) \cdot L = (2\pi\hbar)^3 = \hbar^3 \quad (5.9)$$

shama $\bar{p}$ impulstıń bir mánisine tuwrı kelgen jaǵdaylar fazası kólemi boladı. Mine usı $\hbar^3$ shama kvant fazalı yasheyka delinedi. Eger jaǵdaylar fazasınıń ıqtıyarlı kólemin alıp onı $\hbar^3$ ke bólinse, usı kólemdegi kvant jaǵdaylar sanı payda boladı. Bunnan keyin $L^3=1\text{cm}^3$ dep alamız.

5.3-§.Zonadaǵı kvant jaǵdaylar tıǵızlıǵı

Elektronnıń energiyası menen onıń impulsi arasındadıǵı baylanıs $E = p^2 / 2m^*$ kóriniste bolsın. Bul jaǵday izotrop kristall ushın bolıp, bir qıylı energiyalı bet r_x , r_y , r_z koordinatalar fazasında sfera (shar bet), E hám r tegisliginde bolsa, parabola bolmadı. Usı jaǵdayda impulslar fazasında r hám $r+dr$ radiuslı sferalar sızamız (5.1. súwret).



5.1. súwret

Olar arasındadıǵı sferik qatlamnıń kólemi

$$dp_x dp_y dp_z = 4\pi p^2 dp \quad (5.10)$$

boladı. Elektronnıń spini eki qıylı baǵıtqa iye bolǵanlıǵın itibarǵa alıp, (5.10) formulanı $\hbar^3$ ke bólsek usı qatlamdaǵı jaǵdaylar sanı kelip shıǵadı:

$$2 \frac{4\pi p^2 dp}{\hbar^3} = g(p) dp \quad (5.11)$$

Energiya hám impuls arasındadıǵı $E = p^2 / 2m^*$ baylanısınan paydalanıp, (5.11) formula ornına tómendegini payda etemiz:

$$4\pi \left(\frac{2m^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} \sqrt{E} dE = g(E) dE \quad (5.12)$$

bundadı

$$g(E) = 4\pi \left(\frac{2m^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} \cdot \sqrt{E} \quad (5.13)$$

Bul formulanı keltirip shıǵarıwda elektronnıń energiyasınıń esabı ótkiziwsheńlik zonasınıń túbinen baslanadı ($E_s=0$) dep qabıl qılınǵan. Eger $E_s \neq 0$ bolsa, bunday jaǵdayda

$$g(E) = 4\pi \left(\frac{2m^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} \cdot \sqrt{E - E_c} \quad (5.14)$$

bolıp onı ótkiziwsheńlik zonasında elektronlardıń kvant halatları tıǵızlıǵı delinedi.

5.4-§. Elektronlar hám geweklerdiń energiyalar boyınsha bólistiriliwi

Elektronlar yarım spinli, bo'leksheler bolǵanlıǵı ushın olar Fermi-Dirak statistikasına boysınadı, yaǵnıy elektronnıń T temperaturada E energiyalı jaǵdayda bolıw itimallıǵın usı

$$f_o(E, T) = \left[1 + \exp \frac{E - F}{kT} \right]^{-1} \quad (5.15)$$

Fermi bólistiriliwi funktsiyası súwretleydi, bul jerde F – sapıstırmalı termodinamik potentsial, elektroximiyalıq potentsial, yamasa Fermi qáddi sıyaqlı atlar menen atalğan statistika parametri. Onı tekserilip atırğan úlginıń elektroneytrallıq shárti tiykarında tabıladı. Ótkiziwsheńlik zonasındaǵı elektronlar tıǵızlıǵı (2sm^3 daǵı sanı) jeterli darejede kem bolǵanda elektronlar gazın siyrek (aynımaǵan) gaz dep qarawımız mumkin. Bul jaǵdayda $\exp(-F/kT) \gg 1$ dep esaplaw mumkin. Sonıń ushın Fermi bólistiriliwi, yaǵnıy (5.15) formula

$$f_o(E, T) = \exp\left(\frac{F - E}{kT}\right) = C(F) \exp\left(-\frac{E}{T}\right) \quad (5.16)$$

ko'riniske keledi. Bul o'z na'wbetinde fizikalıq Maksvell- Boltsman bo'listiriliwi, funktsiyası.

5.5-§. Zonalarda erkin elektronlar hám erkin gewekler tıǵızlıǵı (koncentraciyası)

Ótkiziwsheńlik zonasında E energiya qáddi jaqınında kishkene dE energiya aralıǵındaǵı erkin elektronlardıń jaǵdaylar sanı $g(E)dE$ boladı. Usı energiya jaǵdaylarınń hár birinde elektronnıń bolıw itimallıǵı $f_o(E, T)$ bolıwı belgili. Demak, dE energiya aralıǵında elektronlar sanı $f_o(E, T)g_n(E)dE$.

Bul formuladan bir pútin ótkiziwsheńlik zonası boyınsha alınǵan integral usı zonadaǵı elektronlardıń teń salmaqlı tıǵızlıǵın beredi.

$$n_o = \int f_o(E, T)g_n(E)dE \quad (5.17)$$

Bunı esaplawda integraldın' to'mengi shegaralıq energiyası ushın o'tkiziwsheńlik zonanın' tu'bin ultanın' sanaq bası ($E_c=0$) dep alamız.

Energiyanın' ma'nisi asqan sarı $f_o(E)$ funktsiya tez kemeyip barıwınan ko'rinip turıptı. Biraq E nin' u'lken ma'nislerin'in' (7.1) ge qosatug'ın u'lesi ju'da' kishi boladı. Sonın' ushın funktsiyalardag'ı integraldın' joqarı shegarasın sheksiz (∞) dep alsaq boladı. Demek (5.14) ha'm (5.15) lerdı (5.17) ke qoysaq

$$n_o = 4\pi \left(\frac{2m^*}{h^2} \right)^{3/2} \int_0^\infty \frac{\sqrt{E}}{\exp\left(\frac{E-F}{kT}\right) + 1} dE \quad (5.18)$$

kelip shıgadı. Usı jerde $x=E/kT$ hám $F^*=F/kT$ ólshemsiz shamalardı kirgizip, (5.18) formulanı tómendegishe jazıp alamız:

$$n_o = 4\pi \left(\frac{2m^*}{h^2} \right)^{3/2} \int_0^\infty \frac{x^{1/2} dx}{1 + \exp(x - F^*)} \quad (5.18a)$$

jáne

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \hat{O}_{1/2}(F^*) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \frac{x^{1/2} dx}{1 + \exp(x - F^*)} \quad (5.19)$$

belgilewler kiritsek, bul jaǵdayda

$$n_o = N_s \hat{O}_{1/2}(F^*) \quad (5.19b)$$

dep jazıw mumkin. Bul jerde N_c di jaǵdaylardın' effektiv tıǵızlıǵı, $F_{1/2}(F^*)$ da bolsa Fermi integralı dep ataladı. Tap usınday jol menen valent zonadaǵı geweklerdin' r_o teńsalmaqlı tıǵızlıǵınıń formulasın payda qılıw múmkin. Kórsetilgen energiya qáddinde elektronnıń bolmaslıq itimallıǵı tómendegishe boladı:

$$f_{op}(E, T) = 1 - f_o(E, T) = \left[1 + \exp\left(\frac{F - E}{kT}\right) \right]^{-1} \quad (5.20)$$

Bul formulada E energiya o'tkiziwshen'lik zonası túbi ($E_s=0$) dan baslap esap qılınadı. Qadaǵan zona keńligi E_g dep belgilenedi. Valent zonada

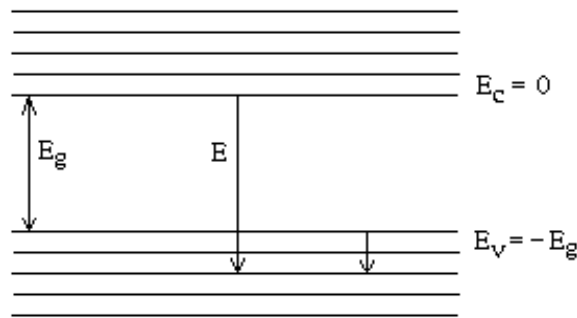
elektronniń energiyası joqarıǵa qarap ósip baradı. Búǵan kerisinshe, gewektiń energiyası zona shep tárepinen baslap tómén tárepke dawam ettiremiz. 5.2 – súwretten kórinip turǵanday, $E = -E_g - E^1$ bolıp bunda E^1 - gewektiń valent zona shep tárepinen esaplaǵan energiyası. Demek

$$f_{op}(E, T) = f_{op}(E', T) = \left[1 + \exp\left(\frac{F + E_g - E'}{kT}\right) \right]^{-1} \quad (5.21)$$

Endi E_v daǵı gewekler energiya jaǵdayları tıǵızlıǵı

$$g_p(E') dE = 4\pi \left(\frac{2m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \sqrt{E} dE' \quad (5.22)$$

kórinisinde jazılıwı múmkin. Valent zonadaǵı geweklerdiń teń salmaqlı



5.2 – súwret

tıǵızlıǵın (5.17) formula sıńarı tómendegi integral arqalı súwretlenedi.

$$P_o = \int_0^\infty f_{op}(E') g_p(E') dE' \quad (5.23)$$

(5.20) hám (5.21) (5.22) ge alıp barıp qoysaq

$$P_o = N_v \hat{O}_{1/2}(-E_g^* - F^*) \quad (5.24)$$

payda boladı, bul jerde

$$E_g^* = E_g / kT, \quad F^* = F / kT, \quad N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2},$$

$$\hat{O}_{1/2}(-E_g^* - F^*) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \frac{x' dx'}{1 + \exp(x' + E_g^* + F^*)}; \quad x = E' / kT \quad (5.25)$$

Fermi integralları $F_{1/2}$ niń mánisleriniń grafigi bar. Tómente biz áhmiyetli eki jaǵdaydı kórip shıǵamız.

I. Aynımaǵan yarımótkizgish. Ótkiziwsheńlik zonasındaǵı elektronlar tıǵızlıǵı hám valent zonadaǵı elektronlar tıǵızlıǵı jeterli dárejede kishkentay bolsa, bunday yarımótkizgish deymiz. Bul klassik statistikaǵa boysınadı, yaǵnıy elektronlar hám geweklerdiń energiya jaǵdayları boyınsha bólistiriliwi Maksvell – Boltsman bólistiriw nızamı súwretleydi.

$$\exp(-F/kT) \gg 1 \quad (5.26)$$

II. Aynıǵ'an yarımótkizgish. Elektronlar yamasa gewekler tıǵızlıǵı jeterli dárejede úlken bolǵan yarımótkizgish aynıǵan yarımótkizgish delinedi. Tiykargı zaryad tasıwshılar elektronlar bolǵan (n-tip) yarımótkizgishte erkin elektronlar gaziniń aynıw shárti F Fermi qáddin ótkizgishlik zonasında bolıwı, yaǵnıy

$$\exp(-F/kT) < 1 \quad \text{yamasa} \quad F > 0 \quad (5.27)$$

Bunday yarımótkizgishler erkin elektronlar tıǵızlıǵı úlken, biraq valent zonadaǵı gewekler tıǵızlıǵı salıstırmalı ádewir kem boladı. Bunı aynıǵan n-tip yarımótkizgishdegi tiykargı zaryad tasıwshılar bolǵan (p-tip) yarımótkizgish erkin gewekler gaziniń aynıǵan shárti F Fermi qáddiniń valent zonasında bolıwı, yaǵnıy

$$\exp((E_g + F)/kT) > 1 \quad \text{hám} \quad F < -E_g \quad (5.28)$$

5.6-§.Menshikli yarımótkizgishlerdegi elektron hám gewekler tıgızlıǵı
formulaların analizlew.

Teńsalmaqlı jaǵdayda hár qanday yarımótkizgishler elektr ta'repten neytral bolıwı kerek, yaǵnıy barlıq oń zaryadlar qosındısı barlıq teris zaryadlar qosındısına teń bolıwı lazım. Bul elektr neytrallıq shárti delinedi hám onıń tiykarında dúzilgen teńlemeden Fermi qáddi anıqlanadı. Menshikli yarımótkizgish jaǵdayı ushın F Fermi qáddin anıqlayıq. Menshikli yarımótkizgish bul aralaspasız taza yarımótkizgish. Biraq menshikli ótkizgishlik jánede keńirek maǵanaǵa iye. Bunı tómende qaraymız, menshikli yarımótkizgish málim bir temperaturada valent zonadan ótkiziwsheńlik zonasına qansha elektron ótip alǵan bolsa, valent zonada sonsha gewek payda boladı. Demek, bul jaǵdayda elektrneytrallıq shárti

$$-en_o + ep_o = 0, \quad n_o = p_o = n \quad (5.298.1)$$

kóriniste boladı. Bul shártke muwapıq

$$N_c \hat{O}_{1/2}(F^x) = N_v \hat{O}_{1/2} [(-Eg - F) / kT] \quad (5.308.2)$$

Bul teńlemede F Fermi qáddi anıqlanadı. Ulıwma jaǵdayda F tiń funkciyası bolǵan temperatura T nıń mánisleri shama menen tabıladı. Biraq, ámelde joqarı t^o-lardı hám menshikli yarımótkizgishler aynımaǵan boladı, yaǵnıy Fermi funkciyasın Maksvell – Boltsman bólistiriliwine almastırıp, yaǵnıy $\exp(-F/kT) \gg 1$ dep esaplap, n_o hám R_o ler ushın $n_o = N_c \exp(F/kT)$ hám $p_o = N_v \exp[-(Eg + F)/kT]$ formulalar alınadı. Bul jaǵdayda elektr neytrallıq shárti

$$N_c \exp(F/kT) = N_v \exp[-(Eg + F)/kT] \quad (5.31)$$

boladı, bunnan

$$\exp\left(\frac{F}{kT}\right) = \frac{N_v}{N_c} \exp\left[-\frac{(E_g + F)}{kT}\right] \quad (5.32)$$

yamasa

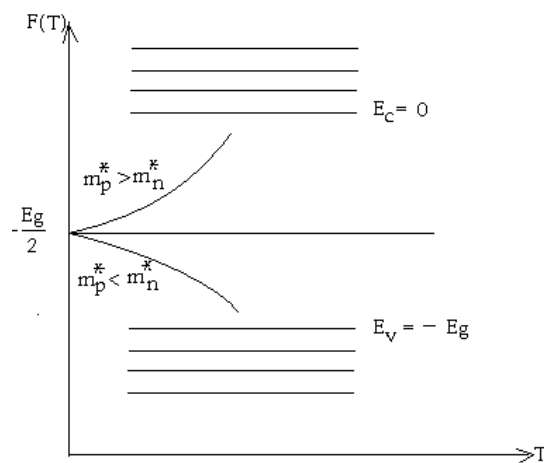
$$F = -\frac{E_g}{2} + \frac{3}{4}kT \ln\left(\frac{m_p^*}{m_n^*}\right) \quad (5.33)$$

kelip shıǵadı. Bul funktsiyası n_0 ha'm R_0 lerge qoysaq, tómendegini payda qılamız.

$$n_o = p_o = n_i = \sqrt{N_c N_v} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) = 2 \left(\frac{2\pi \sqrt{m_n^* m_p^*} kT}{h^2} \right) \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (5.34)$$

Solay etip, (5.33) hám (5.34) formulalardan áhmiyetli juwmaqlar kelip shıǵadı.

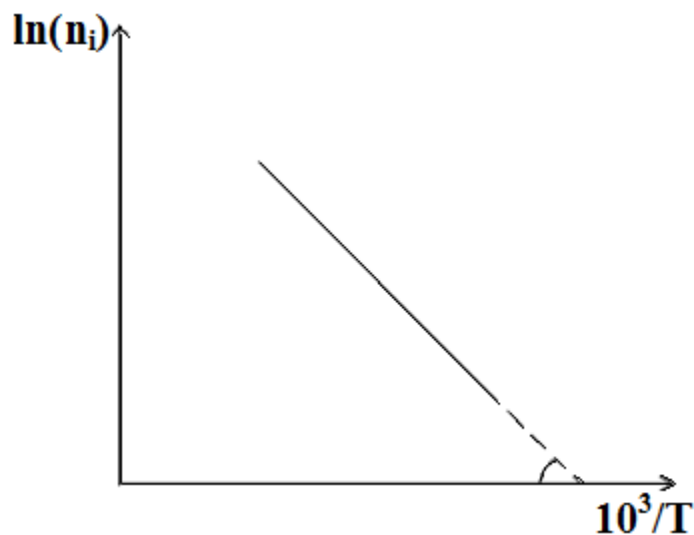
1) Menshikli yarımótkizgishler $F(T)$ Fermi qáddi absolyut nol ($T=0K$) t^0 -da qadaǵan zonanıń qaq ortasında jatadı ($F(0)=-E_g/2$). Temperatura $T=0K$ nen kóterilgen sayın $F(t)$ ya joqarıǵa kóteriledi (eger $\left[\frac{m_p^*}{m_n^*}\right] > 1$ bolsa) yamasa tóménley baslaydı (eger $\left[\frac{m_p^*}{m_n^*}\right] < 1$ bolsa) usı ayılǵanlar 5.3 – súwrette keltirilgen.



5.3 – súwret

2) menshikli yarımótkizgishlerde erkin elektronlar hám gewekler tıǵızlıǵı n_i qadaǵan zonanıń keńligi E_g hám temperaturaǵa t^0 kúshli baylanıslı.

Bir qıylı temperaturadaǵı eki yarımótkizgishten qaysı biri ushın E_g kishkene bolsa, usı yarımótkizgishler ushın n_i úlken boladı. Temperatura ósip barǵan sayın n_i – tıǵızlıq eksponencial artıp baradı, yaǵnıy menshik yarımótkizgishler zaryad tasıwshılar tıǵızlıǵı temperaturaǵa júdá sezgir. Onıń $n_i(T)$ baylanıs sızıǵı (5.30) awısıwınan E_g nı anıqlaw mumkin. Bunı qadag'an zonalıq termik keńligi dep ataymız. Haqıyqattanda (5.34) formuladan $\ln(n_i) = -\frac{E_g}{2kT} + \frac{1}{2}\ln(N_c N_v)$ kelip shıǵadı. Bul jerde



5.4 – súwret

$\ln(N_v N_c) \sim \ln T^3$ -tıń temperatura T ǵa baylanısı salıstırmalı tómen, usılı itibarǵa almasaq, $\ln(n_i) = f(T)$ baylanısı, súwrette kórsetilgenindey, tuwrı sızıq kórinisinde boladı. Bunnan $E_g = 2kTg\alpha$ ni anıqlap alıw múmkin. Ayrıqsha atap ótetuǵın bolsaq, temperatura artqan sayın qadaǵan zona E_g keńligi de ózgeredi. Mısalı, germaniy (Ge) kristalında $E_g(T) = E_g(0) - 4 \cdot 10^{-4}T$ qatnas orınlı boladı. Basqa kristallar ushın T nıń aldındaǵı kóbeytiwshiniń mánisi hár qıylı boladı. 3) Aldıńǵı $n_0 p_0 = n_i^2$ qatnas hár qanday aynımaǵan yarımótkizgishler ushın tuwrı boladı.

5.7-§. Qosımtalı aynımağan yarımótkizgishlerdegi elektronlar hám gewekler tıgızlıǵı

Endi yarımótkizgishler N_a tıgızlıqlı aktseptor atomlar kiritilgen jaǵdaydı qarap shıǵayıq. Bul jaǵdayda yarımótkizgishtiń kólem birliginde, sáykes ráwishte N_d ha'm N_a tıgızlıqlı donor E_d energiyalı hám akseptor E_a energiyalı qáddiler payda boladı. Olar ya neytral jaǵdayda yamasa bir ($\pm$) zaryadlı jaǵdayda boladı dep esaplaymız. Berilgen jaǵdaylarda Fermi funkciyası tómendegi kórinislerdi aladı. Donor qáddide elektronniń bolıw itimallıǵı

$$f_{nd} = \left(1 + \left(\frac{1}{2}\right) \exp\left[\frac{(-E_d - F)}{kT}\right]\right)^{-1} \quad (5.35)$$

gewektiń bolıw (elektronniń bolmaslıq) itimallıǵı

$$f_{pd} = \left[1 + 2 \exp\left(\frac{F + E_d}{kT}\right)\right]^{-1} \quad (5.36)$$

kóriniste boladı. Akseptor qáddide bolsa elektronniń bolıw itimallıǵı

$$f_{na} = \left[1 + 2 \exp\left(\frac{E_a - E_g - F}{kT}\right)\right]^{-1} \quad (5.37)$$

gewektiń bolıw itimallıǵı

$$f_{pa} = \left(1 + \left(\frac{1}{2}\right) \exp\left(\frac{E_g + F - E_a}{kT}\right)\right)^{-1} \quad (5.38)$$

boladı. Bul formuladaǵı E_d hám E_a - sáykes ráwishte donor hám akseptor atomlarınıń ionlanıw energiyası. Donor hám akseptor qáddileriniń elektronlar hám gewekler tıgızlıǵı ushın tómendegi formulalar payda boladı:

$$n_d = f_{nd} N_d, p_d = f_{pd} N_d, n_a = f_{na} N_d, p_a = f_{pa} N_a \quad (5.39)$$

Usı tayarlıqlardan keyin qosımtalı yarımótkizgishler erkin zaryad tasıwshılar tıgızlıǵın anıqlaw máselesin sheshiwge kirisemiz.

Hám akceptor, hám donorlar payda bolǵan yarımótkizgishler ushın elektro neytrallıq shártı tómendegishe boladı:

$$n_o + n_a = P_o + n_d \quad (5.40)$$

Dáslep biz bir túr qosımtalı, mısalı, donor qosımtalı ($N_d \neq 0$, $N_a = 0$) yarımótkizgish jaǵdayın qarap shıǵayıq. Bunday yarımótkizgish ótkiziwsheńlik zonasındaǵı n_o elektronlar teris zaryadtı valent zonadaǵı p_o gewekler hámde elektronnan ajıralǵan P_d donor ionları oń zaryadı quraydı, yaǵnıy elektroneytrallıq shártı

$$n_o = p_o + p_d \quad (5.41)$$

yamasa

$$n_o = n_i^2 / n_o + p_d \quad (5.41a)$$

kórinisinde boladı. Bul teńleme (F/kT) ǵa salıstırmalı kub teńleme bolıp, onıń ulıwma sheshimi joq. Sonıń ushın (5.41) formulanı shegaralıq jaǵdaydaǵı sheshimlerin alıw hám analiz etiw maqsetke muwapıq boladı.

Tómen temperaturalarda (5.41) teńlemenıń sheshimi

Jeterlishe tómén temperaturada $E_d \ll E_g$ bolǵanlıǵı sebepli ótkiziwsheńlik zonasına donor atomlardan ótken elektronlar sanı oǵan valent zonadan ótken elektronlar sanınan (valent zonadaǵı gewekler sanınan) bir neshe márte kóp boladı, sol sebepli, $p_o \ll n_o$, P_d hám (5.41) formula ornına $n_o = p_d$ (5.42) dep jazıw múmkin. Eger n_o hám P_d tıǵızlıqlardıń joqarıda anıqlanǵan formulalardı (5.42) ge qoyıp, onı sheshsek, tómendegini tabamız:

$$\exp\left(\frac{F}{kT}\right) = \frac{1}{A} \left(\sqrt{1 + 8 \left(\frac{N_d}{N_c} \right) \exp\left(\frac{E_d}{kT}\right)} - 1 \right) \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) \quad (5.43)$$

bul formulanı logarifmlep, Fermi qáddi F tiń formulası alınadı.

Valent gewekler esapqa alınbağan bul tómén temperaturalar oblastın 2 bólimge ajıratıp tekseremiz. a) $8\left(\frac{N_d}{N_c}\right)\exp\left(\frac{E_d}{kT}\right) \gg 1$ teńsizlik orınlanganda aralıq $T=0$ den baslanadı, bunda N_d/N_c hám $\exp(E_d/kT)$ kóbeyiwshiler úlken mánislerge iye bolıwın bayqaw múmkin. Bul aralıq ushın (5.43) formula tómendegi kórinisti aladı:

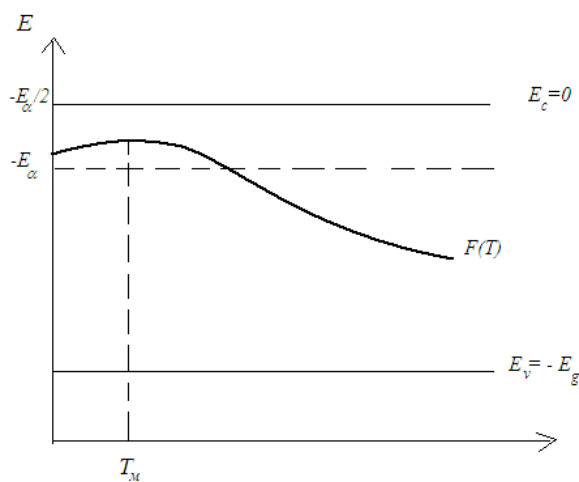
$$\exp\left(\frac{F}{kT}\right) \approx \sqrt{\frac{N_d}{2N_c}} \cdot \exp\left(-\frac{E_d}{2kT}\right) \quad (5.44)$$

Usıdan Fermi qáddi ushın tómendegi formula kelip shıǵadı:

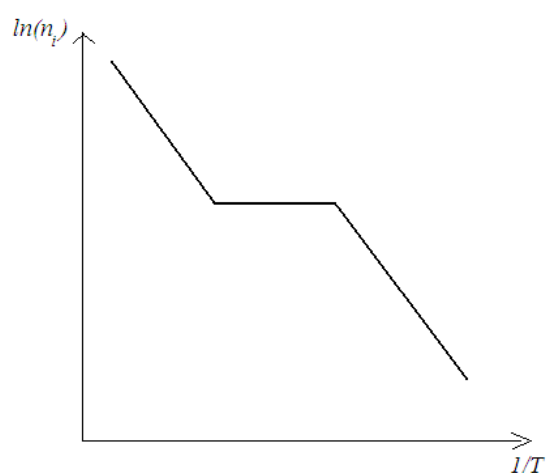
$$F = \left(\frac{kT}{2}\right) \ln\left(\frac{N_d}{2N_c}\right) - \frac{E_d}{2} \quad (5.45)$$

Bul formula (5.5 – súwret) tiykarında ótkiziwsheńlik zonasındıǵı elektronlar tıǵızlıǵın anıqlaw múmkin (5.6 – súwret):

$$n_o = \sqrt{N_d N_c} / 2 \cdot \exp\left(-\frac{E_d}{2kT}\right) \quad (5.46)$$



5.5 – súwret



5.6 – súwret

joqarıdaǵı (5.45) formulaǵa tiykarlanıp, $T=0K$ de Fermi qáddi $F(0)=-E_d/2$ jaǵdayda boladı, temperatura túsken sayın, dáslep $N_d/2N_c \gg 1$, yaǵnıy $\ln(N_d/2N_c) > 0$ bolǵanda Fermi qáddi joqarıǵa kóterile baslaydı, keyin N_c nıń $T^{3/2}$

sıyaqlı artıp barıwı aqıbetinde logarifmniń mánisi kemeyip baradı, nátiyjede F Fermi qáddi bazıbir $T=T_m$ temperaturada eń úlken mániske erisip, keyin tómeneley baslaydı: $N_d=2N_c$ bolǵanda, jáne $F=-E_d/2$ boladı, keyin $N_d<2N_c$ bolǵanında F tiń tómenelep qadaǵan zona ortasına jaqınlasıwı dawam etedi. Eger (5.46) formulanı analiz qılsaq ótkiziwsheńlik elektronlardıń n_0 tıǵızlıǵı temperaturanıń kórsetkishli funktsiyası bolıwı kórinip turıptı. Demek, n_0 tıǵızlıq T artıwı menen judá tez artıp baradı.

$$b) 8 \left(\frac{N_d}{N_c} \right) \cdot \exp \left(\frac{E_d}{kT} \right) \ll 1 \text{ teńsizlik orınlanatuǵın temperaturalar aralıǵında}$$

(5. 43) formula ápiwayı kóriniske keledi:

$$\exp \left(\frac{F}{kT} \right) = \frac{N_d}{N_c} \quad (5.47)$$

Bunı formulaǵa qoysaq

$$n_0 = N_d = \text{const} \quad (5.48)$$

nátiyje payda boladı.

Aqırǵı (5.47) hám (5.48) formulalardan tómendegi áhmiyetli juwmaq kelip shıǵadı. Berilgen temperaturalar shegarasında $kT > E_d$, barlıq donor atomlar birewden elektronın ótkiziwsheńlik zonasına berip, ózleri ionlar bolıp qaladı (qosımta tolıq ionlar), biraq valent zonadan ótkiziwsheńlik zonasına ótken elektronlardıń salıstırmaı sanı ádewir kem boladı. Demek, bul jaǵdayda ótkiziwsheńlik elektronları n_0 tıǵızlıǵı donor tıǵızlıǵına teń ($n_0=n_d$) turaqlı mániske iye boladı. Fermi qáddi F bul shegarada T artqan sayın tómenelewdi dawam etedi.

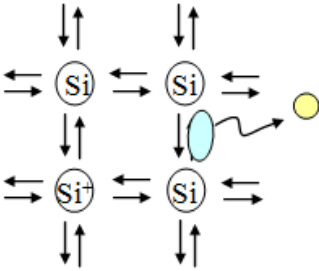
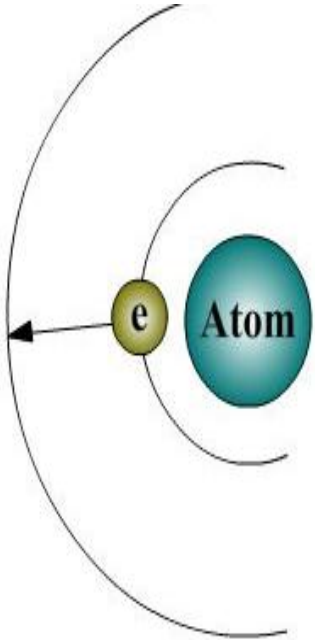
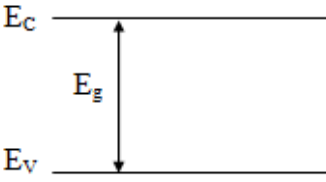
5.8-§. Yarımótkizgishlerdegi tok tasıwshılardıń tábiyatı

Yarımótkizgishlerde ximiyalıq baylanıs tiykarınan kovalent baylanıs bolǵanlıǵı ushın, barlıq valent elektronlar ximiyalıq baylanısta tolıq qatnasadı.

Demek, bunday materiallarda erkin elektronlar bolmaydı. Erkin elektronlar bolıwı ushın, ximiyalıq baylanısqa qatnasatuǵın valent elektronlar ximiyalıq baylanıstı úziwi hám óz atomınan uzaqlasıwı kerek. Bunıń ushın elektron belgili muǵdarda mine usı baylanıs energiyasın úziwge jetkilikli energiya alıwı kerek. Bul energiya jıllılıq yamasa jaqtılıq energiyası bolıwı múmkin. Júdá tómen temperaturalarda valent elektronlar erkin elektronlar halına ótiw itimallıǵı júdá kem bolǵanlıǵı ushın, yarımótkizgish materiallar júdá jaqsı dielektrik halına ótedi. Endi bunday materiallarda ótkiziwsheńlik bolıwı ushın kovalent baylanısqa qatnasıp atırǵan valent elektronlar erkin etiliwi tiyis. Bunday elektronlar erkin elektronlar halına ótedi, sebebi óz atomınan uzaqlasqan bul elektronlar basqa hesh qanday atomlar arqalı biriktirip alınıwı múmkin emes, sebebi olardıń barlıǵınıń sırtqı elektron qabıqları tolǵan. Demek, yarımótkizgishlerde valent elektronlardıń eki halatı bar bul kovalent baylanısqa qatnasqan baylanısqan halatı hám baylanıstan úzilgen erkin bolǵan halatı. Elektronlardıń baylanısqan halın valent zonada, erkin halın bolsa ótkiziwsheńlik zonasında dep qabıl qılınǵan. Baylanısqan valent elektronlardı erkin halına alıp shıǵıw ushın kerek bolǵan energiya yaǵnıy baylanıs energiyasın úziw ushın kerek bolǵan energiyanı qadaǵan etilgen zona keńligi dep ataydı. Haqıyqattan da yarımótkizgishtiń tiykargı atomları valent elektronları baylanısqan yamasa erkin halda boladı. Demek, berilgen energiya elektrondı erkin qılıwǵa jeterli bolmasa, elektron baylanısqan halında qaladı, yaǵnıy ol bunday energiyanı qabıl qılmaydı. Demek, $E < E_{bay} = E_g$ den kem bolsa, elektron óz halında qaladı. Sonıń ushın da valent zona menen ótkiziwsheńlik zonası arasında elektron jaylasıwı múmkin emes, sonıń ushın bul qadaǵan etilgen energiya zonası dep ataladı.

kr. Valent zona ru. Валентная зона	Absolyut nol temperaturada barlıq energiya halları elektronlar menen toltırılǵan ruxsat etilgen zonanıń joqarı shegarasına ayıladı. Yaǵnıy	Kremniydiń valent zonasınıń súwreti
---	--	-------------------------------------

en. Valence band	$T = 0\text{ K}$ temperaturada elektronlar atomğa baylanısqan boladı. Kristallda zonalar dúzilisine (strukturasına) qarap, valent zonalar, jeterlishe quramalı bolıwı múmkin. Kristall pánjerede $T = 0\text{ K}$ de barlıq valent elektronlar baylanısqan halatta valent zonada boladı:	
kr. ótkizgishlik zonası ru. Зона проводимост и en. Conduction band	Sırttan tásir ettirilgende mısalı, temperatura, jaqtılıq, elektr maydan hám b. elektronlar qabıl qılıwı múmkin bolğan, absolyut nol temperaturada bolsa elektronlarğa iye bolmaytuǵın ruxsat etilgen zonaǵa aytıladı. Kristall pánjerede $T > 0\text{ K}$ de belgili bir elektronlar baylanıs energiyasın jeńip erkin halına ótedi, yaǵnıy tok tasıwda qatnasadı. Bul halat ótkizgishlik zonası dep qabıl qılınğan.	Kremniydiń ótkiziwsheńlik zonası

		
kr. Qadağan etilgen zona ru. Запрещенная зона en. Forbidden band	Yarımótkizgishlerde barlıq valent elektronlar ximiyalıq baylanısa qatnasǵanlıǵı ushın $T = 0\text{ K}$ de erkin elektronlar bolmaydı. Berilgen jıllılıq yamasa jaqtılıq esabınan ximiyalıq baylanısta qatnasqan elektronǵa baz ıbir energiya berip erkin qılıw múmkin. Sonda bul elektron elektr toki ótkiziwde qatnasadı. Sonıń ushın qadağan etilgen zona degende hár qanday yarımótkizgish ximiyalıq baylanıstaǵı elektrondı azad qılıw ushın (yaǵniy baylanıs energiyasına teń energiya) kerek bolǵan energiyaǵa aytıladı hám E_g menen belgilenip, onıń mánisi eV larda ólshenedi. Sebebi elektronǵa E_g den kem energiya berilgende elektrondı erkin qılıp bolmaydı. Bul degen sóz elektron ya baylanısqa halatda (valent) yamasa erkin halatda boladı (ótkiziwsheńlik zona). Qadağan etilgen zona shaması	Baylanısqa elektrondı urıp shıǵarıw ushın kerek bolatuǵın energiya mánisi:  Elektron qanshelli atomǵa jaqın jaylasqa bolsa onı urıp shıǵarıwǵa sonshelli kóp energiya kerek boladı. 

	ximiyalıq baylanısta qatnasıp atırǵan valent elektronlardıń atomǵa qanday energiya menen baylanısqanlıǵına baylanıslı. Mısalı, IV topar elementleri barlıǵ ı birdey kristall strukturaǵa iye hám ximiyalıq baylanısqa iye bolsa da, olardıń E_g si hár túrli boladı. Valent E_g elektronlar ı $T = 300 K$ $C - 2s^2 2p^2 5,0 \text{ eV}$ $Si - 3s^2 3p^2 1,12 \text{ eV}$ $Ge - 4s^2 4p^2 0,66 \text{ eV}$	
--	--	--

Endi kovalent baylanıstı úzip ketken erkin elektron ornında oń zaryadlanǵan, baylanısı tolıq bolmaǵan atom qaladı. Endi bul atom ózine kovalent baylanıstı toltırıw ushın qońsı atomlardan elektron alıwı múmkin, demek, bayaǵı oń zaryadlanǵan ion óz ornınan basqa jerge jılıp qalǵan boladı. Demek, zaryad koshpekte, yaǵnıy elektr toki payda qılındı. Sonıń ushın yarımótkizgish materiallar tiykargı atomlar oń zaryadlanǵan hám kovalent baylanısı buzılǵan halattı biz “gewek” jańa túrdegi tok tasıwshı dep qabıl qılamız. Solay etip, yarımótkizgishlerde metallardan parqlı túrde 2 túrli tok tasıwshı – *elektron* hám *gewekler* eken. Sonıń ushın hám bunday materiallarda elektr ótkiziwsheńlik:

$$\sigma = en\mu_n + ep\mu_p, \quad (5.49)$$

n – elektronlar koncentraciyası, p – gewekler koncentraciyası, μ_n, μ_p – elektronlar hám geweklerdiń háreketsheńligi.

5.9-§. Fermi–Dirak bólistiriliwi

Fermi–Dirak bolistiriliwi bul-spinge iye bolǵan bóleksheler (elektron, gewek) ushın isletiledi. Bul bólistiriliw yarımótkizgishlerde elektronlardıń (geweklerdiń) energetik qáddiler boyınsha bólistiriliwin anıqlaw menen birge, hár qanday yarımótkizgishlerde Fermi qáddin anıqlaw hámde Fermi qáddi hám yarımótkizgishlerdiń tiykarǵı qásiyetleri arasındǵı baylanıstı kórsetedi. Bolistiriliwdi kóriwden aldın, Fermi qáddi ózi ne degen sorawǵa juwap bereyik. Fermi qáddi bul – metallarda $T = 0\text{ K}$ bolǵanda elektronlar menen bánt bolǵan sońǵı energetik qáddi. Bunnan sol kelip shıǵadı, Fermi qáddiniń birligi energiya menen ólshenedi eken. Demek, Fermi qáddisinen joqarıda jatırǵan qáddilerde elektronlar joq, tómendegi qáddiler bolsa elektronlar menen tolǵan boladı. Metallarda erkin elektronlar koncentraciyası ondaǵı 1 sm^{-3} atomlar sanına teń. Mısalı, *Au* di alatuǵın bolsaq altında 1 sm^{-3} da $5 \cdot 10^{22}$ erkin elektron bar. Endi bul elektronlar energetik qáddiler boyınsha qanday jaylasqan. Bunı biliw ushın aldın Pauli principin esapqa alıw kerek. Bul principke kóre hár qanday energetik qáddilerde maksimum qarama-qarsı spinge iye bolǵan 2 elektron jaylasıwı múmkin. Eger metallarda elektronlar koncentraciyası $n = 5 \cdot 10^{22}\text{ sm}^{-3}$ bolatuǵın bolsa, bul elektronlar jaylasıwı ushın, Pauli principine kóre $2,5 \cdot 10^{22}$ energetik qáddiler kerek boladı. Metallarda erkin elektronlar jaylasqan eń tómengi qáddi ótkiziwsheńlik zonasınıń baslanıwınan Fermi qáddine shekem bolǵan energiya $5 \div 10\text{ eV}$ átirapında boladı. Biz bunday ótkiziwsheńlik zonasındǵı elektron qáddiler arasındǵı energiyanı tapsaq $\Delta E = 10 / 2,5 \cdot 10^{22} = 4 \cdot 10^{-22}\text{ eV}$ ge teń. Bul sonday az energiya, sonıń ushın metallarda ótkiziwsheńlik zonasında elektron qáddiler úzliksiz jaylasqan dep qabıl qılınǵan. Biraq yarımótkizgishlerde erkin elektronlar sanı metallarǵa salıstırǵanda $10^{12} \div 10^{14}$ ese kem bolǵanlıǵı ushın, olarda Fermi qáddi túsiniǵı

hám elektronlar bolistiriliwi basqasha boladı. Fermi-Dirak bolistiriliwi tómendegi formula arqalı ańlatıladı.

$$f = \frac{1}{1 + g \exp\left(\frac{E-F}{kT}\right)}. \quad (5.60)$$

Bul jerde f –berilgen temperaturada (T) hám Fermi qáddi (F) anıq mániske iye bolǵan halatta hár qanday energetik qáddi – E niń elektronlar menen bánt bolǵan itimallıǵın kórsetedi. Berilgen energetik qáddiniń gewekler menen bánt bolıw itimallıǵı 1:

$$(1 - f) = \frac{1}{1 + g \exp\left(\frac{F-E}{kT}\right)}. \quad (5.61)$$

Bul jerde g –ajralıw koefficienti dep ataladı. Bul koefficient donor energetik qáddiler ushın 1/2 ge, akceptor energetik qáddiler ushın 2 ge teń. g nıń fizikalıq mánisi bul– donor kirispe atomların ionlaw ushın, tek anıq spinge iye elektrondı azat etiw kerek, biraq onı jáne neytral halına keliwi ushın oǵan 2 túrli spinge iye bolǵan elektronnıń qálegenin alıwı múmkin. Demek g – ionlaw hám atomdı neytrallaw ushın kerek bolǵan elektron spinlerdiń qatnasın kórsetedi. Yarımótkizgishlerde Fermi qáddin qanday anıqlaw múmkinligin kórsetuwden aldın, yarımótkizgish ótkiziwsheńlik zonasındaǵı elektronlar koncentraciyasın anıqlayıq. Bunıń ushın yarımótkizgish ótkiziwsheńlik zonasındaǵı elektronlar jaylasıwı múmkin bolǵan qáddiler tıǵızlıǵı degen túsinikti kiritemiz. Álbette ótkiziwsheńlik zonası parabola formasında bolǵanlıǵı ushın N_c –mánisi energiya $N(E)$ ge baylanıslı boladı. Endi yarımótkizgishtiń ótkiziwsheńlik zonasında bolǵan elektronlar koncentraciyasın tómendegishe anıqlaymız:

$$n = \int_{E_{co}}^E N_c(E) f \cdot dE = \int_{E_c}^{E_n} N(E) \cdot \frac{1}{1 + g \exp\left(\frac{E-F}{kT}\right)} dE. \quad (5.62)$$

Bul jerde E_{co} –ótkiziwsheńlik zonasınıń eń tómengi energiyasına sáykes energetik qáddi, E_n – bolsa ótkiziwsheńlik zonasınıń eń joqarı energiyaǵa sáykes keletuǵın energetik qáddi. Yarımótkizgishte erkin elektronlar koncentraciyası júdá kem bolǵanlıǵı hám ótkiziwsheńlik zonası qáddisindegi energetik qáddiler, ulıwma bánt bolmaǵanlıǵı

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2}, \quad (5.63)$$

ushın E_{co} nıń mánisi barlıq waqıt F den ádewir úlken boladı. Onda ótkiziwsheńlik zonasındaǵı elektronlar koncentraciyası tómendegige teń boladı:

$$n = N_c \cdot \exp \left(-\frac{E_c - F}{kT} \right), \quad (5.64)$$

tap sonday valent zonadaǵı gewekler koncentraciyası

$$p = N_v \cdot \exp \left(-\frac{F - E_v}{kT} \right). \quad (5.65)$$

Bunda:

$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2}, \quad N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2}, \quad (5.66)$$

N_v , N_c –valent hám ótkiziwsheńlik zonalarındaǵı energetik hallar tıǵızlıqları.

5.10-§. Elektr neytrallıq teńlemesi

Teń salmaqlıq halatında hár qanday yarımótkizgishte teris zaryadqa iye bolǵan bóleksheler (elektron, ionlasqan akceptor qosımta atomlar) koncentraciyası, oń zaryadlangan bóleksheler (gewek, ionlangan donor qosımta atomlar) koncentraciyasına teń boladı. Buǵan kóre, menshikli yarımótkizgishlerde elektronlardıń valent zonadan ótkiziwsheńlik zonasına ótiwi menen valent zonasında usıǵan sáykes gewekler payda boladı. Demek, menshikli yarımótkizgishler ushın neytrallıq teńlemesi:

$$n=p=n_i \quad (5.67)$$

n_i – menshikli zaryad tasıwshılar koncentraciyası.

Eger yarımótkizgishde donor qosımta atomları (N_d) bolatuğın bolsa hám olar tolıq ionlanğan bolsa, onda neytrallıq teńlemesi

$$n_i+n_d=p_a+N_d^+, \quad N_d=n_d, \quad n_i+n_d=n, \quad n=p+N_d^+ \quad (5.68)$$

Kirispe atomları tolıq ion halatına ótpegen halda tómendegishe boladı:

$$n = p + \frac{N_d}{1 + g \exp(-\frac{F-E_d}{kT})} \quad (5.69)$$

Eger qosımta atomları akceptor bolatuğın bolsa hám olar tolıq ionlasqan halatda bolsa tómendegige teń boladı:

$$n_i + N_a = p_i + p_a, \quad p_a = N_a, \quad p = n + N_a^- \quad (5.70)$$

Eger akceptor qosımta atomları tolıq ionlanbağan bolsa, bul jağdayda tómendegishe

$$n_i + \frac{N_a}{1 + g \exp(-\frac{E_a-F}{kT})} = p. \quad (5.71)$$

boladı. Bul jerde p – valent zonadağı barlıq gewekler koncentraciyası.

Ótkiziwsheńlik zonasındağı elektronlar koncentraciyasın hám valent zonadağı gewekler koncentraciyasın (5.69) hám (5.71) ańlatpalarınan alıp, olardı (5.67), (5.68), (5.70) teńliklerge qoyıp, bunday teńlemelerdi Fermi qáddi (F) ge qarata sheshsek, biz qarap atırğan yarımótkizgishlerdegi Fermi qáddin anıqlaymız. Fermi qáddin tuwrı anıqlaw júdá úlken áhmiyetke iye, sebebi biz F dıń mánisin biliw menen, yarımótkizgish qadağan etilgen zonasında barlıq energetik qáddilerdiń elektronlar menen bánt bolıw itimallıgın bilemiz. Bul bolsa

óz náwbetinde bunday energetik qáddiler yarımótkizgishlerdiń termikalıq, foto hám optikalıq qásiyetlerin basqarıw imkaniyatın beredi.

5.11-§. Menshikli yarımótkizgishler

Joqarıda keltirilgenindey, bunday materiallarda

$$n = p = n_i. \quad (5.72)$$

Bul teńlikke biz n hám p nıń (5.64), (5.65) ańlatpalardan paydalanǵan halda neytrallıq teńlemesin alamız:

$$N_c \cdot \exp\left(-\frac{E_c - F}{kT}\right) = N_v \cdot \exp\left(-\frac{F - E_v}{kT}\right). \quad (5.73)$$

Endi bul teńlemeden Fermi qáddiniń mánisin tabamız:

$$F = \frac{E_c - E_v}{2} + kT \cdot \ln \frac{N_v}{N_c}. \quad (5.74)$$

Eger $T = 0 \text{ K}$ bolǵanda,

$$F = \frac{E_c - E_v}{2} = \frac{E_g}{2}, \quad (5.75)$$

ańlatpaǵa teń boladı. Demek, menshikli yarımótkizgishlerde Fermi qáddi qadaǵan etilgen zona ortasında jatadı eken. Endi Fermi qáddiniń mánisin (5.75) ańlatpaǵa qoyıp, menshikli tok tasıwshılar koncentrაციyasın tabamız:

$$n_i^2 = np, \\ n_i = (N_c \cdot N_v)^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right). \quad (5.76)$$

Bul teńlik barlıq yarımótkizgishler ushın orınlı. Bul teńlik tok tasıwshılar koncentrაციyası qadaǵan etilgen zona keńligi asıp barıwı menen eksponencial

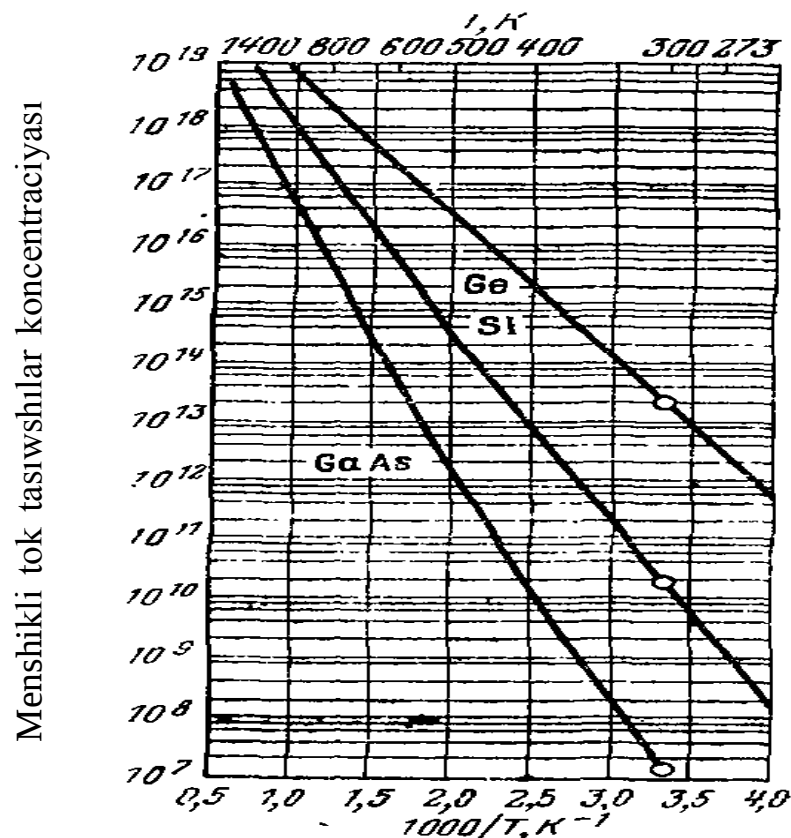
kemeyip barıwın hámde berilgen E_g mánisinde temperatura kóteriliwi menen n_i eksponencial nızam menen asıp barıwın kórsetedi. Tómendegi keste de E_g leri hár túrli bolğan yarımótkizgishlerde $T = 300\text{ K}$ de menshikli tok tasıwshılar koncentrasiyası keltirilgen:

5.6– keste. E_g ları hár túrli bolğan yarımótkizgishlerde $T = 300\text{ K}$ de menshikli tok tasıwshılar koncentrasiyası.

<i>Nº</i>	<i>Yarımótkizgish materialları</i>	n_i, sm^{-3}
1	Si	$1,5 \cdot 10^{10}$
2	Ge	$2,4 \cdot 10^{13}$
3	GaAs	$4,3 \cdot 10^{12}$
4	InAs	$1,6 \cdot 10^{15}$
5	InSb	$2,0 \cdot 10^{15}$
6	PbS	$7,1 \cdot 10^{14}$
7	PbTe	$4,0 \cdot 10^{15}$
8	PbSe	$6,2 \cdot 10^{15}$

5.7– keste. Bazıbir elementlerdiń menshikli ótkizgishligi.

<i>Material</i>	$\sigma, (\text{Om} \cdot \text{sm})^{-1} T=300\text{ K}$
Ge	$21 \cdot 10^{-3}$
Si	$3,7 \cdot 10^{-4}$
GaAs	10^{-8}
CdTe	$2 \cdot 10^{-10}$



5.7 – s úwret. *Ge, Si, GaAs* yarımótkizgish materiallarında menshikli tok tasıwshılar koncentraciyasınıń temperaturaǵa baylanıslılıq grafigi keltirilgen.

Jáne sonı da esapqa alıw kerek, yarımótkizgishlerde E_g niń mánisi turaqlı emes bálkim, temperatura kóteriliwi menen ózgeredi:

$$E_g = E_{g0}(1 - \alpha T). \quad (5.77)$$

Bunda E_{g0} – $T = 0 \text{ K}$ bolǵandaǵı qadaǵan etilgen zonanıń mánisi, α – E_g niń temperatura koefficienti. Demek, n_i diń temperaturaǵa baylanıslı ózgeriwin anıq esaplaw ushın (5.77) itibarǵa alıw kerek. Tómendegi kestede tiykarǵı yarımótkizgishler ushın α niń mánisi keltirilgen.

5.8 – keste. Yarımótkizgish materialları ushın α (temperatura koefficienti) niń mánisleri.

№	Yarımótkizgish materialı	$\alpha, 10^{-4} \text{ (eV/grad)}$
1	Si	7,021
2	Ge	4,561
3	6H-SiC	-0,3055
4	GaAs	8,871
5	InP	4,906
6	InAs	3,158

5.12-§. Qosımta atomlı yarımótkizgishlerde Fermi qáddi

Qosımta atomlar yarımótkizgish materiallardıń qadağan etilgen zonasında payda qılğan energetik qáddilerdiń energiyasına hám temperaturaǵa qarap tolıq ionlangan (donor qáddilerden elektronlar ótkiziwshenlik zonasına tolıq ótken, yamasa akceptor qáddiler valent zonadan elektronlardı tolıq ózine qabıl qılğan) halda yamasa bir bólegi ionlangan halda bolıwı múmkin. Bul hallarda joqarıda keltirilgendey neytrallıq teńlemesi hár túrli boladı. Eger materialǵa N_d koncentraciyası hám energetik qáddi energiyası E_d ge teń donor qosımta atomlar kiritilgen bolsa, bul jaǵdayda neytrallıq teńlemesi donor atomları tolıq ionlangan halda

$$n = n_0 + n_d, \quad n_d = N_d^+, \quad n_0 + n_d = N_d^+ + p, \quad (5.78)$$

bul halda valent zonadaǵı geweklar sanı, n hám N_d^+ ge salıstırǵanda júdá kem bolǵanı ushın (5.78) teńlemedegi p nı esapqa almasa da boladı, onda (5.78)

teńleme $n_0 + n_d = N_d^+$ endi n, N_d^+ mánislerdi (5.78) ge qoyıp teńlemeden Fermi qáddin tabamız:

$$n = N_d^+, \quad N_c e^{\frac{-(E_c - E)}{kT}} = \frac{N_d}{1 + \exp\left(\frac{-(E_c - E)}{kT}\right)} = N_d, \quad (5.79)$$

onda

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

Bul halda Fermi qáddiniń mánisi temperaturaǵa júdá baylanıslı bolıp qaladı. Tómen temperaturalarda tek mine bul shárt orınlangan halda

$$e^{\frac{E_d}{kT}} \gg \frac{2(2\pi m_n^* kT)^{3/2}}{N_d \cdot h^3}. \quad (5.80)$$

Fermi qáddiniń mánisi tómendegige teń boladı:

$$F = -\frac{E_d}{2} + kT \ln \left[\frac{N_d h^3}{2(2\pi m_n^* kT)^{3/2}} \right], \quad (5.81)$$

(5.80) ańlatpaǵa kóre júdá tómén temperaturalarda, yaǵnıy $T = 0 K$ ge teń bolǵanda,

$$F = \frac{E_d}{2} (n_0 + n_d = N_a + p) = \frac{E_c - E_d}{2}. \quad (5.82)$$

Demek, $T = 0 K$ de Fermi qáddi ótkiziwsheńlik zonasınıń baslanıw qáddi menen donor energetik qáddisiniń arasında jatadı eken. Bunda donor qáddiler elektronlar menen tolǵan boladı. Temperatura artıwı menen, $(2\pi m_n^* kT)^{3/2} < N_d h^3$ shárti orınlanıp turǵan halda (5.78) 2-aǵzası oń bólıp Fermi qáddi ótkiziwsheńlik zonası tárepge jılıydı, biraq temperatura artqan sayın yaǵnıy $(2\pi m_n^* kT)^{3/2} > N_d h^3$ baslanıwı menen 2-aǵza teris belgige iye boladı hám Fermi qáddi ástelik menen tómén tárepge, yaǵnıy qadaǵan etilgen zonanıń ortasına jılıydı. Joqarı temperaturalarda tek menshikli zaryad tasıwshılar

koncentraciyası $n_i \geq N_d$ donor koncentraciyası artıwı menen material jáne menshikli halına qaytadı hám Fermi qáddi jáne qadağan etilgen zona ortasında jaylasadı.

Fermi qáddiniń (5.81) mánisin (5.80) ge qoyıw arqalı donor qosımta atomları menen ligerlengen materiallar koncentraciyası donor qáddiler parametrlerine baylanısqan ańlatpasın tabayıq:

$$n = (2N_d)^{1/2} \frac{(2\pi m_n^* kT)^{3/4}}{h^{3/2}} e^{-\frac{E_d}{2kT}}. \quad (5.83)$$

Formuladan kórinip turıptı, elektronlar koncentraciyası ótkiziwsheńlik zonasında temperatura artıwı menen eksponencial artadı. Akceptor qosımta atomları kiritilgen gewekli yarımótkizgish materiallarında da tap joqarıdağı hallar boyınsha Fermi qáddi gewekler koncentraciyası akceptor qosımta atomlarına hám temperaturağa baylanıslılıǵın keltiriw múmkin. Bul halda neytrallıq teńlemesi $p + p_A = n + N_a^-$, biraq bunday materiallarda gewekler koncentraciyası elektronlar koncentraciyasınan júdá kóp bolǵanı ushın ($p_A, N_a \gg n$) (5.78) den n di esapqa almasa da boladı. Onda $p + p_A = N_a$, $p_A = N_a^-$, p , p_A^- ler mánislerin qóyıp teńlemeden Fermi qáddi mánisin tawıp, onı (5.78) ornına qóysaq bunday materiallarda gewekler koncentraciyası ańlatpasın tabamız:

$$p = (2N_a)^{1/2} \frac{2(2\pi m_p^* kT)^{3/4}}{h^{3/2}} e^{-\frac{E_d}{2kT}}. \quad (5.84)$$

Eger biz Xoll effekti járdeminde elektronlı hám gewekli yarımótkizgishlerde elektronlar hám gewekler koncentraciyasın hár túrli temperaturalarda anıqlasaq. (5.83) hám (5.84) ge kóre ańlatpanıń eki tárepini logarifmlesek tómendegishe ańlatpanı payda qılamız:

$$\ln n = \ln A - \frac{\Delta E_d}{2kT}, \text{ yamasa } \ln p = \ln \beta - \frac{\Delta E_d}{2kT}$$

$\beta \cdot \ln n$ yamasa $\ln p - \frac{1}{T}$ ge salıstırǵanda grafik sızsaq, alınǵan tuwrı sıızıq múyeshi

$$\frac{\Delta \ln n}{\Delta \left(\frac{1}{T}\right)} \cdot 2k = E_d \quad \text{yamasa} \quad \frac{\Delta \ln p}{\Delta \left(\frac{1}{T}\right)} \cdot 2k = E_a$$

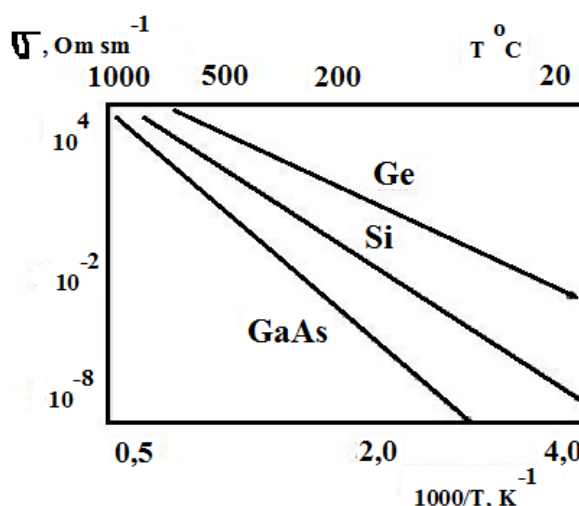
yaǵnıy biz donor hám akceptor energetik qáddileriniń qadaǵan etilgen zonalardaǵı energetik halın tabamız. Ádetde qolay bolıwı ushın $\ln n$ niń $1000/T$ qatnastan grafigi sızıladı hám onda

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

yamasa

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

Us ı grafikten $1000/T = 0$ mánisinde, tuwrı sıziq $\ln(n)$ kesiliskeń mánisi hám bul A yamasa B mánisine teń boladı.



5.8 - *súwret. Si, Ge hám GaAs yarımótkizgish materialları ushın ótkiziwshenliktiń temperaturaǵa baylanıslılıq grafigi.*

5.13-§. Donor hám akceptorlı qosımta atomlarına iye bolǵan yarımótkizgishler

Júdá kóp hallarda yarımótkizgishlerde bir waqıttıń ózinde hám donor hám akceptor qosımta atomları bar boladı. Biraq bul qosımta atomlar koncentraciyasınıń qatnasına qarap, eger $N_d \ll N_a$ bolsa material p –tip, eger

$N_d \gg N_a$ bolsa material n –tip, eger N_a hám N_d ler jeterli dárejede bir-birine jaqın bolǵanda bunday materiallardı kompensaciyalanǵan yarımótkizgishler dep ataladı. Sebebi, bunday materiallarda donor qosımta atomları payda etken erkin elektronlar akceptor qosımta atomları valent zonasında payda etgen erkin gewekler menen rekombinaciyalanıp, akceptor hám donor qosımta atomların ótkiziwsheńlikke tásirin kemeytiredi. Bunday yarımótkizgishlerde tómendegi jaǵdaylardı kórip shıǵamız.

1) Donor qosımta atomlar koncentrasiyası, akceptor qosımta atomlar koncentrasiyasına teń $N_d = N_a$ bunday halda donor qosımta atomları payda etken ótkiziwsheńlik zonasındaǵı barlıq elektronlar, akceptor kirispe atomları valent zonasında payda etken barlıq gewekler menen tolıq rekombinaciyalanadı, demek, ótkiziwsheńlik hám valent zonalarında kirispe atomlar payda etken elektron hám gewekler qalmaydı hám neytrallıq teńlemesi

$$n_i + N_a^- = p_i + N_d^+,$$

ge teń. Bunda $N_a^- = N_d^+$ bolǵanlıǵı ushın $n = p$ yaǵnıy material jáne menshikli yarımótkizgish halına qaytadı hám bunday materiallarda Fermi qáddi

$$F = \frac{\Delta E_g}{2} + kT \ln \frac{N_v}{N_c}.$$

Bunday yarımótkizgishler tolıq kompensaciyalanǵan yarımótkizgish boladı, biraq ol jáne menshikli yarımótkizgish halına ótken bolsa, hám onıń ótkizgishligi menshikli yarımótkizgish ótkizgishliginen kem boladı. Buǵan sebep tolıq ionlasǵan donor hám akceptor qosımta atomlar elektronlar hám gewekler ushın kirispe shashıraw orayı bolǵanlıǵı ushın olardıń háreketshenligi kemeyedi. N_a^- hám N_d^+ qansha kóp bolsa bunday parıq jeterli dárejede sezilerli boladı. Ádette menshikli yarımótkizgish materiallar alıw texnologiyalıq tárepten júdá quramalı

hám qımbatqa túsedi. Joqarıda kórsetilgendey bunday materiallardı tolıq kompensaciya qılıw jolı menen alıw múmkin eken.

2) Eger $N_a > N_d$ bolǵanda barlıq donor qosımta atomları tólıq ionlangan boladı. Material p –tip gewekli halda bólıp, bunda neytrallıq teńlemesi

$$p_a + p + N_d^+ = N_a^- + n, \quad n \ll p, \quad N_d^+, \quad N_a^- \text{ hám } N_d^+ = N_d,$$

esapqa alsaq, onda $p_a + p + N_d^+ = N_a^-$, $p_a + p = N_a^- - N_d^+$, p , N_a lerdiń mánisleri tiykarında teńlemeni sheshiw hám ondaǵı Fermi qáddi mánisin hámde gewekler koncentraciyasınıń temperatura hám N_d hámde N_a ge baylanıslılıǵın alıw múmkin.

3) Eger $N_a < N_d$ bunda barlıq akceptor atomları tolıq ionlangan $N_a^- = N_a$ boladı hám neytrallıq teńlemesi $p \ll n$, N_d , N_a lerdi esapqa alsaq $n_d + n + N_a^- = N_d^+$. Bul teńlemeni hám N_d^+ , n mánisine qoyıp, Fermi qáddin hám materiallarda elektron koncentraciyasın N_d , N_a hám T ge baylanıslılıǵın kóriw múmkin.

5.14-§. Birden kóp energetik qáddi payda etiwshi qosımta atomları bar bolǵan yarımótkizgishler

Bazı qosımta atomları yarımótkizgishtiń qadaǵan etilgen zonasında birden artıq energetik qáddiler payda qılıwı múmkin. 1sal 1, Zn , Cd atomları Si de eki akceptor energetik qáddi Se , S , Te ler bolsa 2 donor energetik qáddilerin Cu , Ge kristalında hátteki úsh energetik qáddi payda qıladı. Eki akceptor yamasa donor energetik qáddige iye yarımótkizgishler ushın neytrallıq teńlemesi tómendegishe:

$$n + N_a^- + N_a^{--} = p, \quad p + N_d^+ + N_d^{++} = n. \quad (5.84)$$

$$N_a^- = \frac{N_a}{1 + g \cdot \exp\left(\frac{E_{a1} - F}{kT}\right)}, \quad N_a^{--} = \frac{N_a}{1 + g \cdot \exp\left(-\frac{E_{a2} - F}{kT}\right)}. \quad (5.85)$$

$$N_d^+ = \frac{N_d}{1 + g \cdot \exp\left(\frac{F - E_{d1}}{kT}\right)}, \quad N_d^{++} = \frac{N_d}{1 + g \cdot \exp\left(\frac{F - E_{d2}}{kT}\right)}. \quad (5.86)$$

Bul jerde N_a , N_d – kiritilgen qosımta atomları koncentraciyası, E_{a1} , E_{a2} , E_{d1} , E_{d2} – qosımta atomlar payda etken birinshi hám ekinshi energetik qáddiler energiyası. Bunday hallarda neytrallıq teńlemesi úshinshi dárejeli teńleme bólıp, olardı sheshiw quramalı, bunda materialdagı tiykarǵı tok tasıwshılar koncentraciyasın bilgen halda, qosımta atomlar energetik qáddileriniń Fermi qáddine salıstırǵanda jaylasıwına qarap, Fermi-Dirak bolistiriliwinde bul qáddilerdi qánshellı elektronlar menen bánt yamasa bánt emesligin tabıwımız hám olardıń ótkiziwshenlikke tásinin anıqlawımız múmkin.

Demek, Fermi-Dirak bolistiriliwi yarımótkizgishlerde qóllanılıwdan maqset, tok tasıwshılar koncentraciyasınıń yarımótkizgish materiallardıń tiykarǵı fundamental parametrleri E_g , N_c , N_v hám qosımta atomlar tiykarǵı parametrleri N_a , N_d , E_a , E_d ler hámde temperatura T menen baylanıs funkciyasın anıqlawdan ibarat. Nátiyjede tómendegi máǵlıwmatlardı alıw múmkin;

1) menshikli zaryad tasıwshılardıń temperaturaǵa baylanıslılıq grafiginde E_g ni anıqlaw hám bul arqalı bizge belgisiz bolǵan yarımótkizgishlerdiń qanday material ekenligin biliw,

2) $n(T)$ yamasa $p(T)$ grafiginde yarımótkizgishtiń qadaǵan etilgen zonasındaǵı bar bolǵan donor yamasa akceptor qáddileriniń energetik halı hám bunday qáddilerdi payda etken qosımta atomlar koncentraciyasın anıqlaw.

V BAP qa tiyisli sorawlar:

1. Fermi qáddi degenimiz ne hám onıń fizikalıq mánisi qanday?
2. n , p –menshikli yarımótkizgishlerde Fermi qáddi qanday jaylasqan?

3. n hám p –tipli yarımótkizgishlerde temperatura artıwı menen Fermi qáddi qanday ózgeredi?
4. $T = 0\text{ K}$ temperaturada n –tipli yarımótkizgishte Fermi qáddi halın kórsetiń?
5. Fermi – Dirak bólistiriliwiniń fizikalıq mánisi qanday?
6. Qadağan etilgen zonada energetik qáddi elektronlardan bos bolıwı ushın ol Fermi qáddine salıstırǵanda qanday jaylasqan bolıwı kerek?
7. Yarımótkizgishlerde ótkiziwsheńlik zonasında elektronlar koncentraciyası Fermi qáddine salıstırǵanda qanday baylanısqan?
8. Elektr neytrallıq teńlemesi qanday hám onıń fizikalıq mánisi?
9. Massalardıń qozǵalıstaǵı nızamı qanday?

VI BAP

Yarımótkizgishlerdegi fotoelektrik hádiyseler

6.1-§ Fotoótkizgishlik

Fotowótkizgishlik bul– yarımótkizgishlerdiń oǵan túsip atırǵan jaqtılıq tásirinde ótkizgishliginiń ózgeriwine aytıladı. Bunı tómendegi sxema arqalı tolıq sáwlelendiriw múmkin. Bul sxema boyınsha jaqtılıq túspesten aldınǵı tok I_0 di berilgen anıq kernew hám temperaturada anıqlaymız. Bunda álbette jaqtılıq tásirinde yarımótkizgish temperaturası ózgermewi kerek. Endi yarımótkizgish jaqtırılǵan waqıttaǵı I_F di anıqlaymız. Bul toklardıń qatnası $S = I_F/I_0$ – yarımótkizgishdiń fotosezgirligin ańlatadı. Ádetde S diń mánisi yarımótkizgishler tábiyatı, temperaturaǵa, jaqtılıq intensivligi hám tolqın uzınlıǵına baylanıslı hámde olardı optimal tańlap alınǵanda S diń mánisi júdá keń intervalda ózgeriwı múmkin. Bulardı qarap shıǵıwdan aldın fotoótkizgishlik tábiyatın kórip shıǵayıq. Om nızamına muwapıq yarımótkizgishten ótip atırǵan tok kúshiniń mánisi, salıstırmalı ótkizgishlik menen elektr maydan kernewliliginiń kóbeymesine teń:

$$J = \sigma \cdot E, \quad (6.1)$$

yamasa

$$J = en\mu \cdot E. \quad (6.2)$$

Eger bunda E ózgermes mániske iye bolsa, jaqtılıq tásirinde shıńjırdan ótip atırǵan toktıń ózgeriwi álbette zaryad tasıwshılar koncentraciyası n hám olardıń háreketshılıǵı μ ge baylanisli bolıp qaladı. Onshellı joqarı bolmaǵan jaqtılıq intensivliginde μ dıń ózgeriwin esapqa almasa hám boladı. Bunnan sol kelip shıǵadı, jaqtılıq tásir etkende zaryad tasıwshılar yarımótkizgishde elektron hám gewekler koncentraciyası ózgeredi eken. Eger jaqtılıq bolmaǵan waqıttaǵı elektronlar hám gewekler koncentraciyası n_0, p_0 bolsa, jaqtılıq túskende olardıń mánisi n_1, p_1 boladı:

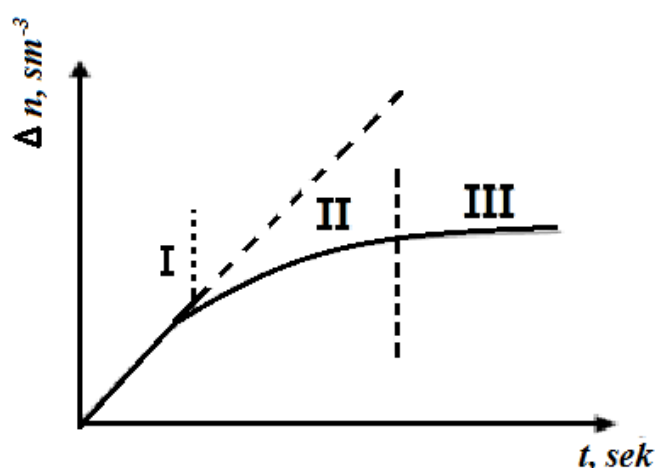
$$\Delta n = n_1 - n_0, \quad \Delta p = p_1 - p_0. \quad (6.3)$$

Δp — jaqtılıq nátiyjesinde payda bolǵan elektron hám gewekler koncentraciyası. Eger túsip atırǵan foton energiyası $h\nu$, yarımótkizgishtiń qadaǵan etilgen zona keńligine salıstırǵanda $h\nu \geq E_g$ bolǵanda elektron valent zonadan ótkizgishlik zonasına ótedi hám kirispe erkin elektronlar hámde gewekler payda etedi. Bunday qubılıs fotogeneraciya qubılısı dep ataladı. Fotogeneraciya qubılısında payda bolǵan zaryad tasıwshılar koncentraciyası:

$$\Delta n = \Delta p = I k \beta t, \quad (6.4)$$

ge teń. Bul jerde I — jaqtılıq intensivligi, yaǵnıy 1 sm^2 betke bir sekuntta túsip atırǵan fotonlar sanı, k — yarımótkizgishtiń jaqtılıqtı jutılıw koefficienti, sebebi túsip atırǵan fotonlardıń tek jutılǵan bólegi, fotogeneraciya hádiyesine alıp keledi. Ólshem birliǵı $[sm^{-1}] k = 1/\Delta x$ — bul jerde yarımótkizgish

materialının sonday qalınlığı, jaqtılıq usı qalınlıqtan ótkende, onıń intensivligin $2,72$ yaǵnıy e ese kemeyttiredi. β –kvant shıǵıw koefficienti, bul–bir foton jutılǵanda payda bolıwı múmkin bolǵan elektron – gewek juplıǵı. Ádette $h\nu = (1 \div 3)E_g$ bolǵanda $\beta = 1$ ge teń boladı. t – jaqtılandırılıw waqtı. Δn –jaqtılandırılıw waqtına tuwrı proporcional ráwishte artıp baradı. Buǵan muwapıq biz qanshelli kóp waqt jaqtılandırısaq, Δn sonshelli asadı. Endi tájiriye nátiyjelerin hám tómendegi súwrette kóreyik:



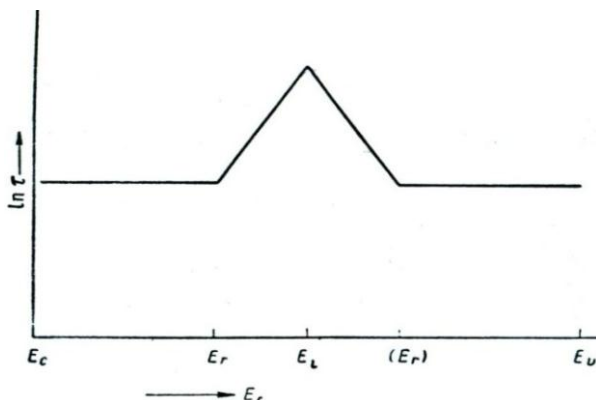
6.1 – súwret. Fotoótkizgishlik.

Kórinip turǵanıday, tájiriye nátiyjelerine tiykarlangan teoriyalıq nátiyjelerden túpten parıq qıladı. Biz bunda $\Delta n(t)$ ni 3 zonaǵa bóliwimiz múmkin. 1– zonada, yaǵnıy jaqtılandırılıw waqtı júdá kem bolǵanda, teoriyalıq hám tájiriye nátiyjeleri bir – birine mas túsedı. 2 – zonada tájiriye nátiyjeleri teoriyalıq alınǵan mánislerden ádewir kem hám $\Delta n(t)$ baylanısı tuwrı sıızıqlı emes, bálkim ádewir áste ósip atırǵanın kóremiz. 3 – zonada Δn mánisi ulıwma jaqtılandırılıw waqtına baylanıslı bolmay birdey turaqlı mániske iye boladı.

6.2-§ Zaryad tasıwshılardıń jasaw waqtı

Tájiriye nátiyjelerinen sol kelip shıǵadı, fotogeneraciya nátiyjesinde payda bolıp atırǵan erkin elektronlar ótkizgishlik zonasında barlıq waqt fotogeneraciya bolsa da ózgermeydi.

Demek, payda bolıp atırǵan elektronlar hám gewekler joq bolıp ketedi. Fotogeneraciyanı hár bir waqıt birliginde qansha elektron payda bolıp atırǵan bolsa, sonshası joq bolıp ketiwi menen túsindiriw múmkin. Kem waqıt jaqtırılǵanda payda bolǵan erkin elektron hám gewekler (on zaryadlangan hám bir baylanısı úzilgen yarımótkizgishti quraǵan tiykargı atom. Mısalı, kremniyde Si^+) sanı hám kóbi úzilgen on zaryadlangan atomnıń electron menen ushrasıp, onı ózine



6.2 – s úwret. Zaryad tasıwshılardıń jasaw waqtı.

tartıp baylanıstı tolıq tiklew itimallığı júdá kem boladı. Endi waqıt ótiwi menen elektron hám gewekler sanı artıp barıwı nátiyjesinde, olardıń ushırasıw itimallığı artıp baradı. Bul degen sóz, endi erkin elektron gewek penen ushrasıp, jáne baylanısqa aylanadı, yaǵnıy erkin elektron hám, gewek hám joq boladı. Jaqtılandırılıw waqtı jeterlishe bolǵanda, yaǵnıy erkin elektronlar hám gewekler sanı jeterli dárejege jetgende, erkin elektronlar hám geweklerdiń ushırasıw itimallığı olardıń payda bolıw tezligine teń bolıp qaladı, nátiyjede Δn mánisi jaqtılandırılıw waqtına baylanıslı bolmay qaladı. Fotogeneraciya nátiyjesinde payda bolıp atırǵan erkin elektron hám gewekler menen óz - ara ushırasıp joq bolıp ketiwi – *rekombinaciya qubılısı* dep ataladı. Demek, fotogeneraciya menen rekombinaciya qubılısı barlıq waqıt boladı eken. Endi soraw payda boladı, erkin elektron erkin gewek penen ushırasqanǵa shekem qansha waqıt ótedi? Buni biz elektron hám geweklerdiń jasaw waqtı dep ataymız.

Elektronlardıń ótkizgishlik zonasında bolıw waqtı bul – onıń jasaw waqtı, geweklerdiń valent zonasında bolıw waqtı hám bul onıń jasaw waqtı boladı eken. Biz bul jasaw waqtların τ_n (elektron ushın) hám τ_p (gewek ushın) dep belgilep alsaq, onda (6.4) ańlatpa ornına jazıw múmkin

$$\Delta n = Ik\beta\tau_n, \quad \Delta p = Ik\beta\tau_p, \quad (6.5)$$

hám fotoótkizgishlik mánisi onda

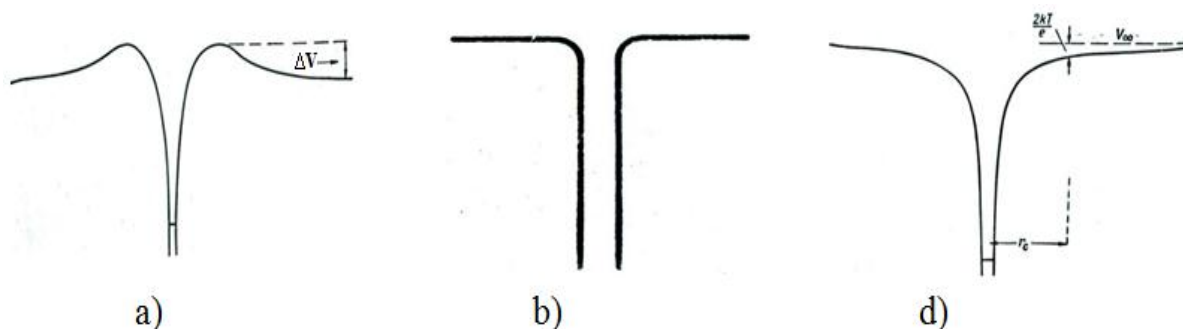
$$\Delta\sigma = \sigma_F - \sigma_O = Ik\beta e(\mu_n \cdot \tau_n + \mu_p \cdot \tau_p), \quad (6.6)$$

(6.6) – ańlatpadan kórinip turıptı, eger berilgen jaqtılıq intensivliginde ($I = const$) berilgen yarımótkizgish ushın k hám β mánisi turaqlı bolǵanı ushın fotoótkizgishlik mánisi tiykarınan τ_n hám τ_p menen anıqlanadı eken. Ádetde zaryad tasıwshılardıń jasaw waqtı yarımótkizgish materiallarında júdá keń intervalda ózgeriwi múmkin $\tau = 10^{-1} \div 10^{-11}$ s. Demek, τ nı basqarıw jolı menen fotoótkizgishlikti hátteki 10^9 ese kóbeytiw múmkin.

6.3-§ Jutıw beti

Elektrondı ótkizgishlik zonasınan betine tartıp úslap qalatuǵın keyin onıń gewek penen ushrasıp rekombinaciya bolıwına imkaniyat beretuǵın oraylar – defektler barlıq waqt bar. Endi usınday oraylardıń elektrondı ózine tartıp, jutıp alıwı usı defekttiń elektrondı jutıw beti (S) ke baylanıslı boladı. Bunday defektти ádette shar dep qabıl qılsaq, usı shardı ortadan bólgende bet dep qaraw múmkin. Bunnan kelip shıqqan halda, hár bir oraydıń ózine tán elektron (S_n) hám gewekti jutıw betleri (S_p) ler bar eken. Eger endi biz qarap atırǵan oray oń zaryadlangan bolsa, onda oray elektrondı tartıw kúshi esabınan tek usı bet boyınsha emes,

báلكim, bet qaptalıńan ótip atırǵan elektrondı hám jutıwı – tartıp alıwı múmkin. Eger oray eki ese oń zaryadlangan bolsa, onıń elektrongá tásir shegarası jánede keńeyedi. Bul jaǵdayda ol óz betindegi ádewir uzaqta bolǵan elektrondı da tartıp alıwı múmkin. Endi oń zaryadlangan oraydıń gewekti jutıw beti yamasa tartıp alıw shegarasın kórsek. Onda gewek hám oń zaryadqa iye bolǵanı ushın oray hám gewek ortasındaǵı óz – ara iyterisiw kúshleri nátiyjesinde jutıw beti kemeyedi. Eger oray eki ese oń zaryadlangan bolsa, álbette iyteriw kúshleri jánede artqanlıǵı sebepli oraydıń jutıw beti jánede kemeyedi. Tap sonday, oray bir yamasa eki ese teris zaryadǵa iye bolsa, onda bunday oraydıń elektrondı jutıw beti kemeyedi, gewekti jutıw beti bolsa artadı. Bulardan sol nársе kelip shıǵadı, jutıw beti bul usı defekt orayınıń óz átirapında payda etken potencialdı kórsetedi. Tóմende jutıw betleriniń olardıń zaryadlanganlıǵına qarap ózgeriwin xarakterlewshi súwret keltirilgen:



6.3 – súwret. Tok tasıwshılardıń jutıw betleri: a) teris, b) neytral, d) oń.

Bunnan kelip shıqqan halda hár bir oraydıń ózine tán elektron (S_n) hám gewektiń (S_p) jutıw betleri bar eken. Demek, zaryad tasıwshılardıń jasaw waqtı onı jutıp tartıp alatuǵın defektler mánisi menen anıqlanadı. Ádette defektlerdi jutıw beti $S = 10^{-13} \div 10^{-21} \text{ sm}^2$ aralıqta ózgeredi. Demek, biz τ_n hám τ_p nı kiritilip atırǵan defektler koncentraciyası menen emes, báلكim olardıń jutıw beti S ti basqarıw jolı menen júdá úlken aralıqta basqarıwımız múmkin, bul degen sóz

fotoótkizgishlikti de anıqlaytuǵın tiykarǵı parameter, bul defektler - jutıw beti eken. Buǵan kóre jasaw waqtı mánislerin tómendegishe jazıw múmkin:

$$\tau_n = \frac{1}{N_1 \cdot V \cdot S_n}, \quad \tau_p = \frac{1}{N_2 \cdot V \cdot S_p}, \quad (6.7)$$

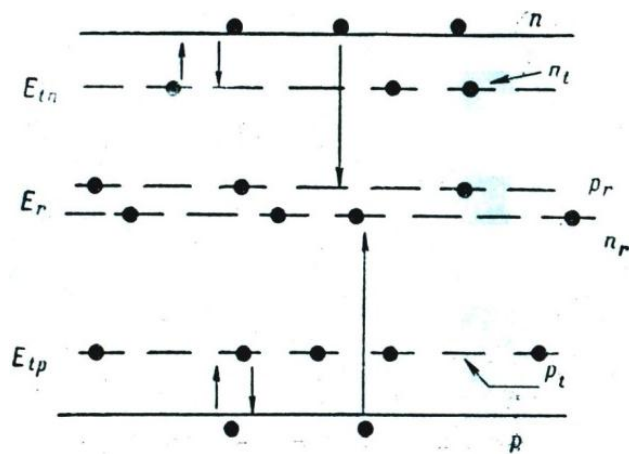
N_1, N_2 –elektronlar hám geweklerdi jutıwshı defektler koncentraciyası,
 V – elektronnıń jıllılıq tezligi,

$$V = \sqrt{\frac{2kT}{m}}. \quad (6.8)$$

$T = 300^\circ\text{C}$, $V = 10^7 \text{ sm/s}$, S_n , S_p –oraydıń elektron hám gewekti jutıw beti. Bunnan sol kelip shıǵadı, hár qanday oray ushın elektron hám gewekti jutıw beti birdey bolıw itimallıǵınan shette, sonıń ushın elektron hám geweklerdiń jasaw waqtı da birdey bólmaydı. Yarımótkizgish kóleminde bar bolǵan defektler tábiyatına sáykes halda rekombinaciya qubılısı hám hár túrli boladı.

6.4-§ Rekombinacion hám fotosezgirlikti asırıwshı oraylar

Belgili, kristall pánjeredegi defektler óz tábiyatına kóre yarımótkizgishtiń qadaǵan etilgen zonasında hár túrli energetik qáddiler payda etedi. Bul energetik qáddiler aktivaciyası yaǵnıy ótkizgishlik hám valent zonalarına jaqın hámde uzaǵıraq jaylasqanlıǵına qarap, zaryad tasıwshılardıń jasaw waqtına hár túrli tásir kórsetedi. Tómendegi 6.4-súwrette úsh túrli aktivaciya energiyaǵa iye bolǵan yarımótkizgish keltirilgen. Súwrette energetik qáddiler ótkizgishlik hám valent zonalarına júdá jaqın jaylasqan.

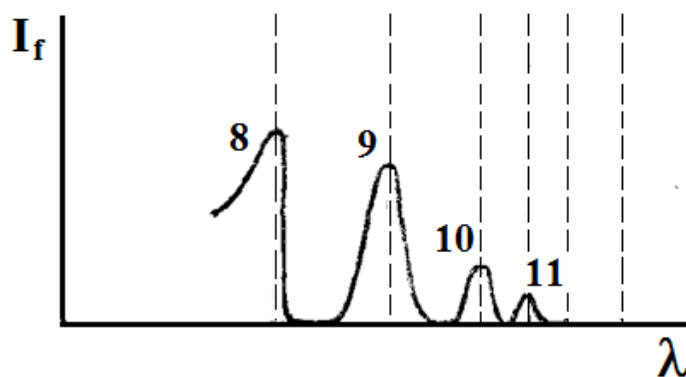


6.4 – súwret. *Úsh túrli aktivaciya energiyasına iye bolǵan yarımótkizgish.*

Sonıń ushın olar ótkizgishlik zonasındaǵı elektronlar ózlerine tartıp, jutıp alǵanı menen olarda elektronlar jıllılıq energiyası kT esabınan jáne qaytıp aldındı halatına ótiwi hám bul qubılıs barlıq waqıt júz berip turıwı múmkin. Tap usınday valent zonası jaqınında jaylasqan qáddilerden valent zonasındaǵı gewekler jutılıp jáne qaytıp óz halatına keliwi múmkin.

Demek, bunday hallarda rekombinaciya qubılısı bolmaydı. Sebebi, elektron gewek penen ushrasıp olar joq bolıp ketpeydi. Bunday energetik qáddiler jabıstırıwshı energetik qáddiler dep ataladı. Eger energetik qáddiler qadaǵan etilgen zonanıń ortalarında jaylasqan bolsa, olar ótkizgishlik zonasınan jutıp alǵan elektronlar endi jáne óz zonasına qaytıp shıǵıw itimallıǵı júdá kem boladı, sebebi olardıń aktivaciya energiyası kT júdá úlken bolǵanı ushın. Bunday hallarda olar elektronlar menen bánt hám bos bolıw itimallıǵına qarap, olar jutıp alǵan elektronlar endi valent zonasındaǵı gewekler menen ushrasıp rekombinaciya boladı. Bunda tiykarǵı itibar sonday boladı, usı energetik qáddini payda etken oray defekttiń elektron hám geweklerdi jutıw beti qatnasına qarap zaryad tasıwshılardıń jasaw waqtı anıqlanadı. Bunnan sonday juwmaq shıǵarıw múmkin, eger qandayda bir energetikalıq qáddiden elektrondı ótkizgishlik zonasına shıǵarıw itimallıǵı onıń usı qáddige jutıw itimallıǵınan úlken bolsa, bunday energetik qáddiler jabıstırıwshı qáddilerge, eger keri bolsa, bunday qáddiler rekombinacion qáddiler dep ataladı. Energetik qáddilerdiń ótkizgishlik zonasınan

yamasa valent zonasınan qadağan etilgen zona ortasına jılıwı olardıń rekombinacion oraylarına aylanıwı itimallıǵı artadı hám qadağan etilgen zona ortalarındaǵı defektler payda qılǵan energetik qáddiler tek rekombinacion qáddiler bolıp xizmet qıladı. Tómendegi 4.5-súwrette jabıstırıwshı energetik qáddileri bolǵan hám olarsız tek rekombinaciya qáddileri bar bolǵan yarımótkizgish materialların birdey jaqtılıq impulsı menen jaqtılandırǵandaǵı fototoktıń turǵın halına ótiwi impuls óshirilgende fototoktıń kemeyiwı relaksaciyası kórsetilgen. Kórinip turıptı, fototoktıń ósiwı hám kemeyiwı qubılısı berilgen. Bunday relaksaciya sızıqlarınan zaryad tasıwshılar jasaw waqtın anıqlaw múmkin.



6.5 – *súwret*. Fototoktıń ósiwı hám kemeyiwı qubılısı.

Ádetde zaryad tasıwshılar jasaw waqtı jaqtılıq sóngeninen keyin stacionar fototok mánisiniń 50% qaytıwı ushın kerek bolǵan waqıtqa teń dep qabıl qılınǵan. Eger yarımótkizgishge eki eseli ionlasıw múmkin bolǵan kirispe atomları kiritilgen bolsa, mısalı, donor koncentraciyası N_a bolǵan kremniyge eki energetik qáddi payda qılatuǵın akceptor Zn diń atomları kitirilse hám $N_a/2 \leq 2N_d$ orınlanganda Zn atomlarınıń tiykargı bólegi Zn^{-} halında boladı. Endi bunday oray yaǵnıy Zn^{-} geweklerdi jutıw beti S_p^{-} júdá úlken boladı. Biraq onıń Zn^{-} elektrondı jutıw beti S_p bunda júdá kishkene boladı, $S_n^{-} \ll S_p$. Bunday halda elektronlardıń jasaw waqtı birden artadı, geweklerdiki bolsa

kemeyedi. Demek, biz jasaw waqtı ádewir kishkene bolǵan elektronnıń jasaw waqtın asırıw esabınan fotoótkizgishlikti soǵan sáykes asıramız. Mısal ushın, Zn atomı kiritilgenge shekem $\tau_n \sim 10^{-7} \text{ s}$, $\tau_p \sim 10^{-7} \text{ s}$ bolǵan bolsa, kiritilgenden soń $S_p^{--} \sim 10^{-13} \text{ sm}^2$, $S_n^- \sim 10^{-20} \text{ sm}^2$ boladı. Bul halda fotoótkizgishlik

$$\Delta\sigma_o = Ik\beta e(\mu_n\tau_{n_o} + \mu_p\tau_{p_o}), \quad (6.9)$$

$$\Delta\sigma_1 = Ik\beta e(\mu_n\tau_{n_1} + \mu_p\tau_{p_1}), \quad (6.10)$$

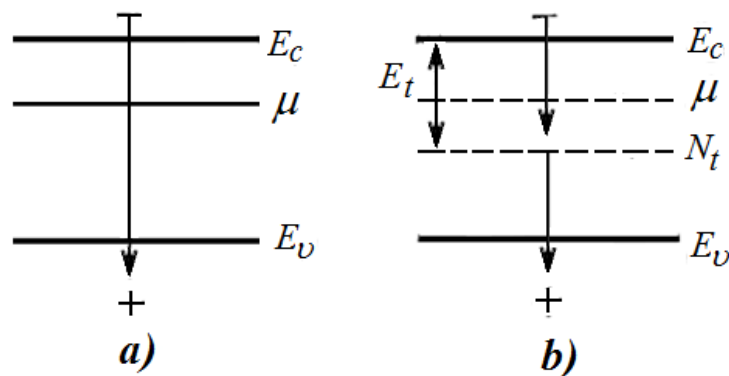
$$\frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_o} = 10^7,$$

ge teń boladı.

Demek, biz Zn atomın málim muǵdarda $n - Si$ ge kiritiw jolı menen onıń sezgirliǵın 10^7 ge asırǵan bolamız. Sonıń ushın Zn^- ge sáykes kelgen energetik qáddi fotosezgirlikti asırıwshı qáddi dep ataladı. Tap sonday p –tipli Si ge $N_a \geq N_d$ kiritiw jolı menen geweklerdiń jasaw waqtın asırıw múmkin.

6.5-§ Rekombinaciya túrleri

Yarımótkizgishlerde rekombinaciya elektron ótiwge qarap eki túrge – zonalar aralıq yaǵnıy elektronnıń ótkizgishlik zonasınan valent zonadaǵı gewek penen tuwrıdan tuwrı bolatuǵın rekombinaciya (6.6, a-súwret) hámde elektron gewek penen rekombinaciya bolıwınan aldın bir rekombinaciya orayına jutılıwı onnan soń usı oray arqalı valent zonaǵa túsip gewek penen rekombinaciyalasıw qúbılıslarına bólinedi (6.6, b-súwret).



6.6 – súwret. Rekombinaciya túrleri: a) elektronnıń ótkizgishlik zonasınan valent zonadağı gewek penen tuwrıdan tuwrı bolatuǵın rekombinaciya, b) electron, gewek penen rekombinaciya bolıwınan aldın bir rekombinaciya orayına jutılıwı, onnan soń usı oray arqalı valent zonaǵa túsip gewek penen rekombinaciyalanadı.

I – túrdegi rekombinaciya tiykarınan, tuwrı zonalı yarımótkizgishlerde (*GaAs*, *ZnAs*) júz beredi. II – túrdegi rekombinaciya tuwrı emes zonaǵa iye bolǵan (*Pn*, *Cu*) yarımótkizgish materiallarında júz beredi. I - túrdegi rekombinaciya elektron tuwrı valent zonaǵa túsip, gewek penen rekombinaciya bolǵanı ushın bunda elektron $E_c - E_v = E_g$ ge teń energiya joǵaltadı. Bul energiya jaqtılıq energiyası tárizinde $h\nu = E_g$ foton bolıp shıǵıwı múmkin. Bunday rekombinaciylardı jaqtılıq shıǵaratuǵın rekombinaciylar delinedi. Bul júdá áhmiyetli qásiyet bolıp, jaqtılıq shıǵaratuǵın diodlar hám yarımótkizgish lazerleri mine usı qásiyetke tiykarlanıp jaratıladı. Álbette bunday hallarda yarımótkizgishtiń qadaǵan etilgen zonasında aktiv isleytúǵın rekombinaciya orayları aktivligin kemeytiriw kerek boladı. II – túr rekombinaciya bolsa elektron óz energiyasın rekombinaciya orayın payda qılǵan atomǵa beredi. Bul energiyanı onnan soń gewek penen rekombinaciya qılǵannan soń joǵaltqan energiyasın kristall pánjerege yaǵnıy tiykarǵı atomlardıń jıllılıq energiyasın asırıwǵa sarplaydı. Bunda hár túrli energiyaǵa iye bolǵan fotonlar payda boladı. Álbette payda bolǵan fotonlar energiyası fotoenergiyasınan júdá kem bolıwı

menen birge ádewir úlken energiya aralığında ózgeriwi múmkin. Demek, fotonlar kristall pánjerede okustikalıq hám optikalıq terbelislerdi payda etedi.

6.6-§ Jaqtılıqtıń yarımótkizgishlerde jutılıwı yamasa optikalıq qásiyetleri

Yarımótkizgishlerde optikalıq hádiyselar óz ishine kóp qásiyetlerdi qamtıydı, bul yarımótkizgishke túsip atırǵan jaqtılıq spektriniń, yarımótkizgish betinen qaytıwı yamasa jaqtılıqtıń kólem boylap ótip ketiwi hámde jaqtılıqtıń jutılıw qubılısların óz ishine aladı. Bul qubılıslar tek úyrenilip atırǵan yarımótkizgishtiń eń tiykarǵı fundamental parametrleri bolıwı, bálkim zonalar dúzilisi hám qadaǵan etilgen zonadaǵı bar bolǵan energetik qáddiler tábiyatı tuwralı tolıq maǵlıwmat berip qalmastan, usı yarımótkizgish materialınıń optikalıq, fotoelektrik áspablar jaratıwındaǵı funkcional imkaniyatlardı ashıp beredi. Kristall betke túsip atırǵan jaqtılıq intensivligi (I_o), jaqtılıq sırtınan qaytadı (I_q), kristalldan ótip ketedi (I_{wo}) hám qalǵan bólegi kristalǵa jutıladı (I_{ju}).

$$I_o = I_q + I_{wo} + I_{ju}. \quad (6.11)$$

Eger biz ańlatpalar qatnasın alatuǵın bolsaq, onda sáykes halda qaytıw koefficienti (R), jutılıw koefficienti (K) hám ótiw koefficientin (T) dep belgilew múmkin:

$$R = \frac{I_q}{I_o}, \quad K = \frac{I_{ju}}{I_o}, \quad T = \frac{I_{wo}}{I_o}. \quad (6.12)$$

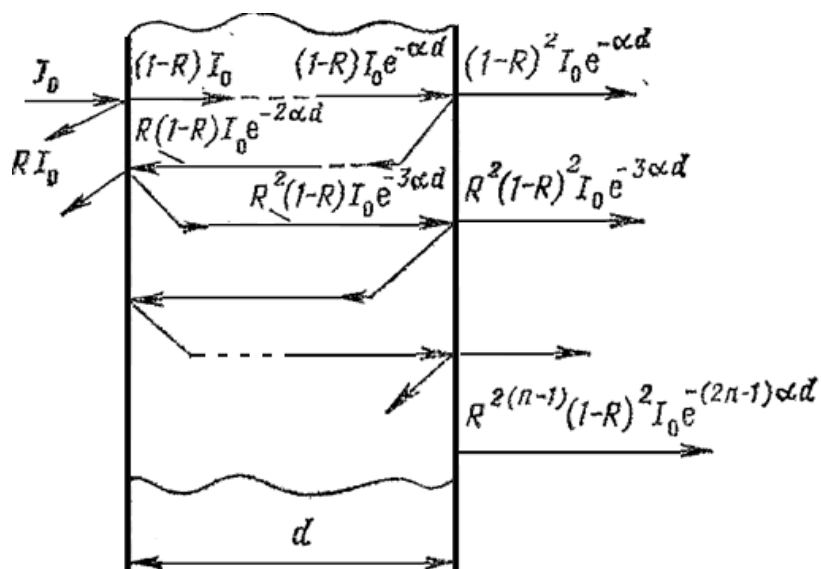
Buger – Lambert nızamı: Kristall betine túsken jaqtılıq intensivligi kristallda jutıladı hám onıń muǵdari kristall qalınlıǵına eksponencial nızam menen kemeyip baradı:

$$I = I_o(1 - k) \cdot e^{-\alpha d}. \quad (6.13)$$

Bul jerde α –jutılıw koefficienti dep ataladı hám onıń birliǵı sm^{-1} . Bul ańlatpaǵa kóre $I_0(1 - k)$ mánisi e ese kemeyiwi ushın kerek bolǵan kristall qalınlıǵınıń kerı mánisi $1/\Delta d = \alpha$ boladı, yaǵnıy Δd – bul fotonlardıń erkin juwrıw jolı esaplanadı. Jutılıw koefficientiniń fizikalıq mánisi bul – fotonlar atomlar menen ushrasıp, atomlar óz energetik halatın ózǵerttiriwi. Sonıń ushın atomlar koncentracıyası qansha kóp bolsa hám atomlardıń foton menen ushırasıw beti (sm^2) úlken bolsa, fotonlar sonshelli jutıladı. Bunnan

$$\alpha = N \cdot s, \quad (6.14)$$

teń boladı. Tómenдеgi 6.7-súwretde jaqtılıqtıń yarımótkizgishten qaytıwı, ótiwi hám jutılıwı kórsetilgen:



6.7 – súwret. Jaqtılıqtıń yarımótkizgishten qaytıwı, ótiwi hám jutılıwı.

6.7-súwretten kórinip turıptı, jaqtılıq yarımótkizgishten bir neshshe márte qaytıdı, bul bolsa jaqtılıqtıń jutılıw hám ótiw qásiyetlerine tásir qıladı. Bunda ótiw koefficienti tómendegige teń boladı:

$$T = \frac{(1 - k)^2 \cdot e^{-\alpha d}}{1 - k^2 e^{-2\alpha d}}. \quad (6.15)$$

Eger (6.15) de αd nıń mánisi júdá úlken bolatuǵın bolsa, onda bólimдеgi ekinshi aǵzanı esapqa almasa da boladı, bul jaǵdayda ótiw koefficienti

$$T = (1 - k)^2 \cdot e^{-\alpha d}, \quad (6.16)$$

ge teń boladı. Bunnan jutılıw koefficientin anıqlaw múmkin:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln T(1 - k)^2. \quad (6.17)$$

Eger yarımótkizgish materialınıń qaytıw koefficienti k anıq bolsa, onda hár túrli qalıńlıqqa iye bolǵan birdey yarımótkizgishte jaqtılıqtıń ótiwin ólshep jutıw koefficientin tómendegishe anıqlaw múmkin:

$$\alpha = \frac{1}{d_2 - d_1} \cdot \ln \frac{T_1}{T_2}. \quad (6.18)$$

Álbette, yarımótkizgishtiń barlıq optikalıq parametrleri α, T, k túsip atırǵan jaqtılıq tolqın uzınlıǵına baylanıslı. Sonıń ushın yarımótkizgish materiallarınıń optikalıq qásiyetlerin úyreniwde joqarıdaǵı úsh parametrdiń jaqtılıq tolqın uzınlıǵına baylanıslılıǵı anıqlanadı. Bunı usı parametrlerdıń spektral baylanısı dep ataydı $k(\lambda), T(\lambda), \alpha(\lambda)$. Bular bolsa baylanıslar tábiyatı, kristall dúzilisi, onıń energetik qáddiler túrleri, bar bolǵan qosımta atomlar payda etken energetik qáddiler, kristall pánjere terbelisleri, yarımótkizgish materialınıń sırtınıń halatı, eksitonlar haqqında tolıq maǵlıwmat alıw imkanın usı úyrenilip atırǵan yarımótkizgishtiń optikalıq qásiyetleri hám imkaniyatların tolıq ashıp beredi.

6.7-§ Jaqtılıqtıń yarımótkizgishte jutılıw tábiyatı haqqında qısqasha maǵlıwmat

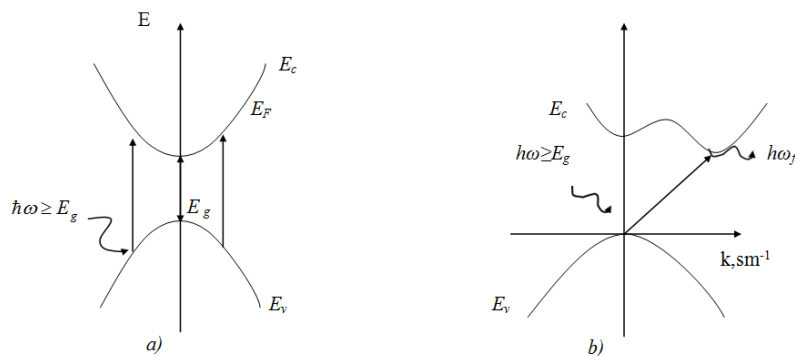
Ulıwma alganda yarımótkizgishlerde jaqtılıqtıń jutılıwı hám onı ańlatıwshı jutıw koefficienti α óz ishine hár túrli tábiyatqa iye bolǵan jutılıwlardan ibarat boladı. Sonıń ushın kórilip atırǵan jutıw qubılısında qaysı túrdegi jutılıwdıń úlesi kóbirek hám onı qaysı hallarda tolıq baqlaw múmkin. Jaqtılıqtıń (fotonnıń) jutılıwı fotoenergiyanıń, elektron hám atomlardıń energetik halın ózgerttiriwge jumsalıwın názerde tutıp, júz beretuǵın tiykarǵı jutılıw mexanizmderin tómendegi túrlerge bóliw múmkin:

- 1) Jaqtılıqtıń fundamentall yamasa menshikli jutılıwı – elektronlardıń valent zonadan ótkizgishlik zonasına ótiwin támiyinleytuǵın jutılıw.

- 2) Zaryad tasıwshılar (elektron hám geweklar) ótkizgishlik zonası ishindegi (elektron) yamasa valent zonası ishindegi energetik hallardı ózgeriwine alıp keletuǵın erkin zaryad tasıwshılar tárepinen jutılıwı.
- 3) Elektron qosımta atomları payda etken energetik qáddilerden ótkizgishlik zonasına yamasa elektronlardıń valent zonasınan akceptor energetik qáddilerine ótiwin táminleytuǵ ın – qosımta atomlar arqalı jutılıwı.
- 4) Fotoenergiyasınıń kristall pánjere terbelisleri qásiyetlerin ózgeriwine alıp keletuǵın fonon jutılıwı.
- 5) Eksitonlardı payda qılatuǵın yamasa olardaǵı elektron hám gewek baylanısı úziw menen erkin elektron hám gewek payda qılıwǵa sarplanatuǵın – eksiton jutılıwı.

6.8-§ Menshikli jutılıwlar

Bizge belgili, yarımótkizgishler elektron zonalar dúzilisi tiykarınan eki túrli boladı, yaǵnıy tuwrı elektron zonalar hám tuwrı emes zonalar. Tuwrı elektron zonalar degende, ótkizgishlik zonasınıń minimum mánisi, valent zonasınıń maksimum mánisleri tolqın vektori (k) nıń bir mánisine tuwrı kelgen zonalar dúzilisine aytıladı (6.8, a – súwret). Bunday kristallarǵa *GaAs*, *Ga* hám basqalar kiredi. Eger ótkizgishlik zonasınıń minimum mánisi, valent zonasınıń maksimum mánisleri tolqın vektorınıń hár bir mánislerine tuwrı kelse, bunday energetik zonalar tuwrı emes zonalar dep ataladı. Bularǵa *Si*, *Ge* kristall zonalar dúzilisi kiredi (6.8, b – súwret).



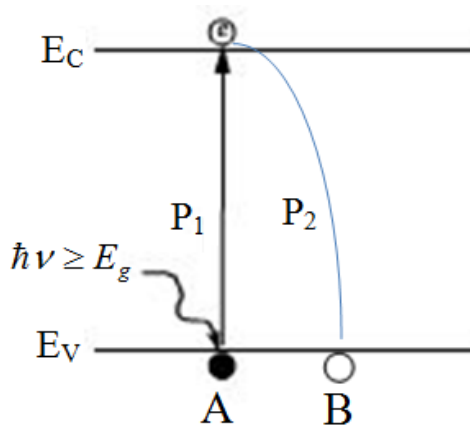
6.8- súwret. Yarımótkizgishlerde tuwrı (a) hám tuwrı emes (b) elektron zonalar.

Sonın ushın da jaqtılıqtıń zona boyınsha yaǵnıy menshikli jutılıw (foton jutılıwı esabınan elektronnıń valent zonasınan ótkizgishlik zonasına ótiwi) bunday halatta jutılıw koefficientiniń foton energiyasına baylanıslılıǵı hár túrli boladı. Menshikli jutılıwdıń spektr baylanısı valent hám ótkizgishlik zonalardaǵı energetik hallar tıǵızlıǵınıń energiya boyınsha bolistiriliwi hám elektronnıń ótiw itimallıǵına baylanıslı. Tuwrı jutılıw – bunday halda energiya hám impulstıń saqlanıw nızamı orınlanıwı tiyis, yaǵnıy elektronnıń ótkizgishlik haldaǵı energiya mánisi, onıń valent zonasındaǵı energiya mánisi foton energiyasına teń bolıwı hámde impulsları da sonday bolıwı zárúr. Sebebi foton impulsınıń elektron impulsına salıstırǵanda júdá kishkene bolǵanlıǵı ushın, ol elektronnıń sońǵı halatı impulsına tásir etpeydi. Bunda jutılıw koefficientiniń spektrge baylanıslılıǵı tómendegishe ańlatıladı:

$$\alpha = A \cdot (h\nu)^{1/2}. \quad (6.19)$$

Bul jerde A – proporcionallıq koefficienti. Usını aytıw kerek, (6.19) – ańlatpa energetik zonaları parabolalıq bolǵan hallar ushın.

Kremniy kristalınıń zona dúzilisi 6.9 – súwrette kórsetilgen:



6.9 – súwret. $h\nu$ foton jutqan elektronda júz beretuǵın qubılıs.

Bunda elektronnıń dáslepki halatı A hám sońǵı halatı B eki basqıshtan ibarat boladı. P_1 impulslı elektron $h\nu$ energiyalı foton jutıwı nátiyjesinde valent zonadan tuwrı ótkizgishlik zonasına vertikal baǵıtta shıǵadı, onnan keyin, hár túrli defektlerge shashıraw nátiyjesinde P_2 impuls penen B halatına keledi.

VI bapqa tiyisli sorawlar:

- 1) Fotoótkizgishlik degenimiz ne hám ol nelerge baylanıslı?
- 2) Fotogeneraciya degenimiz ne?
- 3) Jaqtılıqtıń qattı denelerde jutılıw koefficientiniń muǵdarı ne menen anıqlanadı?
- 4) Menshikli óte ótkizgishlik hám kirispe atomlar ótkizgishligin túsindirip berin?
- 5) Zaryad tasıwshılardıń jasaw waqtı degenimiz ne hám ol nelerge baylanıslı?
- 6) Fotosezgirlik degenimiz ne?
- 7) Fotosezgirlikti asırıwshı oraylar haqqında maǵlıwmat berin?
- 8) Buger nızamın túsindirip berin?
- 9) Rekombinaciya degenimiz ne hám onıń túrleri?
- 10) Jutıw betleri haqqında maǵlıwmat berin?

VII BAP

Qattı denelerde elektronlardıń energetik halları

7.1-§. Elektronlardıń atomlardaǵı energetik halları

Atom yadro hám onıń átirapında hár qıylı energetik halları bolǵan elektronlardan ibarat. Atom yadrosı – protonlar yaǵnıy oń zaryadqa iye ($1,6 \cdot 10^{-19} C$), massası elektron massasınan 1836 ese ($m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} kg$) úlken hám radiusı $6 \cdot 10^{-13} sm$ ge teń hámde neytronlar – elektron zaryadqa iye emes, massası elektron massasınan 1839 ese úlken hám radiusı proton radiusına teń elementar bólekshelerden quralǵan. Elektronlar bolsa teris zaryadqa iye ($1,6 \cdot 10^{-19} C$), massası $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} kg$ radius ı $10^{-12} sm$ ge hám magnit momenti $\mu = 9,2731 \cdot 10^{-21} erg/Gauss$ qa teń elementar bólekshe bolıp esaplanadı. Atom bolsa bul elementar bólekshelerge qaraǵanda bir qansha úlken ólshemge iye yaǵnıy onıń radiusı $\sim 10^{-5} sm$ ge teń. Bunnan kórinip turıptı, yadro hám elektronlardıń kólemi atom kóleminiń júdá kishkene bólegin yaǵnıy 10^{-12}

bólegin quraydı. Demek, protonlar, neytronlar hám elektronlarǵa salıstırǵanda atom júdá úlken boslıqqa iye. Atomlardǵı elektronlardıń energetik halları 4 kvant san menen, yaǵnıy bas kvant san n , orbital kvant san l , magnit kvant sanı m hám spin kvant sanı s penen anıqlanadı. Bas kvant sanı n niń mánisi atomdǵı elektronlar energetik qabıqlar sanın kórsetiw menen birge, bunday energetik qabıqlarda jaylasıwı múmkin bolǵan maksimum elektronlar sanı $N = 2n^2$ qa teń boladı. Sonıń menen birge Bor usınǵan atomnıń planetar modeline muwapıq, (bul model eki postulattan ibarat bolıp, 1 – electron atom átrapında qálegen emes, bálkim anıq turǵın qabıqlar boyınsha elektromagnit tolqınlardı shıǵarmay hárekette boladı hám olardıń energiyası

$$E = \frac{m \cdot e^4}{32 \cdot \pi^2 \cdot h^2 \varepsilon_0} \cdot \frac{1}{n^2} \quad (7.1)$$

menen anıqlanadı. Bul jerde m – elektron massası, h – Plank turaqlısı, n – bolsa bas kvant sanı ($n = 1, 2, \dots$), $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$. 2 – postulat bolsa – electron bir turǵın energetik qabıqtan ekinshisine ótiwi ushın qabıqlar energetik qáddileri ayırmasına teń bolǵan foton energiyasın jutilıwı yamasa shıǵarıwı lazım boladı. $h\nu$ – foton energiyası (ν – jiyilik)

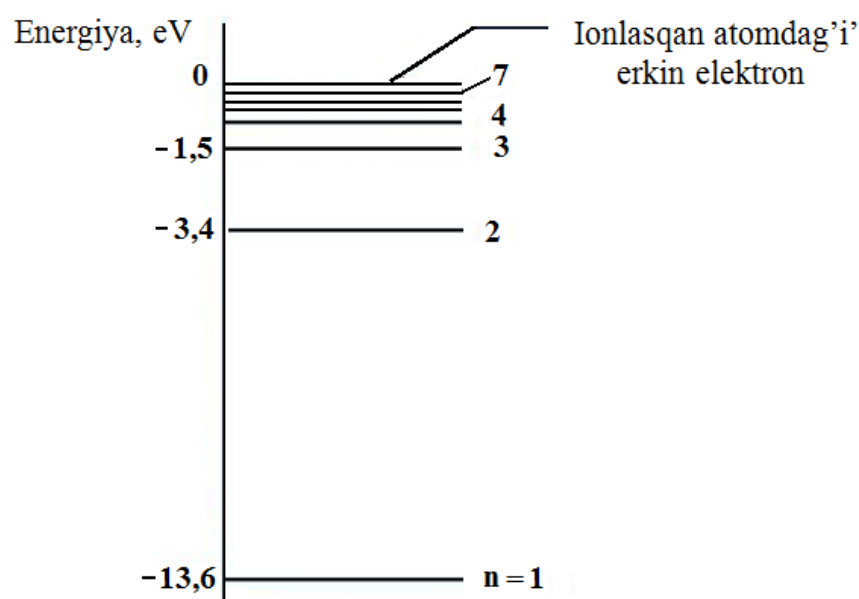
$$h\nu = E_1 - E_2. \quad (7.2)$$

Demek, bulardan kórinip turǵanıday, bas kvant sanı hám energetik qabıqlar sanı, olarda jaylasıwı múmkin bolǵan maksimum elektronlar muǵdarı hám olardıń energiyasın da anıqlap beredi eken. (7.1) formuladan kórinip turıptı, elektronlardıń energiyası qálegen mániske iye emes, bálkim n – mánisine sáykes anıq mánislerge iye boladı eken yaǵnıy, olardıń mánisleri diskret mánislerge iye boladı. (7.1) formulaǵa muwapıq vodorod atomındaǵı elektronlar energiyasın esaplaǵanda $E_1 = 13,6 \text{ eV}$ qa teń boladı. 7.1 – súwrette elektronlardıń energetik qáddileri – bas kvant sanınıń ózgeriwi kórsetilgen. Súwretten kórinip turǵanıday, n niń mánisi artqan sayın energetik qáddiler arasındǵı energiyalar

ayırması kemeyip baradı hám olar aralığı elektronlar jaylasıwı ruxsat etilmegen zonalarda bar.

Fizikada birinshi elektron orbitanı K ($n = 1$), ekinshisi L , úshinshisi M , tórtinshisi N hám qalğanları O, P, Q menen belgilew qabıl qılınğan. l – orbital kvant sanı – bul elektronnıń hárezet muǵdarı momentin kórsetedi, onıń mánisi $l = (n - 1)$ ge teń bolıp, n – mánisine qarap ($n = 1, 2 \dots$) $l = 0, 1, 2 \dots$ boladı.

m –magnit kvant sanı mánisi $m = \pm l$ bolıp, onıń fizikalıq mánisi hárezet muǵdarı momentiniń berilgen oǵan salıstırǵandaǵı proekciyasın kórsetedi. Demek, berilgen n hám l mánislerinde m mánisleri elektron orbitalardıń fazadaǵı hár qıylı baǵdarların kórsetedi. Eger $l = 1$ ge teń bolsa, $m = -1, 0, 1$. Eger $l = 2$ bolǵanda, $m = -2, -1, 0, 1, 2$ mánislerine iye boladı. Bunnan kelip shıǵadı, berilgen l – mánisinde hárezet muǵdarı momentiniń berilgen kósherge salıstırǵandaǵı baǵıtı $2l + 1$ ge teń boladı.



7.1 – súwret. Elektronnıń energetik qáddileri – bas kvant sanınıń ózgeriwi kórsetilgen.

Spin kvant sanı bul – elektronnıń óz kósheri átirapında aylanıwındaǵı hárezet muǵdarı momentin kórsetedi hám onıń mánisi $s = \pm 1/2$ ge teń. Demek, m niń hár bir mánisine s tiń eki mánisi bolıwı múmkinligi ushın, berilgen l diń

mánisinde elektronniń $2(2l + 1)$ energetik halı bar eken. Elektronlardıń atomdaǵı energetik halatın 4 kvant sanı

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

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

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

$$s = -\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}.$$

menen anıqlansa da, biraq jáne bir júdá zárúr Pauli principin esapqa almay, elektronlar atom átirapında jaylasıwın tolıq tuwrı kóz aldımızǵa keltirip bolmaydı. *Pauli principini* – hár qanday energetik qáddide 4 kvant sanı bir qıylı bolǵan 2 elektron jaylasıwı múmkin emes dep kórsetedi yamasa bunı sonday túsindiriw múmkin. Hár qanday energetik qáddide spinleri qarama – qarsı bolǵan 2 elektron jaylasıwı múmkin. Buǵan muwapıq $n = 1$ elektron orbitada spinleri $+1/2$ yamasa $-1/2$ eki elektron jaylasıwı múmkin. Bunday energetik haldı $n = 1, l = 0, 1 s$ energetik hal dep belgilew qabıl etilgen. Eger $n = 2$ bolsa, $l = 1$ ge teń, bunday orbitada $N = 2n^2 = 8$ elektron bolıwı múmkin, biraq Pauli principine muwapıq bunday orbita ekewden elektron jaylasatuǵın 4 orbita qabıqlarına ajraladı hám $l = 1$ energetik haldı p dep belgilenedi hámde $l = 1$ $2s2pp$ – halda óz nábvetinde 3 qabıqqa ajraladı. $n = 3, l = 2$ elektron hal d menen anlatıladı, bular da óz nábvetinde Pauli principine muwapıq 5 qabıqqa bólinedi.

Elektron qáddilerdi belgilew tómendegishe boladı:

$$l = 0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5$$

$$s \ p \ d \ f \ g \ h$$

$$\text{qabıqlar} \quad 0 \ 3 \ 5 \ 7 \ 7 \ 7$$

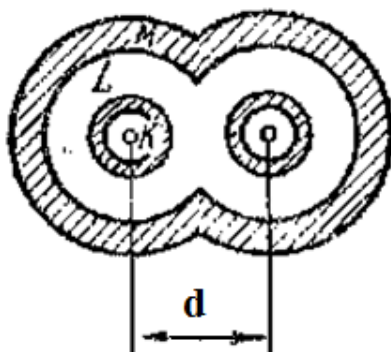
usıǵan muwapıq atomlardıń elektron dúzilisi tómendegishe anlatıladı:

$$H - 1s^1, \ He - 1s^2$$

$$C - 1s^2 2s^2 2p^2, \ Si - 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1.$$

7.2-§. Qattı denelerde elektronlardın energetikalıq halı

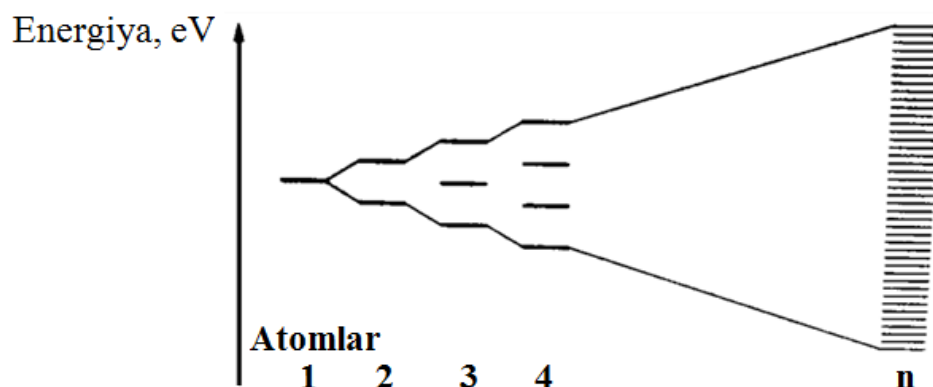
Biz joqarıda jeke jaylasqan atomlarda elektronlardın energetik qabıqları hám qáddilerdegi bólistiriliwin kórip shıqtıq. Endi mine usı atomlar birikpesinen quralǵan qattı dene kristallarında elektronlardın energetik jaylasıwınıń bólistiriliwin kórip shıǵamız. Bunday halda kristalldı qurawshı atomlar arasındaǵı aralıq (pánjere turaqlısı – mısalı kremniyde $d = 5,4 \text{ \AA}$) júdá kishkene boladı. Endi atom yadrolarınıń óz – ara hár bir atomǵa tiyisli elektronlardın óz – ara barlıq yadro hám barlıq elektronlarǵa tásirin, elektronlardın energetik qáddileri hám olardıń bólistiriliwine tásir etpey ilájı joq. Bunı anıǵıraq kóz aldımızǵa keltiriw ushın eki bir qıylı atomdı bir – birine sonday etip jaqınlastırıw kerek, olar arasındaǵı aralıq kristall pánjere turaqlısına jaqınlassın. Bul halda bul eki atomnıń sırtqı elektron qabıqları bir – birine kirisip ketedi. Nátiyjede, birinshi atomnıń elektronları erkin, ekinshi atomnıń elektron qabıqlarına hesh qanday energiya sarplamay óte baslaydı. Endi eki atom birge sırtqı elektronları ushın ulıwmalasqan elektron qabıǵın payda etedi. Biraq endi bul elektron qabıqta tórt elektron bolıp qalǵanlıǵı ushın Pauli principine muwapıq (hár qanday energetik qáddide spinleri bir – birine qarama – qarsı bolǵan ekewden artıq elektron jaylasıwı múmkin emes) bul ulıwmalasqan elektron qáddi endi energiyaları bir – birinen júdá azǵana parıq qılatuǵın eki energetik qáddige ajraladı.



7.2 – súwret. Eki atomdı bir – birine óz – ara jaqınlastırǵandaǵı halatı.

Endi on (10) atomdı óz – ara jaqın jaylastırayıq. Bul halda bul on atomnıń sırtqı elektron qabıqları ulıwmalasqan bolıp qaladı hám olar usıǵan sáykes halda on mayda energetik qáddilerge bólinedi. Demek jekke atomdaǵı elektronlardın bir

qıylı energetik qáddileri ornına jaylasqan atomlar sanına sáykes mayda qabıqlarǵa bólinedi ulıwmalasqan energetik qáddi payda boladı.



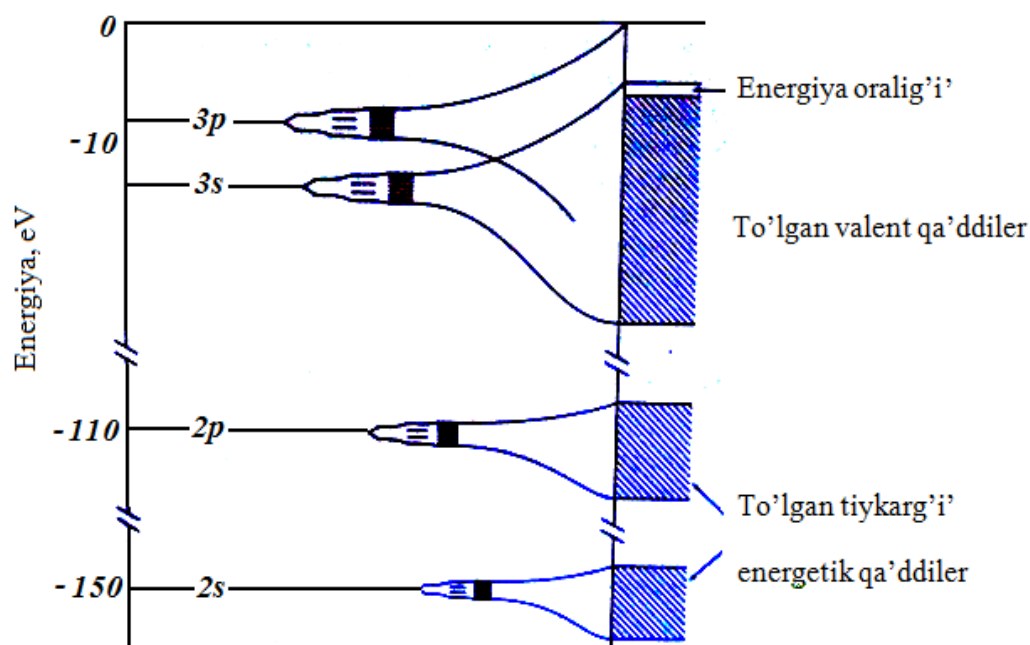
7.3 – *súwret. Óz – ara jaqınlastırılǵan 10 atomdı energetik qáddilerge ajratıw.*

Kristalda kólem birliginde ortasha $N \sim 5 \cdot 10^{22} \text{ sm}^{-3}$ atom jaylasqan bolsa, bulardıń elektron qabıqların bir – birine biriktiriwde endi atomdaǵı elektron jaylasqan bir elektron qabıq ornına $5 \cdot 10^{22}$ mayda qabıqlarǵa iye bolǵan shama menen $5 \div 10 \text{ eV}$ aralıǵında jaylasqan hár birine ekewden elektron jaylasıwı múmkin bolǵan energetik qáddiler jıyındısı yamasa zonası payda boladı. Bul energetik qáddiler arasındǵı ayırma

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

qa teń júdá kishkene mánisten ibarat boladı. Sonıń ushın bul zona ishinde elektronlar energiyası úziliksiz ózgeredi dep aytıw múmkin. Usınday hal atomlardıń ishki basqa qabıqlarında da júz beredi. Biraq olardıń óz – ara birigiw halatı joqarıdaǵı qabıqlarǵa salıstırǵanda kemirek boladı. Soǵan sáykes halda payda bolǵan energetik qáddi jaylasqan energiya aralıǵı kemeyip baradı. Demek, jekke atomda payda bolǵan elektron qabıqlar ornına kristalda $\sim 10^{22}$ ge teń, júdá tıǵız jaylasqan energetik qáddilerdi óz ishine alǵan energetik qáddiler payda boladı eken. Bul energetik zonalar arasında elektron jaylasıwı múmkin bolmaǵan -qadaǵan etilgen zonalar da júzege keledi eken. Tómendegi 5.4 – súwrette *Si* atomınıń sırtqı elektron qáddileri ornına, *Si* kristalında payda bolatuǵın energetik

zonalar keltirilgen. Bulardan sonı bilıw múmkin, eger jekke atomnıń hár bir elektron qabıǵında tek usınday muǵdardaǵı elektronlar hárezette bolatuǵın bolsa, usı atomlardan quralǵan kristalda sol anıq elektron qabıqları ornına, bunday kristall ushın tek bir energetik zonalar payda boladı. Bul zona ishinde kristaldı qurawshı atomlar sanınan 2 ese kóp elektronlar jaylasıwı múmkin.



7.4 – súwret. Si atomınıń sırtqı elektron qáddileri ornına Si kristalında payda bolatuǵın energetik qáddiler.

Demek, elektronlardıń kristaldaǵı energetik qáddileri – energetik qáddilerden ibarat bolıp, hár bir energetik zona bir – birinen qadaǵan etilgen zonaları menen ajralıp turadı. Hár bir energetik zona keńligi (eV esabında) usı energetik zonanı payda etken atomdaǵı elektron qabıqlardıń yadrodan qanshelli uzaqta jaylasıwına baylanıslı boladı. Atomnıń elektronlar menen tolǵan qabıqları negizinde payda bolǵan energetik qáddilerdiń hár bir qáddinde qarama – qarsı spinge iye bolǵan ekewden elektron bar bolıp, olarǵa sırtqı maydan qoyılǵanda olardıń jılısıwı múmkin bolmaǵanlıǵı ushın, olar tok ótkiziwde qatnasa almaydı. Sonıń ushın qattı deneni qurawshı atomlar valent elektronları jaylasqan elektron qabıqları tiykarında payda bolatuǵın energetik zonalar – usı qattı deneniń tábiyatı – onıń elektr ótkiziwsheńlik menshikli qásiyetlerin anıqlap beredi. Bunda 3 hal júz

beredi: 1 – halda valent elektronlar payda etken energetik qáddiler tolmağan boladı. Bul tek taq valent elektronlarına iye bolğan atomlar (*Cu, Ag* metallar) ğa tiyisli. Bunday energetik qáddiniń yarımı elektronlar menen tolğan yarımı bolsa bos bolıp, sırtqı elektr maydanı qoyılǵanda, elektronlar ózleriniń kinetikalıq jıllılıq energiya ($E = kT$) ları esabınan bánt energetik qáddilerden boslarına ótip, elektr togın ótkiziwde qatnasadı. Sebebi biz joqarıda keltirip ótkenimizdey, payda bolğan energetik zonada energetik qáddiler energiyalarınń parqı júdá kishkene yaǵnıy $\Delta E = 10^{22} \text{ eV}$ ğa teń, bul eń tómén temperatura ($T = 1 \text{ K}$) daǵı jıllılıq energiyası ($E = 8,8 \cdot 10^{-5} \text{ eV}$) den júdá kishkene boladı. Mine usınday sırtqı energetik qáddige iye bolğan qattı deneler toktı júdá jaqsı ótkizedi hám olar **metallar** dep ataladı. Júdá kóp metallarda valent energetik zona keyingi bos ótkiziwsheńlik zonası menen qosılǵan boladı. 2 – halda valent elektronları payda etken energetik zona elektronlar menen tolıq bánt boladı. Bul jaǵday sırtqı valent elektronları jup bolğan atomlar, mısalı *Si* ($1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$). Eger bunday atomlarda elektron menen bánt bolğan zonadan keyingi elektronlardan basqa energetik zona arasındǵı energiya parqı, yaǵnıy qadaǵan etilgen zona keńligi $\Delta E_g < 3 \text{ eV}$ menen ajralıp tursa, bul materiallǵa sırttan elektr maydanı qoyılǵanda, elektronlar tek valent energetik zonasınan keyingi zonaǵa ΔE_g nı jeńip ótkennen keyin ótkiziwsheńlikke qatnasıwı múmkin. Endi valent elektronlarınıń hár bir sekunddan keyin bos zonaǵa ótiw itimallıǵı:

$$p = a \cdot n_0 p_0 e^{-\frac{\Delta E}{kT}},$$

ǵa teń bolad ı. Bunda n_0 – valent zona shegarasındǵı elektron tıǵızlıǵı, p_0 – bos zonanıń eń tómengı bóliminde elektronlardı qabıl etiwshi orınlar tıǵızlıǵı. Demek, ΔE_g qansha úlken bolsa, itimallıǵı sonsha kem, temperatura qansha úlken bolsa itimallıq eksponencial artıp baradı. Bul degen sóz bunday qattı denelerde ótkiziwsheńlik mánisi tek ΔE_g ğa baylanıslı boladı. Eger $\Delta E_g < 3 \text{ eV}$ bolsa, bólme temperaturasında belgili muǵdardaǵı elektronlar keyingi bos zonaǵa ótip

ótkiziwsheńlikke qatnasadı. Bunday qattı deneler **yarımótkizgishler** dep qabıl etilgen. 3 – hal, eger $\Delta E_g > 3 \text{ eV}$ ға iye bolǵan halda bólme temperaturası hám onnan joqarı temperaturalarda elektronlardıń valent zonasınan bos energetik zonaǵa ótiw itimallıǵı júdá kemeyip ketedi, soǵan sıykes olarda ótkiziwsheńlik júdá kem boladı. Bunday materiallar **dielektrikler** dep ataladı. Demek, valent elektronların payda etken energetik zonanı valent zona, onnan keyingi bos zonanı ótkiziwsheńlik zona dep ataladı. Biz joqarıda payda bolatuǵın energetik zonalar hám olar arasındǵı qadaǵan etilgen zonalardıń mánisleri olardı qurawshı elektron atom elektron qabıqlarınıń yadroǵa salıstırǵanda jaylasıwına baylanıslı dep aytqan edik. Bunıń dáliyli sıpatında IV – topar elementlerin keltiriw múmkin. Tómendegi keste de olardıń sırtqı elektrton qabıqlarındaǵı elektronlar keltirilgen. Olardıń barlıǵın sırtqı elektrton qabıǵında 4 elektron (s^2p^2) jaylasqan hám olar bir qıylı ximiyalıq baylanısqa iye bolıwına qaramay, olardıń qadaǵan etilgen energetik zonalarınıń mánisleri bir – birinen júdá parqlanadı.

7.1 – keste. IV – topar elementleriniń sırtqı elektron qabıqlarındaǵı elektronları.

Element	Elektron strukturası	$\Delta E_g, \text{eV}$
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

Buǵan sıykes halda uglerod atomlarınan quralǵan almas kristalı júdá jaqsı 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 yarımótkizgishler *Zn* ($\Delta E_g = 0,018 \text{ eV}$) va *Pb* lar bólme temperaturasında metall bolıp xızmet etedi. Demek, biz kristallarda elektronlardıń energetik qáddileri – energetik zonalarǵa iye bolıp, bunda elektronlar menen tolıq bánt bolǵan ishki elektron energetik zonalarındaǵı elektronlar ótkiziwsheńlikke yamasa ulıwma usı

qattı denelerdiń fizikalıq qásiyetlerine tásir etpeydi eken. Bul jerde atomnıń sırtqı valent elektronları tiykarında payda bolǵan valent energetik zonası hám olardıń elektronlar menen bántligi hám olardıń onnan keyingi bos energetik zona menen qanday keńlikte qadaǵan etilgen energetik zona menen ajralıp turıwı menen anıqlanadı eken. Bizge kvant fizikasınan belgili, elementar bóleksheler, sonnan elektronlar da, bóleksheler de tolqınlıq qásiyetine iye. Demek, elementar bóleksheler óz energiyasına $E = \hbar \nu$, impulsına $p = \hbar k$ hám tolqın uzınlıǵına $\lambda = 2\pi/k$, terbelis jiyiligine $\nu = 1/\lambda$ iye boladı. Bunda k – tolqın vektorı bolıp, $k = 2\pi/\lambda$ ǵa teń. De-Broyl teoriyasına muwapıq, elementar bóleksheler energiya hám tolqın uzınlıǵı ortasındaǵı baylanıs:

$$E = \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2m\lambda^2}, \quad (7.3)$$

ǵa teń boladı.

$$\lambda_D = \frac{\hbar^2}{\sqrt{2mE}}, \quad (7.4)$$

(7.4) – ańlatpa De-Broyl tolqın uzınlıǵı dep ataladı. Usı ańlatpadan korinip turǵanıday, elementar bóleksheler massası m hám energiyası E qansha úlken bolsa, onıń tolqın uzınlıǵı da sonsha kishkene boladı. Demek, elektronnıń halı endi onıń tolqın funksiyası φ menen anıqlanadı hám usıǵan sáykes halda elektronnıń tolıq háreketi Shredinger teńlemesi menen anıqlanadı:

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V_o(r) \right] \varphi(r) = E\varphi(r), \quad (7.5)$$

bul jerde $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – Laplas operator ı, $V_o(r)$ – elektronnıń potensial energiyasınıń r vektorı, E – elektronnıń tolıq energiyası. Bul teńlemenı elektronnıń potensial energiyasınıń $V_o(r)$ – berilgen halı hám túrine qarap $\varphi(r)$ di anıqlaw múmkin. Biraq elektronnıń kristall pánjeredegi halı, onıń jekke atomdaǵı halatınan túpten parı qıladı. Sebebi elektrongá endi óziniń yadrosınan tısqarı barlıq qońsı atomlar yadrolarınıń tási, yadrolardıń óz – ara tási kristall

pánjeresindegi barlıq elektronlardıń tásiri hám usı elektronlardıń óz – ara tásiri kristaldaǵı elektronnıń potensial energiyasın anıqlaydı:

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\sum_i\frac{\partial^2}{\partial r_i^2}-\frac{\hbar^2}{2M_j}\sum_j\frac{\partial^2}{\partial R_j^2}+\sum_{i=n}\frac{Z_jZ_ne^2}{R_{jn}}+\frac{1}{Z}\sum_{i\neq k}\frac{e^2}{r_{ik}}-\sum_{ikj}\frac{Z_ie^2}{r_{ij}}\cdot\varphi(r_i,R_j)=\\=\varepsilon\varphi(r_i,R_j). \quad (7.6)$$

Bul jerde m – elektron massası, i,j – elektron hám yadronıń radius vektorları, Z_j, Z_n – yadronıń atom sanı, R_{jn}, r_{ik}, r_{ij} – berilgen elektron hám yadrolar arasındǵı aralıq, ε – tolıq energiya, φ – elektronnıń menshikli funkciyası.

Bul degen sóz endi $v(r)$ kristaldaǵı barlıq atom yadroları (uzaq, jaqın) barlıq elektronlarǵa tásirlesiwı nátiyjesinde júzege keletuǵın júdá quramalı funkciyaǵa aylanadı. Eger Si kristalında 1 sm^3 ta $5 \cdot 10^{22}$ atom bolatuǵın bolsa, demek bul atom yadrolarınıń hámмесiniń tásirin olardıń koordinatlarına qarap esaplap shıǵıw júdá qıyın máselege aylanadı. Sonıń ushın bul máseleni sheshiwde adiabatalıq jaqınlasıw usınıladı. Bul jaqınlasıwdıń mánisi sonnan ibarat, elektronlarǵa salıstırǵanda atom yadrolarınıń hárezeti óz ornında qozǵalmaydı dep qaraladı. Buǵan sebep eń kishkene yadro bolǵan vodorod atom yadrosı da elektron massasınan 1836 márte kóp bolǵanı hám berilgen temperaturada yadro hámde elektronlardıń kinetikalıq energiyası bir qıylı kT ǵa teń bolǵanlıǵı ushın olardıń hárezet tezligi elektronnıń hárezet tezliginen júdá kishkeneligi tiykar boladı, yaǵniy yadronı qózǵalmas hám onıń kinetikalıq energiyasın nolge teń dep qaraw múmkin.

Elektron hám yadronıń óz – ara tezlikleri tómendegishe ańlatıladı:

$$E = kT = \frac{mv^2}{2} v_e = \sqrt{\frac{E}{m_e}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_e}}, \\ v_{yadro} = \sqrt{\frac{2kT}{m_{yadro}}}, \quad v_e \gg v_{yadro}. \quad (7.7)$$

Kristallda elektron hám yadrolardıń háreketi ulıwma bir – birine baylanıslı emes hám olardıń arasında hesh qanday energiya almasıwı bolmaydı, yaǵnıy elektron energiyasın ózgerttirmeydi. Demek, elektronlardıń háreketi yadrolardı payda etken ulıwmalasqan maydanı tiykarında júz bergen halda hár bir yadro koordinatası onıń kinetikalıq hám potensial energiyalarına baylanıslı bolmaydı. Onda (7.6) teńleme elektron ushın tómendegishe boladı:

$$\left[-\frac{h^2}{2m} \sum_i \frac{\partial^2}{\partial r_i^2} + \frac{1}{Z} \sum_{i \neq k} \frac{e^2}{r_{ik}} - \sum_{ikj} \frac{z_i e^2}{r_{ij}} \right] \varphi(r_i, R_j) = \varepsilon \varphi(r_i, R_j). \quad (7.8)$$

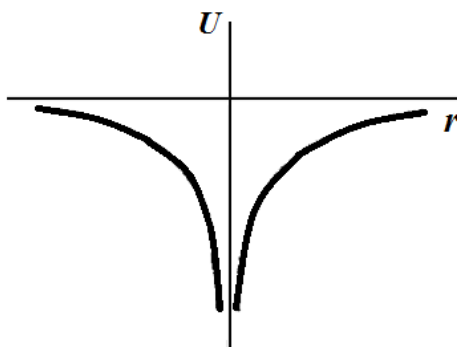
Biraq bul teńleme qaralıp atırǵan elektronnıń barlıq elektronlar menen óz – ara tásirlesiw halın ańlatıwshı potensial energiyaǵa iye bolǵanı ushın, onı sheshiw múmkin. Sonıń ushın endi ekinshi bir elektron jaqınlasıw usılın kóremiz. Bunıń mazmunı – kristalda elektronlardıń óz – ara bir – biri menen tásirlesiw ornına qaralıp atırǵan elektron basqa bir elektronlar tárepinen payda etken ortasha elektr maydan tásirinde almastıramız. Bunda kristaldaǵı barlıq elektronlar jalǵız jańa effektiv zaryadqa iye *< bólekshe >* tásirinde qalıp, qaralıp atırǵan elektron háreket halatı mine usınday bólekshe payda etken maydan tásirinde dep kóríledi. Bunday jaqınlasıw – kristallarda barlıq hám hár qıylı koordinacion vektorlarǵa iye bolǵan elektronlar óz – ara sheksiz muǵdardaǵı tásirlesiwdi kóp elektronlıq tásirlesiw máselesinen qutılıwǵa alıp keledi. Endi kristaldaǵı elektron ushın Shredinger teńlemesi tómendegishe jazıladı:

$$\frac{h^2}{2m} \frac{d^2 \varphi(r)}{dr^2} - [V(r) + \Omega(r)] \varphi(r) = E \varphi(r). \quad (7.9)$$

Demek, bunda *v(r)* qaralıp atırǵan elektronnıń háreketsiz ionları payda etken maydandaǵı tásirlesiw potencialı, *Ω(r)* bolsa sol elektronnıń barlıq elektronları payda etken maydan menen tásirlesiw potencial energiyası:

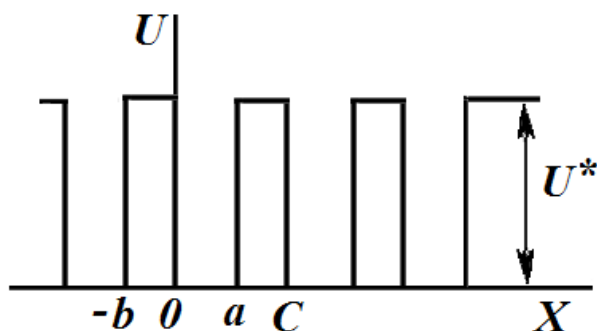
$$V(r) + \Omega(r) = U(r), \quad (7.10)$$

añlatpanı belgilep alsaq, onda kristaldağı elektron ushın Shredinger teńlemesi joqarıdağı elektronnıń jaǵdayın anıqlaytuǵın teńlemege sáykes bolıp qaladı. Sonı bilemiz, jekkelengen (jalǵız) atomdağı $v_0(r)$ –potencial energiya giperbola formasına iye boladı. $v(r)$ –bir qıylı tákirarlanıwshı giperbola formasında boladı.



7.5 – s úwret. Jekkelengen atomda qaralıp atırǵan elektronnıń háreketsiz ionlar payda etken maydandağı tásirlesiw potencial energiyasınıń giperbola formasına iye bolıwı.

Endi (5.10) teńlemenı sheship elektronnıń kristaldaǵı 1 tolq ın funkciyas ın tab ıw ush ın $v(r)$ – bul funkciyasınıń analitik mazmunın yaǵnıy onıń dúzilisin anıqlaw kerek. Bul mäseleniń sheshiliwin Kronig hám Pening kórsetip bergen. Oǵan sáykes halda $v(r)$ nıń dáwirililigi – bir qıylı añlatıwshı formada, bir qıylı aralıqta turaqlı tákrarlanıwshı funkciya ekenligi boladı.



7.6 – súwret. Kronig – Penin kristalında elektronnıń apirogsimaciya potencial funkciyası.

Eger biz potencial tosıq arasın b , potencial tosıq keńligin a hám potencial tosıq biyikligin U dep belgilep alıp,

$$\frac{ma}{h^2} bU = P = \text{const}, \quad (7.11)$$

dı payda etsek $1/P$ dıń fizikalıq mánisi potencial tos ıq móldirligin beredi. Endi joqarıdağı teńleme sheshiminiń matematikalıq sheshimin keltirmegen halda P nıń mánisine qarap, elektronnın energetik halların qaraymız:

- 1) $P \rightarrow \infty$ bunda elektrton óz atomı menen kúshli baylanısqa, onıń potencial tosıqtan ótiw itimallığı joq. Bul hal elektrondı jekkelengen atomdağı halatına sáykes keledi, yaǵnıy elektron diskret energetik qáddilerge iye hám olar óz – ara qadaǵan etilgen energetik zonalar menen ajratılǵan.
- 2) $P \rightarrow 0$ bunda potensial tosıq móldir bolıp, elektron háreketine tosqınlıq qılmaıdı. Elektron tolıq erkin halatta boladı.
- 3) $P > 1$ bul bolsa P nıń mánisi úlken bolǵanı menen potensial tosıq móldirligi kem bolsa da bar yaǵnıy elektron belgili bir jaǵdaylarda bul tosıqtan óte alıwı múmkin. Bul hal, elektrondı jekke atomdağı hám erkin halat ortasındaǵı jaǵdaylarına sáykes keledi.

Bunday jaǵdayda elektron endi diskret energetik qáddilerde emes, bálkim bir – birinen belgili bir keńlikke iye bolǵan qadaǵan etilgen zonalar menen ajralǵan energetik zonalarda jaylasadı. Elektron aqırǵı tolǵan zonadan keyingi bos zonaǵa ótiw itimallığı tek qadaǵan etilgen zona keńligi hám temperaturaǵa baylanıslı boladı. Sonı jáne bir márte aytıp ótiw kerek, kristall pánjerede elektronlardıń energetik halları kristalda júzege keletuǵın dáwirlik potencial tosıqlar tábiyatı hám dúzilisi menen anıqlanadı.

7.3-§. Energetikalıq zonadag'ı elektronlardın' halatlar sanı

Parallelopiped formasındaǵı kristaldı qarastıramız. Ólshemleri x, y, z kósherlerine sáykes L_x, L_y, L_z . a parametrli kublı reshetka ushın.

$$L_x = aN_x; L_y = aN_y; L_z = aN_z, \quad (7.12)$$

bul jerde N_x, N_y, N_z -atomlar sanı (kristaldın sáykes qabırǵalarındaǵı) ańsatlastırıw ushın tolqın funkciyası Ψ parallelopipedtiń qarama – qarsı tárepinde birdey mániske iye bolsın deyin. Usı jaǵday tolqın funkciyasınıń túrine hesh qanday fizikalıq jaqtan sheklew berilmeydi.

$$\Psi(x + L_x, y + L_y, z + L_z) = \Psi(x, y, z) \quad (7.13)$$

(7.13) teńlemesi mánisi boyınsha Born – Karman cikilliginiń shegaralıq shárti esaplanadı. $\Psi_k(r) = e^{ikr} U_k(r)$ kristalı ushın tolqın funkciyasınıń kórinisin esapqa alıp tómendegige iye bolamız.

$$\Psi(x + L_x, y + L_y, z + L_z) = U_k(r) e^{ikr} e^{ik_x L_x} e^{ik_y L_y} e^{ik_z L_z} = \Psi(x, y, z) \quad (7.14)$$

(7.13) shárti orınlanıwı ushın (7.14) ti tómendegishe túrlendirip jazamız.

$$e^{ik_x L_x} = 1; e^{ik_y L_y} = 1; e^{ik_z L_z} = 1; \quad (7.15)$$

Bul teńlik orınlanadı egerde (exp) kórsetkishiniń pútin san bolıp $2\pi i$ kóbeytilgen bolsa, yaǵnıy

$$K_x L_x = 2\pi m; K_y L_y = 2\pi n; K_z L_z = 2\pi l; \quad (7.16)$$

Bul jerde n_1, n_2, n_3 , - erkin pútin sanlar. Bul jerden tómendegilerge iye bolamız.

$$K_x = \frac{2\pi}{L_x} n_1; K_y = \frac{2\pi}{L_y} n_2; K_z = \frac{2\pi}{L_z} n_3; \quad (7.17)$$

$$n_1 = 0, \pm 1, \pm 2, \dots; n_2 = 0, \pm 1, \pm 2, \dots; n_3 = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Solay etip, K tolqın vektorınıń komponenti úzliksiz emes ózgeredi, nátiyjede bir neshe diskret mániske iye boladı. Usı jaǵdaylarǵa muwapıq ruxsat etilgen zonada elektronınıń energiyası kvantlangan boladı. (7.17) muwapıq K tolqın vektorına tiykarlana otırıp $\psi(r) = \sum_g e^{ikRg} \psi_g(r - Rg)$. tolqın funkciyasın bir ólshemli másele ushın tómendegishe jazamız.

$$\psi_k = \sum_g e^{ikxag} \psi_g = \sum_g e^{i \frac{2\pi h_1 g}{N_x}} \Psi_g \quad (7.18)$$

(7.18) $R=ag$, g -atom nomeri, yaǵnıy pútin san, $L_x=aN_x$. (7.18) funkciyası $n_1 \pm N_x$ Ψ_g sáykes keledi, ($n_1 = 0$) al tolqın funkciyası $n_1 = \pm(N_x + 1)$ $n_1 = \pm 1$ sáykes keledi, h.t.b. Bul K_x komponenta N_x mániske iye n_1 (hár qıylı mánisine). Bunday jaǵdayda $n_1=0, 1, 2, \dots, (N_x-1)$, sebebi $E(k)=E(-k)$, yaǵnıy n_1 tómende shegaralanǵan aralıqta

$$0 \leq n_1 \leq N_x \text{ yamasa } -N_{x/2} \leq n_1 \leq N_{x/2} \quad (7.19)$$

(7.12), (7.17) ha'm (7.19) arqalı iye bolamız, K vektor komponenti tómendegi aralıqta jatadı.

$$-\frac{\pi}{a} \leq k_x \leq \frac{\pi}{a}; -\frac{\pi}{a} \leq k_y \leq \frac{\pi}{a}; -\frac{\pi}{a} \leq k_z \leq \frac{\pi}{a} \quad (7.20)$$

bul jerde K_x, K_y, K_z N_x, N_y, N_z ha'r qıylı ma'nisleri ushın sa'ykes ma'nislerdi aladı. Kvant mexanikasına muwapıq atomdag'ı elektron halatındag'ı bas kvant sanı menen xarakterlenedi (bahalanadı), l - azimutal kvant sanı, t -magnitli kvant sanı ha'm s -spinnin' proektsiyası z - ko'sherindegi, ja'ne de kristaldag'ı elektronın' halatı Pauli printsipi boyınsha 4 kvant san menen anıqlanadı.

7.4-§. Kristall ushın Shredinger teńlemesi

Hár qanday qattı dene júdá kóp atomlardan quralǵan boladı. Atomlardın yadroları ideal kristalda tártipli reshetka (tor) payda etedi. Neytral kristallda yadrolardıń «oń» zaryadı barlıq «teris» elektronlardın zaryadına teń boladı.

Yadroǵa jaqın elektronlar kúshli baylanısqa boladı. Atom yadrosınan ádewir uzaq jaylasqa elektronlar hálsiz baylanısqaqlıǵı sebepli, qattı deneniń ishinde háreketke kelip elektr togın payda etedi. Biraq elektron óz háreketi dawamında kristallda basqa elektronlar menen ushırasadı. Bunday jaǵdayda bir elektronlı másele emes, al kóp elektronlı máseleni sheshiwge tuwra keledi. Sonıń ushın

kristalldağı kóp sandağı yadro atomı hám elektronnıń birgeliktegi stacionar awhalın hám energetikalıq spektrin anıqlaw ushın Shredinger teńlemesin sheshiwge tuwra keledi.

$$\hat{H}\Phi = E\Phi \quad (7.21)$$

bul jerde:

$\hat{H}$ - kristaldıń gamiltonianı, Φ - onıń tolqın funkciyası, E - kristaldıń energiyası.

Kristaldıń tolqın funkciyası barlıq elektronlardıń koordinatası r_i hám barlıq atomnıń yadrosınıń koordinatası R_α baylanıslı.

$$\Phi = \Phi(r_1, r_2, \dots, r_n, R_1, R_2, \dots, R_N)$$

Gamilton operatori óz ishine tómendegilerdi aladı:

1) Elektrolardıń kinetikalıq energiyası operatorın

$$\sum_i \left(-\frac{\hbar^2}{2m_o} \right) \Delta_i,$$

bul jerde $\hbar$ - Plank turaqlısı

$$(\hbar = h/2\pi),$$

m_o - elektron massası

$$\Delta_i = \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2}{\partial y_i^2} + \frac{\partial^2}{\partial z_i^2} - i \text{ elektronnıń Laplas operatorı}$$

2) Yadronıń kinetikalıq energiyasınıń operatorı

$$\sum_\alpha \left(-\frac{\hbar^2}{2m_\alpha} \right) \Delta_\alpha, \text{ bul jerde } m_\alpha \text{ - yadro massası;}$$

$$\Delta_i = \frac{\partial^2}{\partial x_\alpha^2} + \frac{\partial^2}{\partial y_\alpha^2} + \frac{\partial^2}{\partial z_\alpha^2};$$

3) Elektronnıń jup – juptan óz – ara tásiriniń potencial energiyası.

$$\frac{1}{2} \sum_i \sum_{j \neq i} \frac{\vec{d}^2}{r_{ij}}$$

4) Yadronıń jup – juptan óz – ara tásiriniń potencial energiyası.

$$V_o = (R_1, R_2, \dots, R_N);$$

5) Elektronnıń yadro menen óz – ara táhiri potencial energiyası

$$U = (r_1, r_2, \dots, r_n, R_1, R_2, \dots, R_N).$$

Usı joqardaǵı qurawshılardı esapqa alǵanıımızda Shredinger teńlemesindegi gamiltonın tómendegi kóriniske iye boladı.

Bul másele házirgi waqıtta ulıwma kóriniste sheshimge iye emes. Sonıń ushın bul teńlemenıń dara jaǵdayın sheshemiz.

$$\left\{ \sum_i \left(-\frac{\hbar^2}{2m_o} \Delta_i \right) + \sum_\alpha \left(-\frac{\hbar^2}{2m_\alpha} \Delta_\alpha \right) + \frac{1}{2} \sum_i \sum_{j \neq i} \frac{\vec{d}^2}{r_{ij}} + V_o + (R_1, R_2, \dots, R_N) + U = (r_1, r_2, \dots, r_n, R_1, R_2, \dots, R_N) \right\} \quad (7.22)$$

7.5-§. Adiabatikalıq jaqınlasıw hám valentli approksimaciya

Barlıq sistemanı jeńil (elektronlar) hám awır (atomnıń yadrosı) bólekshelerge bólemiz. Teńsalmaqlıq jaǵdayda bul bólekshelerdiń ortasha kinetikalıq energiyası birdey mániste boladı. Yadronıń massası elektronnıń massasınan ádewir úlken bolǵanlıǵı sebepli $m_\alpha \gg m_o$, elektronnıń tezligi yadronıń tezliginen sezilerli dárejede yaǵnıy eki márte úlken.

Bunday jaǵday ushın eń qopal jaqınlasıwdı yaǵnıy yadro teńsalmaqlıqta boladı. Yadro koordinataları $R_1, \dots, R_N$ turaqlı, al $R_{10}, \dots, R_{N_0}$ parametrler kristall tordın buwınındaǵı koordinatalar.

Teńsalmaqlı hallarǵa umtılıwshı yadro ushın $R_\alpha, \dots, R_{\alpha_0}$ kinetikalıq energiyası 0 ge aylanadı al olardıń óz – ara tásir energiyası V_o turaqlı mániske iye boladı. Bunday jaǵday ushın (7.22) teńleme ápiwayılasıp elektronnıń yadradaǵı tınısh maydanındaǵı jaǵdaydı súwretleydi. Usı jaǵday ushın Shredenger teńlemesi tómendegishe jazıladı.

$$\left\{ \sum_i \left(-\frac{\hbar^2}{2m_o} \Delta_i \right) + \sum_\alpha \left(-\frac{\hbar^2}{2m_\alpha} \Delta_\alpha \right) + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} \sum_j \frac{\vec{a}^2}{r_{ij}} + V_o + (R_1, R_2, \dots, R_N) + U = (r_1, r_2, \dots, r_n, R_1, R_2, \dots, R_N) \right\} \psi_e = E_e \psi_e \quad (7.23)$$

(7.23) formulada ulıwma sheshimge iye emes.

7.6-§. Bir elektronlı jaqınlasıw

Kóp elektronlı mäseleni sheshiwde eń kóp qollanılıp júrgen metodlardan biri Xartri – Fok metodı esaplanadı. Bul metod kóp elektronlı mäseleni bir elektronǵa alıp keliw. Bul ideyanıń tiykarında jup – juptan elektronnıń óz – ara tási hár bir elektronnıń basqa elektronlardı ortasha maydan menen tási almasırladı. Ańsatlastırıw ushın i – degi elektronnıń potencial energiyası sol maydandaǵı Ω_i bolsın. Bunnan kórip turǵanıday maydan sol elektronnıń háreketi basqa elektronlardıń háreketine de tásir jasaydı. Sonıń ushın bul process óz – ara kelisilgen dep ataladı.

Bunday óz – ara kelisilgen maydan túsiniǵiniń kirgiziliwi (7.23) formulasındaǵı

$$\frac{1}{2} \sum_{i \neq j} \sum_j \frac{\vec{a}^2}{r_{ij}} \text{ mánisti } \sum_i \Omega_i(r_i) \text{ almastırıp jazamız.} \quad (7.24)$$

Bul jerde $\Omega_i(r_i)$ – i – ta'rtiptegi elektronning' potentsial energiyası basqa elektronlarning' maydanındag'ı usınday almasırlar potentsial energiya elektronning' yadro menen o'z-ara ta'sirin to'mendegishe jazıwımızg'a boladı.

$$U(r_1, r_2, \dots) = \sum_i U_i(r_i) \quad (2.5)$$

Bul jerde $U_i(r_i)$ – i – elektronning' barlıq yadro maydanındağı potentsial energiyası. (7.24) hám (7.25) teńlemelerin esapqa alıp túrlendiretuğın bolsaq

$$\left\{ \sum_i \left[-\frac{\hbar^2}{2m_0} \Delta_i + \Omega_i(r_i) + U_i(r_i) \right] \right\} \Psi_e = E_e \Psi_e \quad (7.26)$$

Bul teńlemeni tómendegishe kóriniste jazıwğa boladı.

$$\hat{H} \Psi_e = \left(\sum_i \hat{H}_i \right) \Psi_e = E_e \Psi_e \quad (7.27)$$

bul jerde $\hat{H}_i$ – i – elektronning' gamiltonianı.

$$\hat{H}_i = -\frac{\hbar^2}{2m_0} \Delta_i + \Omega_i(r_i) + U_i(r_i) \quad (7.28)$$

(7.27) teńlemesin kórip turğanımızday gamiltonian (7.28) degi gamiltonianning' qosındılarının ibarat. Bul jağday ushın bólekshe sistemasının tolqın funkciyası hár bir bóliwshini óz aldına tuwrı keletuğın jağdaydı súwretleydi.

$$\Psi_e(r_1, r_2, \dots) = \Psi_i(r_i) \Psi(r_2) \dots = \prod \Psi_i(r_i) \quad (7.29)$$

Bul degen sóz, elektronlar bir – birin baylanıssız háreket ete baslaydı, al bólekshe sistemasının tolıq energiyası hár bir elektronning' energiyasının summasına teń.

$$E = E_1 + E_2 + \dots = \sum_i E_i \quad (7.30)$$

Solay etip óz – ara kelisilgen maydan túsiniń kirgiziw arqalı kristalldaǵı elektronlardı bir – biri menen óz – ara tásirlespeytuǵın bólekshe sıpatında qarawǵa boladı. Ψ_i - dan basqa $\check{\Psi}_i(j)$ barlıq tolqın funkciyasınıń kóbeymesi sıpatında belgileymiz. Ondaı jaǵdayda

$$[\Pi\Psi]_{\psi_1} = [\Pi\Psi]_{\psi_2} = \dots = \Pi\Psi_i \quad (7.31)$$

$\hat{H}_i$ operatorı tek ψ_i tolqın funkciyasına tásirin esapqa alıp (7.27), (7.29), (7.31) tiykarında

$$[\check{\Psi}_{i(1)}]\hat{H}_1\psi_1 = [\check{\Psi}_{i(2)}]\hat{H}_2\psi_2 + \dots = E_2\check{\Psi}_i \quad (7.32)$$

(7.32) eki táepin $\check{\Psi}_i$ bólip hám (7.30) teńlemesin esapqa alıp tómendegige iye bolamız.

$$\frac{1}{\psi_1}\hat{H}_1\Psi_1 + \frac{1}{\psi_2}\hat{H}_2\Psi_2 + \dots = E_1 + E_2 + \dots \quad (7.33)$$

teńlemenin shep tárepindegi hár bir aǵza 1 elektronnıń koordinatasına baylanıslı, sonıń ushın bul teńleme bir elektronlı teńlemege ekvivalent boladı.

$$\left. \begin{aligned} \hat{H}_1\Psi_1 &= E_1\Psi_1 \\ \hat{H}_2\Psi_2 &= E_2\Psi_2 \\ \dots & \\ \dots & \end{aligned} \right\} \quad (7.34)$$

Solay etip, óz – ara kelisilgen maydandı kirgiziw kóp bóleksheli máseleni bir elektronlı máselege keltiredi.

$$\hat{H}\Psi = E\Psi \quad (7.35)$$

bul jerde $\hat{H}, \Psi(r), E$ - Gamiltonian, tolqın funkciyası hám elektronnıń kristalldaǵı energiyası. Eger kristaldaǵı elektron ushın $V(g)$ funkciya arqalı potencial energiyanı belgilesek, onda

$$V(r) = V(r) + \Omega(r) \quad (7.36)$$

Usı jaǵday ushın Shredenger teńlemesi tómendegi kóriniske iye boladı.

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m_0} \Delta + V(r) \right] \Psi(r) = E \Psi(r) \quad (7.37)$$

7.7-§. Elektronnıń effektiv massası

Erkin (vakuumda) háreket etip atırǵan elektronǵa sırtqı elektr maydan tásirinde óz háreket tezligin ózǵertirip (hámde baǵıtı hám muǵdarı jaǵınan) tezleniw aladı. Bul tezleniwdi Nyutonnıń 2 – nızamına muwapıq tómendegishe jazamız: $F = eE = ma = m d\vartheta/dt$. Endi kristalda jıllılıq tásirinde tártipsiz háreket etip atırǵan elektronǵa sırtqı elektr maydan qoyılǵanda onıń tezleniwi qanday boladı? Álbette ol erkin elektron háreketinen túpten parqlanadı, sebebi biz aldınǵı temalarda aytıp ketkenimizdey, bunday elektronǵa sırtqı elektr maydan kúshinen basqa jáne júdá kóp tásirler: basqa elektronlar, atom yadroları táhiri hámde kristall pánjere potencialı da tásir etedi. Bul halda elektronǵa tásir etip atırǵan kúshler $F = eE + F_u$ boladı. Biraq F_u – kúshinıń baǵıtı hám mánisi kristall pánjere potencialına sáykes ózgerip turǵanlıǵı ushın, endi kristaldaǵı elektronnıń háreketiniń baǵıtı trayektoriyasın anıq ólshew júdá qıyın boladı. Bul máseleni jaqsıraq túsiniw ushın tómendegi qubılıstı kórip shıqsaq. Hawada joqarıdan túsip atırǵan dene tezleniwi g bolsın, ol jerdiń tartıw kúshi $F_T = mg$ ańlatpadan anıqlanadı hám turaqlı mániske iye. Eger usı dene súyıqlıqqa túsirilgende onıń Arximedtiń iyteriw kúshi tásir etiwı nátiyjesinde onıń tezleniwi:

$$g = \frac{F_T - F_A}{m}, \quad F_A = \rho_s V g, \quad F_T = mg = \rho V g. \quad (7.38)$$

Bul jerde V – suyıqlıqtıń kólemi, ρ, ρ_s – hawa menen suyıqlıqtıń tıǵızlıǵı. Onda deneniń suyıqlıqtaǵı tezleniwi:

$$a = \frac{F_T - F_A}{m^*} = \frac{V(\rho - \rho_j)}{m^*} = \frac{F_T}{m^*}, \quad (7.39)$$

$$m^* = \frac{m}{1 - \frac{\rho_s}{\rho}}.$$

Bunnan kórinip turǵanıday, suyıqlıqtı deneniń awırlıq kúshi tásirindegi háreketi deneniń massası qandayda bir jańa halǵa m^* – effektiv massa túsiniǵı menen túsindiriw qolaylı. ρ_s/ρ nıń mánisine qarap, m^* m nen kishkene bolıp, oń hám teris boladı. Demek, bul halda suyıqlıq deneniń tezleniwine kórsetken tásirde deneniń effektiv massası arqalı kórsetpeydi. Mine usınday kristall pánjere potencialınıń sırtqı maydan qoyılǵanda elektronnıń tezleniwine tásin effektiv massa túsiniǵın kiritiw jolı menen júdá ańsat kórsetiw múmkin. Effektiv massa bul elektron háreketine sırtqı maydan hám kristall pánjere potencialın birgelikte kórsetilip atırǵan tásin kórsetiwshi shama boladı. Effektiv massa - massaǵa sáykes dene muǵdarı hám energiya ólshew birligine sáykes qásiyet emes, yaǵnıy ol elektronnıń massası esaplanbaydı. Bizge belgili, elektron elementar bólekshe bolǵanlıǵı ushın ol da bólekshe hám tolqınlıq qásiyetlerine iye. Kvant fizikasında tiykarınan elektronnıń energiyası onıń De-Broyl tolqın uzınlıǵı menen tómendegishe ańlatpa arqalı baylanısqa:

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

$$E = \frac{mv^2}{2}, \quad mv = p, \quad E = \frac{p^2}{2m}, \quad p = \hbar k \quad (7.40)$$

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

Bul jerde k – tolqın funkciyası, $k = \frac{\pi}{\lambda}$. λ – tolqın uzınlıǵı, $\hbar$ – Plank turaqlısı, p – elektron impulsi. Bul ańlatpanıń birinshi dárejeli tuwındısı elektronnıń tezligin beredi:

$$\frac{1}{\hbar} \frac{dE}{dk} = \frac{\hbar k}{m^*} V. \quad (7.41)$$

Ekinshi dárejeli tuwındısı bolsa tezleniwdi beredi:

$$a = \frac{dV}{dt} = \frac{1}{h} \frac{d}{dt} \left(\frac{dE}{dk} \right). \quad (7.42)$$

Sırttan qoyılğan maydan E , tásir etip atırğan kúsh $F = eE$ tásirinde atqarılğan jumıs dA bul berilgen waqıt ishinde elektronnıń tezliginiń ózgeriwi nátiyjesinde onıń energiyasın ózgerttiwden ibarat boladı, yaǵnıy,

$$dA - dE = FdS = F\bar{V}dt. \quad (7.43)$$

Bunda

$$\frac{dE}{dt} = F\bar{V}, \quad (7.44)$$

(7.44) ańlatpanı (7.43) ańlatpaǵa qoyıp, sırtqı tásir kúshin k ǵa baylanıslı bolmaǵanın esapqa alsaq

$$\bar{a} = \frac{d\bar{V}}{dt} = \frac{1}{h} F \frac{d\bar{V}}{dt},$$

(7.42) ańlatpadan jáne bir márte tuwındı alsaq, tómendegi ańlatpaǵa iye bolamız:

$$\bar{a} = \frac{d\bar{V}}{dt} = \frac{1}{h^2} F \frac{dE}{dk^2}. \quad (7.45)$$

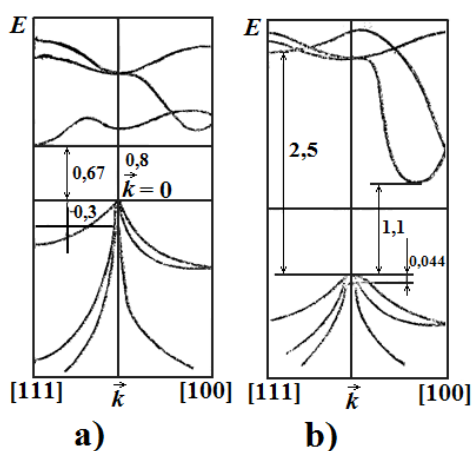
Endi bul ańlatpa Nyutonnıń 2 – nızamına sáykes keledi, onda

$$F = ma = h^2 \frac{1}{\frac{d^2 E}{dk^2}} \cdot a = m^* a, \quad (7.46)$$

$$m^* = \frac{h^2}{\frac{d^2 E}{dk^2}}. \quad (7.47)$$

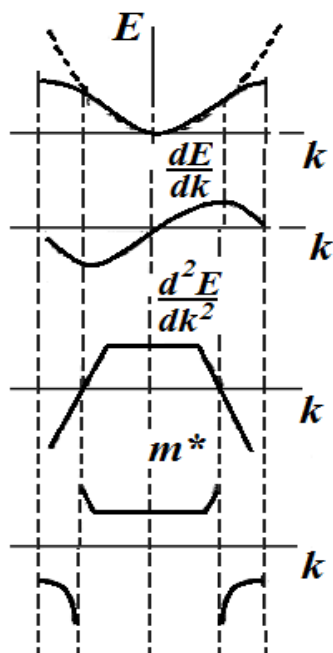
Bul ańlatpanı elektronnıń effektiv massası dep qabıl etemiz. Bul effektiv massa - ádettegi massaǵa sáykes bolǵan inerciya ólshemi, awırlıq tartıw kúshi hám zattıń muǵdarı sıyaqlı qásiyetlerge iye bolmaǵan shama. (7.42) - ańlatpaǵa sáykes yarımótkizgishlerdiń elektron energiyasınıń tolqın vektorına baylanıslı zonalar

diagramması keltirilgen. Bunnan kórinip turıptı, elektron energiyası bul tolqın vektóri boyınsha ózgeriwshi shama eken.



7.7 - **súwret.** Germaniy (a) hám kremniy (b) diń zonalıq strukturası.

Onda d^2E/dk^2 –yaǵnıy elektron effektiv massası ádettegi elektron turaqlısı turaqlı massasınan parqlı halda ózgeriwsheń mániske iye ekenligi anıqlandı. $E(k)$ grafikten kelip shıqqan halda d^2E^2/d^2k^2 hám $m(k)$ baylanıslılıǵı grafigi keltirilgen:



7.8 – **súwret.** Elektronnıń effektiv massası qásiyetiniń sxemalıq kórinisi.

Bul grafiklerden kórinip turǵanıday, effektiv massa mánisi óń hám teris bolıwı múmkin eken. Bunıń fizikalıq mánisi – elektron ótkiziwsheńlik zonasında óń effektiv massa menen, valent zonasında bolsa teris effektiv massa menen háreket etedi eken. Valent zonasındaǵı teris effektiv massaǵa iye bolǵan elektron ótkiziwsheńlik zonasındaǵı elektron háreketine keri hárekette boladı eken. Bunday jaǵdayda óń zaryadlangan gewek dep qabıl qılınǵan hám onıń háreketi bolsa elektron háreketin bir – birine uzatıw – estafeta háreketinen ibarat. Ya. Frenkel gewekler háreketin túsindiriw ushın mınaday mısál keltiredi. Teatrdań eń aldınǵı qatarında bir bos orın bar, teatr baslanıwı menen ekinshi qatardaǵı adam óz ornınan turıp sol orınǵa barıp otıradı. Óz náwbetinde endi ekinshi qatarda payda bolǵan bos orınǵa úshinshi qatardaǵı adam ótip aladı. Sonday etip hár bir aldınǵı qatarda payda bolǵan bos orınǵa onnan keyingi qatardaǵı adam ótip orınlardı tolıqtırıp baradı eken. Teatrda tánepisti járiyaladı, qarasańız, birinshi qatardaǵı 1 bos orın eń aqırǵı 1 qatarda payda boldı. Tań qalarlıqtay, bos orın háreket qılǵanday, bul háreket bos orın payda bolǵan qatardan keyingi qatardaǵı adamlardıń izbe – iz ornın toltırıwı sebepli júzege kelgenligi belgili boldı. Demek, bos orın adamlar háreketine keri baǵıt boyınsha háreket etedi, gewekler háreketi de mine usıǵan sáykes keledi. Júdá kóp yarımótkizgish materiallardıń kristall dúzilislerinde baǵıtları boyınsha hár qıylı bolǵanlıǵı, yaǵnıy anizotrop qásiyetke iye bolǵanlıǵı ushın effektiv massanıń mánisi de tenzor baǵıtına baylanıslı shama boladı. Belgili, *Ge* hám *Si* diń energetik zonalar dúzilisi ellipsoid formasında bolǵanlıǵı ushın, olarda elektron effektiv massası ellipsoid úlken hám kishkene kósherlerge salıstırǵanda 2 túrli boladı. Biraq $A^{III}B^V$ yarımótkizgish materiallarda energetik zonalar sferik bolǵanlıǵı ushın effektiv massa tenzorlıq shama esaplanbaydı. Tórende *Ge* hám *Si* yarımótkizgish materialları ushın elektron hám gewekler effektiv massalarınıń elektronnıń haqıyqıy massasına salıstırmalı berilgen. Bul bolsa usı materiallardıń fizikalıq qásiyetleri hám fundamentall parametrlerin úyreniwge, esaplawǵa qolaylılıq jaratadı.

7.2 – keste. *Ge* hám *Si* yarımótkizgish materialları ushın elektron hám geweklerdiń effektiv massalarınıń elektronnıń haqıyqıy massasına qatnası.

Yarımótkizgish	A	B	C	$\frac{m_{II}^*}{m_o}$	$\frac{m_{\perp}^*}{m_o}$	$\frac{m_{p1}^*}{m_o}$	$\frac{m_{p2}^*}{m_o}$	$\frac{m_{p3}^*}{m_o}$
Germaniy(<i>Ge</i>)	13,1	8,3	12,5	1,58	0,08	0,33	0,042	0,077
Kremniy (<i>Si</i>)	4,0	1,1	4,1	0,91	0,19	0,49	0,16	0,245

VII bapqa tiyisli sorawlar:

- 1) Atomlarda hár qıylı energetik hallarda bolǵan elektron basqa elementar bóleksheler – proton hám neytronlar menen qanday qatnasta baylanısqa?
- 2) Elektronlardıń atomlardagı energetik halları tórt kvant sanı menen anıqlanadı. Bul qanday kvant sanlar?
- 3) Kvant sanları bir – biri menen qanday qatnasta baylanısqa?
- 4) Bor usınǵan atomnıń planetar modelin aytıp berıń?
- 5) Pauli principiniń fizikalıq mánisi ne?
- 6) Eger atomda valent elektronlar payda etken energetik qáddiler tolmaǵan bolsa, onda qanday process júz beredi?
- 7) Qattı deneler esaplangan metall, yarımótkizgish hám dielektriklerde energetik zonalar qanday jaylasqa?
- 8) Tólcın sanı, tolcın vektorınıń fizikalıq mánisi ne?
- 9) Qattı denelerde elektron energiyası tolcın sanına qanday baylanısqa?
- 10) Elektronnıń effektiv massası ne?
- 11) Elektron qashannan hám teris effektiv massa menen háreket etedi?

VIII BAP

METALL – YARIMÓTKIZGISH KONTAKTI HÁM $p - n$ ÓTIW FIZIKASI

Hár qanday yarımótkizgish materiallardıń fizikalıq qásiyetlerin úyreniw hám yarımótkizgishli qurılımlardıń qásiyetlerin anıqlaw hámde olardı zamanagóy qurılımlarda paydalanıw ushın, olardı dereklerge yamasa basqa izbe – iz qurılımlarǵa jalǵaw, álbette metall kontaktler járdeminde ámelge asırıladı. Sonıń ushın metall – yarımótkizgish kontaktiniń sıpatı, halatı hám tábiyatına qarap, bunday kontaktlerdiń qásiyetleri túpten parqlanıwı múmkin. Sol sebepli házirgi zaman elektronikası hám integral sxemalarında kontakt máselesi júdá zárúr rol oynaydı. Bul máseleni anıǵıraq kórip shıǵıwdan aldın, metall – yarımótkizgish kontaktleriniń tábiyatın anıqlaytuǵın bazıbir fundamental túsinipler ústinde toqtap ótiwdi maqul kórdik.

8.1-§. Qattı denelerdegi shıǵıw jumısı

Shıǵıw jumısı bul – Fermi qáddinen elektronlardı vakuumǵa shıǵarıw ushın kerek bolǵan energiyaǵa aytıladı. Shıǵıw jumısınıń mánisi qattı denelerde $A \sim 1 \div 10 \text{ eV}$ aralığında bolıwı múmkin. Bizge belgili, metallarda Fermi qáddiniń mánisi temperaturaǵa, kirispe atomlar muǵdarına júdá kem baylanıslı bolǵanı ushın metallarda shıǵıw jumısınıń mánisin ulıwma turaqlı dep esaplasaqlı boladı. Shıǵıw jumısınıń mánisi kristall baǵıtlarına [111], [110], [100] da baylanıslı. Metallardaǵı shıǵıw jumısınıń mánisin anıqlawdıń hár qıylı usılları bar. Mısalı, eki metall kontakt potenciallar ayırmasınan ($\varphi = A_1 - A_2$), eger bunda kontakttegi qandayda bir metalldıń shıǵıw jumısı aldınnan belgili bolsa, ekinshi metalldıń shıǵıw jumısın tabıwǵa boladı. Kóp qollanılatuǵın bul – fotoelektrik metod bolıp, onda tiykarınan Eynshteyn formulası $h\nu = A + mv^2/2$ arqalı shıǵıw jumısın júdá úlken anıqlıq penen tabıw múmkin, bunda $h\nu$ – metall betine (katodqa) túsip atırǵan fotonnıń energiyası. Metallarda shıǵıw jumısın

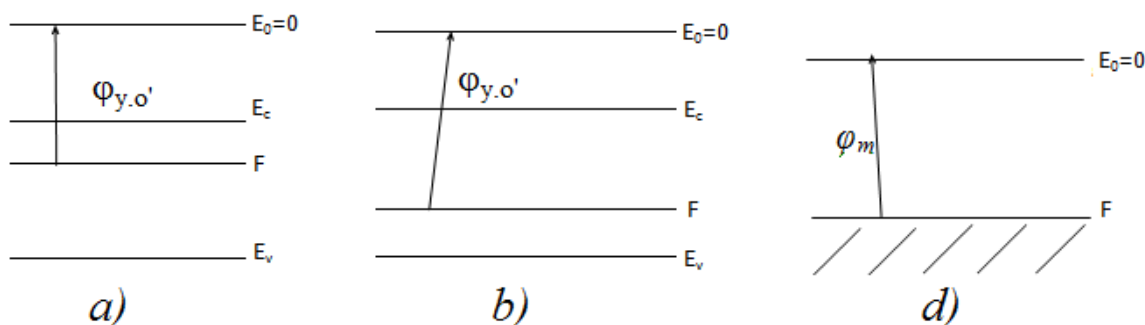
basqarıw (kemeyttiriw) aktiv isleytuǵın emitterlerdi islewde júdá zárúr áhmiyetke iye. Metall betine kirispe qayta islew beriw yamasa belgili basqa atomlardı ushırıw usılları menen shıǵıw jumısın ózǵerttiriw múmkin. 6.1 – kestede bazıbir polikristall metallardıń shıǵıw jumısı keltirilgen:

8.1 –keste. Bazıbir polikristall denelerdiń shıǵıw jumısları.

Zat	χ, eV	Zat	χ, eV
Mg	3,4	Cu	4,4
Al	4,1	Ag	4,7
Ni	4,5	Pt	5,3

Belgili, yarımótkizgish materiallarda Fermi qáddiniń mánisi temperatura, jaqtılıq ásirese, kirispe atomlar tábiyatı hám koncentraciyasına júdá baylanıslı bolǵanlıǵı ushın, olarda shıǵıw jumısınıń mánisi ózgerip turadı. Eger biz donor kirispe atomlar koncentraciyasın arttırıw jolı menen, Fermi qáddin ótkiziwshelik zonasına shekem, hámde onıń ishine shekem alıp kiriw múmkin bolsa, kerisinshe akceptor kirispe atomlar koncentraciyasın basqarıw jolı menen Fermi qáddin valent zonanıń ishinde jaylastırırıwımızǵa boladı.

Demek, yarımótkizgishlerde Fermi qáddi pútkil qadaǵan etilgen zona keńligi boyınsha ózǵerttiriw múmkin bolǵanlıǵı ushın, shıǵıw jumısınıń mánisi soǵan sáykes ózgeredi.



8.1 – súwret. a) *n* – tipli yarımótkizgishtegi shıǵıw jumısı, b) *p* – tipli yarımótkizgishtegi shıǵıw jumısı, d) metalldıń shıǵıw jumısı.

8.2-§. Metall – yarımótkizgish kontakti

Metall – yarımótkizgish kontaktlar óz tábiyatı, jaratılıwı, isletiliw qásiyetine qarap eki túrge – omliq kontaktler hám Shottki diodlarına bólinedi. Hár qanday qattı deneden vakuumğa termoelektron emissiya arqalı shıgatuğın elektron tok tıǵızlıǵı, usı qattı deneniń shıǵıw jumısı menen anıqlanadı. Eger ol yarımótkizgish bolsa, onda

$$J_{y.o'} = \frac{4\pi(kT)^2}{h^3} \cdot e^{-A_{y.o'}/(kT)}, \quad (8.1)$$

formula arqalı, eger ol metall bolsa, onda termoelektron emissiya tok tıǵızlıǵı, álbette metalldıń shıǵıw jumısı A_m ge baylanıslı halda

$$J_m = \frac{4\pi(kT)^2}{h^3} \cdot e^{-A_m/(kT)}, \quad (8.2)$$

ǵa teń boladı.

Endi biz yarımótkizgish hám metaldı tuwrıdan – tuwrı óz – ara kontaktke keltirsek, (8.1), (8.2) formulalarǵa muwapıq elektronlar aǵımı álbette $A_{y.o'}$ hám A_m ler mánisi menen anıqlanadı.

Birinshi halda $A_{y.o'} < A_m$ jaǵdayın kóreyik. (*yarımotkizgish n-tipli bolsın*). Bul halda elektronlar yarımótkizgish kontakt zonasınan metall kontakt zonasına óte baslaydı. Bul ótiw nátiyjesinde yarımótkizgish kontakt zonası elektronlardı joǵaltqan donor ionları esabınan oń zaryadlanadı, metalldıń kontakt zonası bolsa sáykes halda teris zaryadlanadı, yaǵnıy bunda kontaktte yarımótkizgishten metallǵa baǵıtlanǵan elektr maydanı payda boladı. Elektronlardıń yarımótkizgishten metallǵa ótiwi, kontaktte payda bolǵan elektr maydanı mánisi, endi bunday elektronlardıń ótiwine tolıq qarsılıq etiw dárejesine

jetkenshe dawam etedi. Onda yarımótkizgishten metallğa ótetuǵın elektron tok tıǵızlıǵı:

$$J_{y.o'} = \frac{4\pi(kT)^2}{h^3} \cdot e^{-(A_{y.o'} + \varphi)/kT}, \quad (8.3)$$

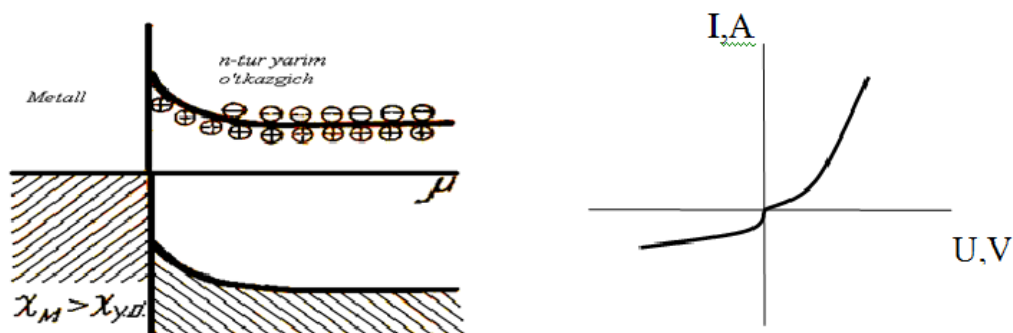
menen anıqlanadı, bul jerde φ –metall - yarımótkizgish kontakt zonasında payda bolǵan potencialdın mánisi bolıp, ol ($\varphi = A_m - A_{y.o'}$), ǵa teń boladı hám metaldan yarımótkizgishke ótetuǵın termoelektron emissiya tok tıǵızlıǵı ózgermeydi. Yarımótkizgishtin kontakt zonasında elektronların joǵaltqan teris donor ionları esabınan belgili qalınlıqqa iye bolǵan kólemlik zaryad zonası ($L_{y.ó}$) payda bolsa, mine usınday yarımótkizgishke ótken kirispe elektronlar esabınan metall kontakt zonasındaǵı teris zaryadqa iye bolǵan kólemlik zaryad qalınlıǵı (L_m) payda boladı. Bul kólemlik zaryad qalınlıǵı metall hám yarımótkizgishtegi elektronlar koncentraciyası menen anıqlanadı.

$$L_{y.o'} = \frac{A_m - A_{y.o'}}{4\pi e^2 \varepsilon n_{y.o'}} = \frac{A_m - A_{y.o'}}{4\pi e^2 \varepsilon N_d}, \quad L_m = \frac{A_m - A_{y.o'}}{4\pi e^2 \varepsilon n_m}, \quad (8.4)$$

(8.4) – formulaǵa muwapıq, eger $A_m - A_{y.o'} \sim 1 \text{ eV}$, $n_{y.ó} \sim 10^{16} \text{ sm}^{-3}$, $n_m \sim 10^{22} \text{ sm}^{-3}$ mánislerin alsaq, onda kórinip turǵanıday $L_{y.ó}$ niń mánisi L_m nen 10^5 ese kóp boladı ($L_{y.ó} \sim 30 \mu\text{m}$, $L_{y.ó} \sim 10 \text{ Å}$). Demek, payda bolǵan kólemlik zaryad qalınlıǵı tiykarınan yarımótkizgish tárepinen boladı eken. Yarımótkizgish kontakt zonasında payda bolǵan kólemlik zaryad bul zonadaǵı elektronlar bólistiriliwine tásir etedi yaǵnıy kontaktten yarımótkizgish ishine kirgen sayın elektronlar koncentraciyası artadı hám n_0 ǵa yaǵnıy yarımótkizgish kólemindegi elektronlar koncentraciyasına teńlesedi:

$$n(x) = n_0 e^{-\varphi(x)/kT}. \quad (8.5)$$

Bul halattaǵı metall – yarımótkizgish kontakt zona diagramması hámde VAX sı 8.2 – súwrette kórsetilgen.

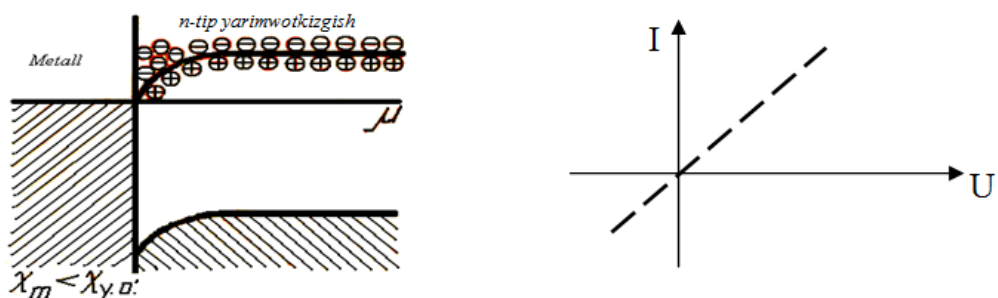


8.2 – súwret. Metall hám n – tipli yarımótkizgish kontakt zonalar diagramması hámde VAX sı $\chi_m > \chi_{y.ó}$ halı ushın.

Eger n – tipli yarımótkizgishtiń shıǵıw jumısı $A_{y.ó}$, metalldıń shıǵıw jumısınan úlken bolsa, onda joqarıdaǵı (8.4) hám (8.5) - teńlemelerge muwapıq elektronlardıń metalda termoemissiya boyınsha aǵımı, yarımótkizgishtegi termoemissiya elektronlar aǵımınan kóp boladı. Nátiyjede yarımótkizgishtiń metall menen kontakt zonası metaldan ótken elektronları menen bayıtıladı, yaǵnıy ol jerde elektronlar koncentraciyası endi, yarımótkizgish kólemindegi elektronlar koncentraciyasınan kóp boladı hám teris zaryadqa iye bolǵan zona payda boladı. Usı menen birge metall kontakttıń usıǵan sáykes elektronlardı joǵaltqan ionlar esabınan oń zaryadlangan kólemlik zaryad zonası payda boladı. (8.4), (8.5) teńliklerge muwapıq, metaldaǵı kólemlik zaryad zonasınıń qalınlıǵı, yarımótkizgishte payda bolǵan teris zaryad kólemlik zaryad zonasınıń qalınlıǵınan júdá kem boladı. Endi yarımótkizgish kontaktı zonasındaǵı elektronlar bólistiriliwi bolsa

$$n = n_o \cdot e^{\frac{A_m - A_{y.ó}}{kT}} = n_o \cdot e^{\varphi(x)/kT}, \quad (8.6)$$

menen anıqlanadı. Bul halattaǵı metall – yarımótkizgish kontakt zonalar diagramması 8.3 – súwrette keltirilgen.

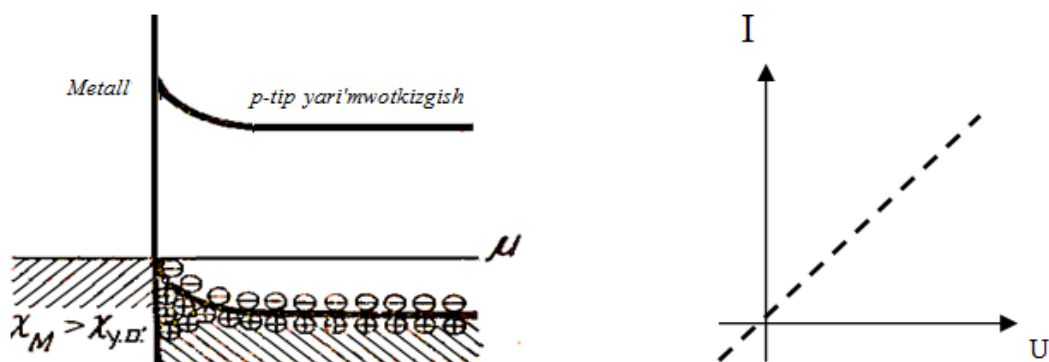


8.3 – *súwret.* Metall hám n -tipli yarımótkizgish kontakt zonalar diagramması hámde VAX s $\chi_m < \chi_{y.o}$ halı ushın.

Endi p – tipli kremniy menen metall kontakt haqqında azǵana toqtap óteyik. Dáslepki halatta $A_{y.o} < A_m$ bolsın. Bul halda joqarıda keltirilgendey, metaldan yarımótkizgishke ótip atırǵan elektronlar aǵımı, yarımótkizgishten metallǵa ótip atırǵan elektronlar aǵımınan kóp boladı hám nátiyjede metaldan ótken elektron, yarımótkizgish kontakt zonasındaǵı gewekler menen rekombinaciyaǵa kirisip (sebebi biz kórip atırǵan material p – tipli) gewekler koncentraciyasın kemeyttiredi. Bul process tuwrıdan – tuwrı kontakt zonasında júdá aktiv hámde yarımótkizgish ishine kirgen sayın ástelesedi. Nátiyjede yarımótkizgish kontakt zonasında óz geweklerin joǵaltqan akceptor teris zaryadqa iye Bor atomları esabınan teris zaryadlangan kólemlik zaryad zonası payda boladı. Bul zonanıń qalınlıǵı (keńligi) álbette (8.7) teńlikke muwapıq p – tiptegi gewekler koncentraciyası menen anıqlanadı, biraq ol metall kontakt shegarasında payda bolǵan oń zaryadlı kólemlik zaryad qalınlıǵınan júdá úlken boladı. Yarımótkizgish kontakt shegarasındaǵı gewekler bólistiriliwi tómendegishe anıqlanadı:

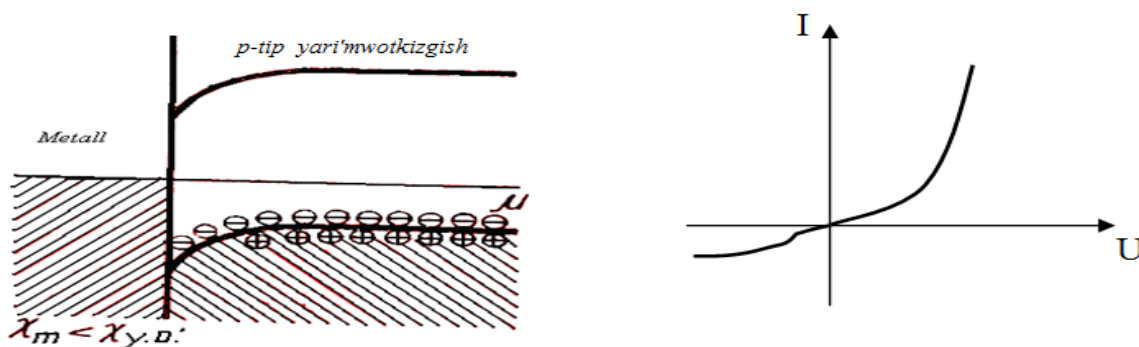
$$p = p_o e^{\frac{-A_{y.o} - A_m}{kT}} = p_o e^{\frac{-\varphi(x)}{kT}}. \quad (8.7)$$

Bunday kontakt zonalar dúzilisi hám VAX sı tómendegi 6.4 – súwrette keltirilgen.



8.4 – súwret. Metall hám p – tipli yarımótkizgish kontakt zonalar diagramması hámde VAX sı. $\chi_m > \chi_{y.o.}$ halı ushın.

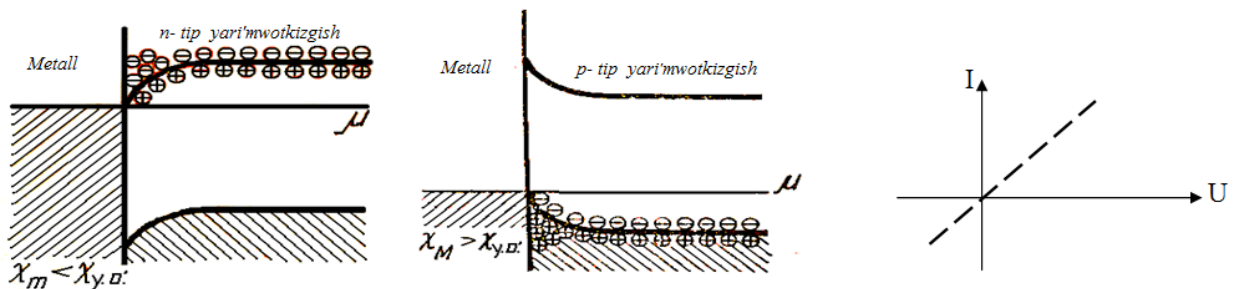
Endi keyingi jaǵdayda p – tipli yarımótkizgishtiń shıǵıw jumısı $A_{y.o.}$ úlken bolsın, metalldıń sıǵıw jumısı A_m nen, $A_{y.o.} > A_m$. Bul jaǵdayda elektronlardı yarımótkizgishten metallǵa ótiw aǵımı, keri baǵıttaǵı elektronlar aǵımınan kóp boladı. p – tipli yarımótkizgishten elektronlardıń metallǵa ótiwi nátiyjesinde (álbette elektronlar valent zonaǵa ótedi), yarımótkizgish kontakt zonasında gewekler koncentraciyası artadı, yaǵnıy bul zona gewekler menen toydırılǵan bolıp qaladı. Bunday kontaktler zonalar diagramması tómendegi 8.5 – súwrette keltirilgen:



8.5 – s úwret. Metall hám p – tipli yarımótkizgish kontakt zonalar diagramması hámde VAX sı. $\chi_m < \chi_{y.o.}$ halı ushın.

8.3-§. Omlıq kontakt

Omlıq kontakt degende – metall – yarımótkizgish kontaktine sırttan elektr deregin jalǵaǵanda, elektr maydan baǵıtına qaramastan, bunday kontaktten ótip atırǵan tok mánisi qoyılǵan elektr maydan mánisine sáykes halda tuwrı sızıqlı yaǵnıy Om nızamı $I = U/R$ boyınsha ózgeriwin támiynleytuǵın kontaktke aytıladı. Bunday kontakt payda etiwdiń tiykarǵı shárti bul metall – yarımótkizgish kontakt qarsılıǵın, tiykarınan yarımótkizgish kontakt zonasınıń qarsılıǵı onıń kólemlik salıstırmalı qarsılıǵınan júdá kishkene bolǵanda ǵana orınlanadı. Bul bolsa óz gezeginde yarımótkizgish kontakt zonasınıń tok tasıwshılar (elektron yamasa gewekler) menen toldırılǵan jaǵdayında júz beredi. Biz joqarıda kórsetkenimizdey, bul tek n - tipli yarımótkizgish ushın $A_{y.o'} > A_m$, p - tipli yarımótkizgish ushın $A_{y.o'} < A_m$ bolǵanda ǵana orınlanadı. Demek, yarımótkizgishlerde metall omlıq kontakt zonalar dúzilisi tómendegi 8.6 - súwretlerdegi halǵa sáykes keledi. Bunday kontaktlardıń Volt – Amperlik xarakteristikası tómendegishe boladı:



8.6 – *súwret. Omlıq kontakt zonalar diagramması hám VAX sı.*

Tómendegi kestede tiykainan yarımótkizgish materiallarındaǵı omlıq kontakt payda etiw ushın isletiletuǵın materiallar keltirilgen:

8.2 – keste. Yarımótkizgish materiallarındagı omliq kontakt payda etiw ushın isletiletuǵın materiallar.

Birikpe quramı	Qollanıw shegarası
Sn + (CH ₃ CHOHCOOH)	Ge
Au + Si + Al 90% : 7% : 3%	Si <i>n</i> – tip
Au + Si + Sb 90% : 7% : 3%	Si <i>n</i> – tip
In	GaAs ($n = 10^{18} \div 10^{19} \text{ sm}^{-3}$)
In	Galiy antimonidi
In	Indiy antimonidi
In + Te 97% : 3%	Legirlengen As hám galiy fosfidi <i>n</i> – tip ($n = 10^{16} \div 10^{18} \text{ sm}^{-3}$)
In + Zn 95% : 5%	Legirlengen As hám galiy fosfidi <i>p</i> – tip
Sn + (SnCl ₂)	GaAs <i>n</i> – tip ($n = 10^{14} \div 10^{16} \text{ sm}^{-3}$)
WNi (kólemge sal ıst ırǵanda 2:1)	Karbit kremniy <i>n</i> hám <i>p</i> – tipler ($\rho = 10^{-3} \div 10^2 \text{ Om}\cdot\text{sm}$)
Ta + Au + Al 45% : 40% : 5%	Karbit kremniy <i>p</i> – tip ($\rho \geq 10 \text{ Om}\cdot\text{sm}$)
Ta + Au 50% : 50%	Karbitkremniyn – tip ($\rho \geq 10 \text{ Om}\cdot\text{sm}$)

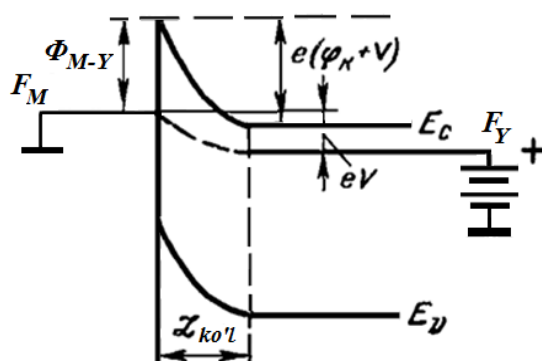
8.4-§. Shottki diodi

Joqarıda keltirilgen – tipli yarımótkizgishtiń shıǵıw jumısı, metalldıń shıǵıw jumısınan kishkene bolǵanda $A_{y.o'} < A_m$ yamasa *p*– tipli yarımótkizgishtiń shıǵıw jumısınıń mánisi metalldikinen úlken bolǵanda $A_{y.o'} > A_m$, yarımótkizgish kontakt zonasında belgili qalınlıqqa ($10 \div 50 \mu\text{m}$) iye bolǵan kólemlik zaryad zonası payda boladı. Bul kólemlik zaryad zonalarında erkin zaryad tasiwshılar koncentraciyası (elektron yamasa gewek) yarımótkizgish

kólemindegi zaryad tasıwshılar koncentracıyainan júdá az boladı hám olardıń bólistiriliwi tómendegishe boladı:

$$n = n_o e^{\frac{-\varphi(x)}{kT}}, \quad p = p_o e^{\frac{-\varphi(x)}{kT}}. \quad (8.8)$$

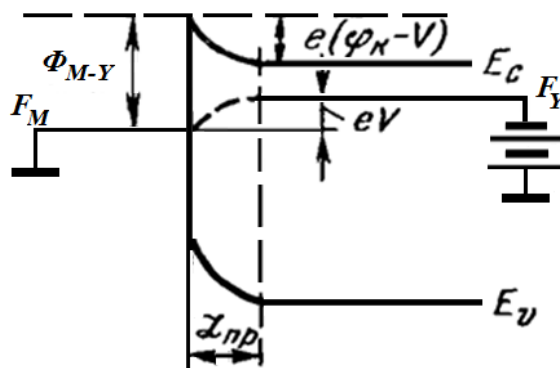
Demek, bunday kontaktte tok tasıwshılar háreketinde payda bolǵan kontakt potencialı φ tosqınlıq etedi. Bunday kontaktke sırtqı derek jalǵanǵanda metall hám yarımótkizgishke derektiń qanday polyusları (+ yamasa -) jalǵanıwına qarap, kontakt potencialın jeterli dárejede ózǵerttiriw múmkin, demek kontakt arqalı ótip atırǵan muǵdarı sırtqı derek baǵıtına júdá baylanıslı boladı eken. Joqarıdaǵı kórsetilgen sonday kontaktqa sırtqı derekti jalǵastırayıq. Bunda derektiń $\langle\langle + \rangle\rangle$ polyusına n - tipli yarımótkizgish, $\langle\langle - \rangle\rangle$ polyusına bolsa metalldı jalǵayıq.



8.7 –s úwret. Metall – yarımótkizgish kontakti sırtqı derekke kerı jalǵaǵandaǵı halatı.

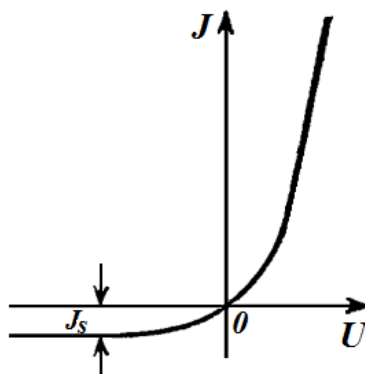
Bunda kontakt potencialınıń mánisi φ , sırtqı qoyılǵan maydan baǵıtı sáykes halda artadı. Buǵan sebep kontaktte payda bolǵan hám sırtqı derek elektr maydanı baǵıtları bir qıylı bolıwı menen birge, yarımótkizgishke jalǵanǵan derektiń $\langle\langle + \rangle\rangle$ polyusı onıń ishkerisinen elektronlardı tartadı, nátiyjede, kólemlik zaryad keńligi de artadı. Endi bunday kontaktten elektronlardıń yarımótkizgishke ótiw itimallıǵı sırtqı maydanniń muǵdarı artqan sayın kemeyip baradı hám soǵan sáykes halda tok da júdá kem boladı. Derektiń bunday jalǵanıwı kerı baǵıtta jalǵanıwı dep qabıl etilgen. Demek, bunday kerı jalǵanıw halatında metall – yarımótkizgish kontaktinen ótip atırǵan toktıń mánisi júdá kishkene hám sırtqı

derek kernewine júdá kem baylanıslı boladı eken. Eger endi yarımótkizgishke derektiń teris, metallǵa derektiń oń polyusların tutastıratuǵın bolsaq, onda sırtqı derek elektr maydan baǵıtı menen metall – yarımótkizgish kontaktindegi elektr maydan baǵ ıtları bir – birine qarama – qarsı halatta boladı.



8.8 – s úwret. Metall – yarımótkizgish kontakti sırtqı derekke tuwrı jalǵaǵandaǵı halatı.

Bul halatta yarımótkizgishke sırtqı derekten elektr aǵımın kirip keliwi menen, yarımótkizgish kontakt zonadaǵı kólemlik zaryad muǵdarı hám qalınlıǵı kemeyiwi nátiyjesinde, kontakt potencıalları ayırması $\varphi = A_{y.o'} - A_m$ kemeyedi. Bul bolsa óz nábvetinde elektronlardıń yarımótkizgishten metallǵa ótiw aǵımın arttıradı. Sırtqı maydan artqan sayın kontakt potencıalı sonsha kemeyedi. Eger bunday metall – yarımótkizgish kontaktiniń Volt – Amper xarakteristikasına dıqqat penen itibar bersek, bunday qurılmanan tok bir baǵıt boyınsha júdá kishkene hám sırtqı elektr maydan mánisine baylanıslı bolmaǵan jaǵdayda ekinshi baǵıt boyınsha bolsa mánisi sırtqı elektr maydan artıwı menen eksponencial artatuǵın mánisine iye boladı:



8.9 – súwret. Metall – yarımótkizgish kontaktiniń Volt – Amper xarakteristikası.

Bunday qurılma tuwrılaǵısh sıpatında qollanıladı. Sonıń ushın bunday qurılma Shottki diodı dep ataladı. Demek, Shottki diodı ádettegi $p-n$ diodınday tuwrılaǵısh wazıypasın atqaradı, biraq onnan tiykarǵı ayırmashılıǵı – Shottki diodında tok tasıwda tek elektronlar qatnasadı. ($p-n$ ótiw diodlarında da elektron da gewekte qatnasadı). Elektronlardıń háreketshenligi gewekler háreketshenliginen ádette 5 – 6 ese úlken bolǵanlıǵı ushın Shottki diodları $p-n$ diodlarınan joqarı jiyiliklerde islew imkanın beredi. Kremniyli Shottki diodların alıw texnologiyası bul – júdá jaqsı tazalanǵan SiO_2 qatlamları bolmaǵan Si betinde joqarı vakuumda metallardı úplew jolı menen alınadı. Keyingi waqıtlarda júdá jaqsı Shottki diodları Si betinde hár qıylı metall silicidlerin payda etiw menen alınǵan materiallar tómendegi kestede Shottki diodların alıw ushın isletiletuǵın metallar hám silicidler keltirilgen:

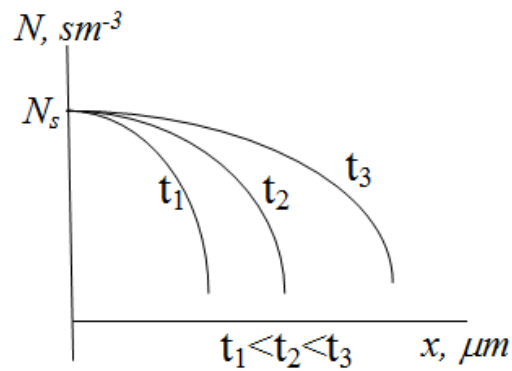
8.3 – keste. Shottki diodların alıw ushın isletiletuǵın metall silicidler.

Metall silicidi	Payda bolıw temperaturası, T (K).	Eriw temperaturası, T (K).	Metall silicidi	Payda bolıw temperaturası, T (K).	Eriw temperaturası, T (K).
CoSi	400	1460	Mn ₁₁ Si ₁₉	800a	1145
CoSi ₂	450	1326	MoSi ₂	1000a	1980
CrSi ₂	450	1475	TaSi ₂	750a	2200
HfSi	550	2200	TiSi ₂	650	1540
IrSi	300	-	ZrSi ₂	600	1520

8.5-§. $p-n$ ótiwdi alıw texnologiyası

n hám p tipke iye bolǵan yarımótkizgishlerdi tuwrıdan – tuwrı bir – birine kontaktke keltiriw jolı menen $p-n$ ótiw payda bolmaydı, sebebi, hár qanday jaqsı islengen 2 yarımótkizgish betlerin kontaktke keltirilgende olar ortasında belgili

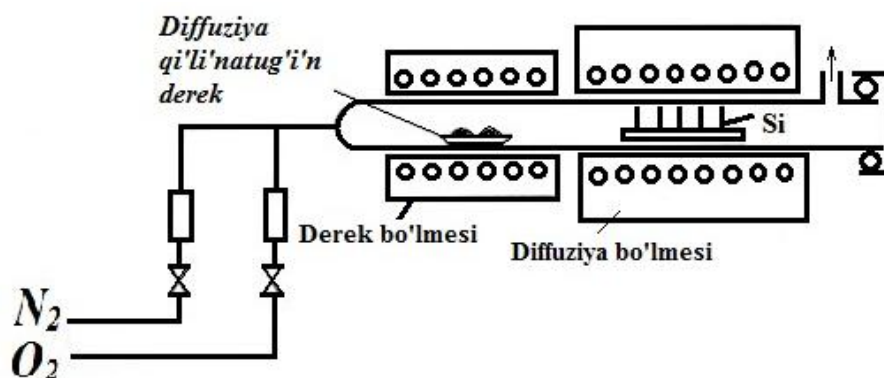
bir boslıq qalıwı, betlerde adsorbciya qılınğan basqa atomlar hám defektler hámde SiO_2 qatlamları barlıǵı sonday – aq, bunday kontakt járdeminde hesh qashan atomlar dúzilisiniń úziliksiz izbe – izligin támiyinlew imkaniyatı bolmaǵanlıǵı sebepli. $p-n$ ótiw payda etiwdiń túrli jolları bar – joqarı vakuumda belgili bir metallı kremniyge kontaktke keltirip, evtetik temperaturasına shekem qızdırıw jolı menen, mısalı, $Al - nSi$ di $550^{\circ}C$ qızdırǵanda kontakt shegarasında taza Al menen toyındırılǵan p – tipke iye bolǵan shegara payda boladı. Yarımótkizgish betinde oǵan qarama – qarsı tipke iye bolǵan juqa epitakcial qatlamlardı payda etiw jolı menen yamasa yarımótkizgish betinde ondaǵı kirispe atomlar tábiyatına keri bolǵan kirispe atom ionların implantaciya etiw jolı menen alınadı. Biraq házirgi zaman elektronika hám mikroelektronikasında eń tiykarǵı qollanılatuın usıl bul – planar texnologiya yaǵnıy diffuziyalıq texnologiya bolıp esaplanadı. Diffuziyalıq texnologiyada $p - n$ ótiw payda etiletuǵın materialdıń tiykarǵı parametrleri – qanday tiptegi kirispe atomları menen ligerlengen, olardıń koncentraciyasında qanday tereńlikte $p-n$ ótiw payda etiw kerekligin aldınnan bilgen halda, oǵan qanday kirispe atomları qansha temperaturada hám qansha waqıtta diffuziya qılıw kerekligi esaplap shıǵıladı. Bunda álbette biz diffuziya qılınıp atırǵan kirispe atomlarınıń diffuziya koefficientin eriwsheńlik temperaturasına baylanıslı mánislerin anıq biliwimiz kerek. Eger biz úyrenip atırǵan material p – tipke iye hám ondaǵı akceptor kirispe atomları koncentraciyası (yaǵnıy gewekler koncentraciyası) $N_A = 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ bolatuǵın bolsa, biz onda diffuziya qılınatuǵın kirispe atomları álbette donorlıq qásiyetke iye bolıwı hám sonday temperaturada diffuziya etiliwi kerek, onda yarımótkizgish betinde diffuziya waqıtında kirgen donor kirispe atomları koncentraciyası (yaǵnıy elektronlar koncentraciyası) materialdaǵı bar akceptor kirispe atomlar koncentraciyasınan $10^2 \div 10^3$ ese úlken bolıwı kerek. Biz joqarıdaǵı temalarda aytıp ótkenimizdey, diffuziya hámme waqıt derekten ámelge asırılǵanlıǵı ushın onıń bólistiriliwi 6.10 súwrette kórsetilgendey boladı:



8.10 – súwret. Diffuziya turaqlı derekten ámelge asırılǵandaǵı bólistiriliwi.

Bul kórsetilgen úsh shegaranı kórip shıǵayıq. I – shegarada diffuziya nátiyjesinde kiritilgen donor kirispe atomlar koncentraciyası bar akceptor kirispe atomlar koncentraciyasınan úlken, álbette 8.10 – súwrette kórsetilgenindey bul qatnas kristall betinen onıń ishine kirgen sayın ózgerip baradı. Demek, bul shegarada $N_D > N_A$ yamasa $n > p$ orınlanganlıǵı ushın material n -tipke iye boladı (bul jerde donor kirispe atomlarınan shıqqan elektronlar akceptor kirispe atomların payda etken gewekler menen rekombinaciyalanıp, qalǵan bólegi ótkiziwsheńlik zonasına shıǵadı $n = N_D - N_A$ hám material n -tipke iye boladı). II – shegarada bolsa $N_D = N_A$ ($n = p$), bunda donordan shıqqan barlıq elektronlar, akceptor valent zonada payda etken barlıq gewekler menen rekombinaciyalanadı hám nátiyjede donor hámde akceptor kirispe atomları esabınan payda bolǵan erkin elektronlar hám qalmaydı. Tek ǵana kórilip atırǵan temperaturaǵa sáykes menshikli zaryad tasıwshılar boladı, demek, bul shegarada material menshikli yarımótkizgishke eń úlken salıstırmalı qarsılıqqa iye bolǵan materialǵa aylanadı. Mine usı $N_D = N_A$ bolǵan shegara p - n ótiw ornı yarımótkizgish betinen mine usı orınǵa shekem bolǵan aralıq p - n tereńligi dep ataladı. III – shegarada bolǵan donor kirispe atomları bar akceptor kirispe atomlar koncentraciyası kem bolǵanlıǵı ushın $N_D - N_A = p_0 - N_D = p$, material p -tipke iye boladı hám p - n ótiw shegarasınan uzaqlasqan sayın p - muǵdarı artıp p_0 ge jaqınlasadı. p - n ótiwdiń diffuziyalıq texnologiyası basqa usıllarǵa salıstırǵanda qálegen tereńlikte,

júdá anıqlıq penen $p-n$ ótiw payda etiw imkánın beredi. Sonın ushın da bul planar texnologiya dep ataladı. Keyin bul $p-n$ ótiw payda etilgen plastinkalarda jáne kirispe hám basqa operaciyalardı orınlaw arqalı, qálegen ólshemdegi ápiwayı yamasa quramalı integral sxemalardı jaratıw múmkin. Tómendegi 8.11 – súwrette diffuziya ámelge asırılatuǵın pechler hám onda jaylasqan yarımótkizgish kristalları kórsetilgen:

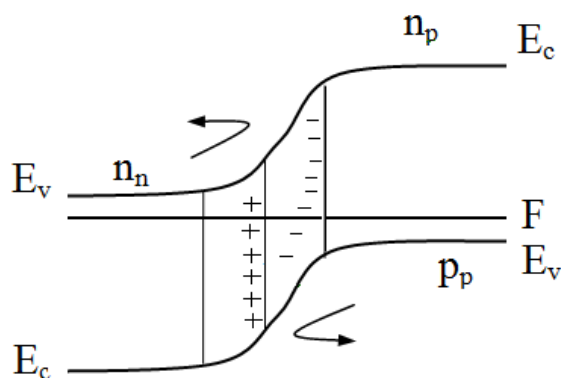


8.11 – súwret. Diffuziya ámelge asırılatuǵın pechler hám onda jaylasqan yarımótkizgish kristallı.

8.6-§. $p-n$ ótiw fizikası

Tómendegi súwrette ele kontaktqa keltirilmegen n hám p yarımótkizgish materialları modeli hám zonalar dúzilisi keltirilgen. Kórinip turǵanıday, hár bir materiallardıń qálegen noqatında hámme waqıt elektron neytrallıq shártı orınlanadı, sebebi $n-$ tiptegi erkin elektronlar sanı, óń zaryadlangan elektronlardı payda etken donor atomlar koncentraciyasına, $n-$ tipte bolsa gewekler koncentraciyası olardı payda etken teris zaryadlangan akceptor atomları koncentraciyasına teń. $p-$ tipte Fermi qáddi ótkiziwsheńlik zonasına jaqın, $p-$ tipte bolsa valent zona átirapında jatadı. Endi bulardı kontaktke keltiremiz (yaǵnıy diffuziyalıq usıllar) $p-n$ shegarasındaǵı elektron hám gewekler bólistiriliwindegi gradient esabınan $n-$ tipli yarımótkizgishtiń kontakt

shegarasındağı gewekler menen rekombinaciya boladı. Tap usınday gewekler de p - tipli yarımótkizgishten n - tipli yarımótkizgish kontakt shegarasına diffuziya qılınıp, ol jerdegi elektronlar menen rekombinaciya boladı. Nátiyjede n - tipli yarımótkizgish kontakt shegarasında elektronlardı joǵaltqan oń zaryadlangan donor ionlar , p - tipli yarımótkizgish kontakt shegarasında óz geweklerin joǵaltqan zaryadlangan akceptor ionları payda bola baslaydı, elektron hám geweklerdiń diffuziya arqalı bunday ótiwleri, kontaktte júzege kelgen potencial tosıqtı keskin arttırıwǵa hám nátiyjede bul zonada Fermi qáddileri teńleskende potencial tosıqlar óz maksimum mánisine erisedi. Bul halat p - n ótiwde teń salmaqlıq halatı bolıp esaplanadı. p - n ótiwde payda bolǵan elektr maydanı óz baǵıtı boyınsha elektronlardıń n - tipten p - tipke hám geweklerdi bolsa p - tipten n - tipke ótiwine tosqınlıq etedi, tiykarǵı zaryad tasıwshılardıń p - n ótiwde diffuziyaǵa qarsılıq etedi. Biraq bul payda bolǵan elektr maydanı p - tipte tiykarǵı bolmaǵan zaryad tasıwshılar elektronlardı p - tipke hám n - tipte tiykarǵı bolmaǵan zaryad tasıwshılar geweklerdi n - tipke ótiwine járdem beredi. Sebebi bunday tiykarǵı bolmaǵan zaryad tasıwshılarǵa p - n ótiwde potencial tosıq joq. p - n ótiwdiń teń salmaqlıq jaǵdayındağı zonalar diagramması 8.11 – súwrette keltirilgen:



8.11 – súwret. p - n ótiwdiń teń salmaqlıq jaǵdayındağı diagramması.

Bul jaǵdayda $p-n$ ótiwde potencial tosıqtı jeńiwge energiyası ketken tiykarǵı zaryad tasıwshılar payda etken diffuziyalıq tok (J_{nn}, J_{pp}) hám $p-n$ ótiwdegi elektr maydanı tásirinde buǵan keri baǵıtta háreket etip atırǵan tiykarǵı bolmaǵan zaryad tasıwshılar payda etip atırǵan dreyf tokları (J_{np}, J_{pn}) bir – birine teń boladı hám $p-n$ ótiwden tok ótpeydi.

$$J_{nn} + J_{pp} = J_{np} + J_{pn}. \quad (8.9)$$

Demek, $p-n$ ótiwde hámme waqıt tiykarǵı zaryad tasıwshılar diffuziyası nátiyjesinde júzege keletuǵın diffuziyalıq tok hám oǵan qarama – qarsı baǵıtlanǵan $p-n$ ótiwdegi elektr maydanı tásirinde tiykarǵı bolmaǵan zaryad tasıwshılar háreketi sebebinen payda bolatuǵın dreyf toki júzege keledi. $p-n$ ótiwde payda bolatuǵın potencial tosıq mánisi φ , n hám p – tipli yarımótkizgishtegi Fermi qáddiler mánislerine baylanıslı hám olardıń ayırmasına teń boladı:

$$\varphi = F_n - F_p. \quad (8.10)$$

F_n hám F_p mánislerin joqarıdaǵı ańlatpalarǵa muwapıq, $p-n$ ótiwdegi potencial tosıqtıń tuwrıdan – tuwrı n hám p materiallardaǵı donor (N_d) hámde akceptor (N_a) kirispe atomları yamasa tiykarǵı tok tasıwshılar n_n, p_p koncentraciyasına baylanıslı qatnasın tómendegishe jazıw múmkin:

$$\varphi = kT \ln \frac{n_n p_p}{(n_i)^2} = kT \ln \frac{N_d N_a}{(n_i)^2}, \quad (8.11)$$

bul jerde n_i – berilgen temperaturadaǵı menshikli zaryad tasıwshılar koncentraciyası. (8.11) ańlatpadan kórinip turǵanıday, temperatura artıwı menen potencial tosıqtıń mánisi kemeyedi, sebebi bul jerdegi menshikli zaryad tasıwshılar koncentraciyası (n_i) temperatura artıwı menen eksponencial nızam menen artadı. Endi $p-n$ ótiwde payda bolatuǵın kólemlik zaryadlar keńligi de n hám p – tipli yarımótkizgish materiallardaǵı donor hám akceptor kirispe atomları koncentraciyasına baylanıslı eken:

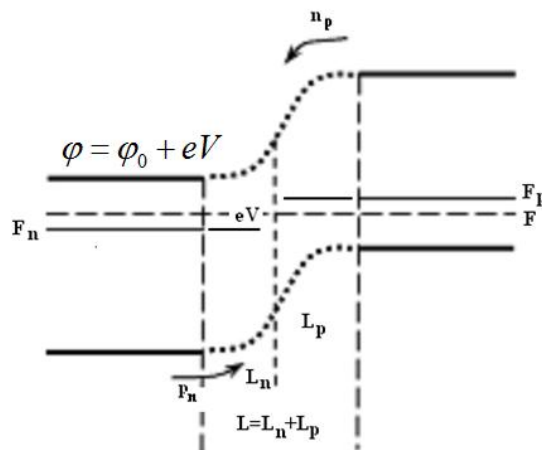
$$L_n = \left(\frac{\kappa \cdot \varphi}{4\pi e N_d} \right)^{1/2} L_p = \left(\frac{\kappa \cdot \varphi}{4\pi N_a} \right)^{1/2}, \quad (8.12)$$

bul jerde κ – materialdın dielektrik turaqlısı. (8.12) ańlatpadan kórinip turǵanıday, eger $N_d > N_a$ bolsa, p – tipli materialda payda bolatuǵın kólemlik zaryad keńligi, n – tiptegiden kóbirek bolıwı múmkin. Onda kólemlik zaryadlar keńligi qatnasların tómendegishe jazıw múmkin:

$$\frac{L_n}{L_p} = \left(\frac{N_a}{N_d} \right)^{1/2}. \quad (8.13)$$

8.7-§. p – n ótiwge sırtqı derek jalǵanǵandaǵı jaǵdayı

p – n ótiwge iye bolǵan yarımótkizgish qurılmanıń n – tipli tárepke derektiń $< + >$, p – tipli tárepine bolsa derektiń $< - >$ polyusların jalǵayıq:



8.12 –súwret. Keri maydanda p – n ótiw.

Bul jaǵdayda sırtqı maydan menen p – n ótiwdegi elektr maydan baǵıtları bir – birine sáykes túsedi. Nátiyjede n – tipten elektronlar derek jalǵanǵan kontakt tárepke, p – tipten gewekler de derek jalǵanǵan kontaktke aǵıp óte baslaydı. n hám p kontakt shegarasındaǵı kólemlik zaryad keńligi artadı hám kontakt potencial mánisi endi $\varphi = \varphi_0 + eV$ ǵa teń boladı, yaǵnıy artadı. Nátiyjede p – n ótiwdegi tiykargı zaryad tasıwshılar aǵımı, yaǵnıy diffuziyalıq tok muǵdarı

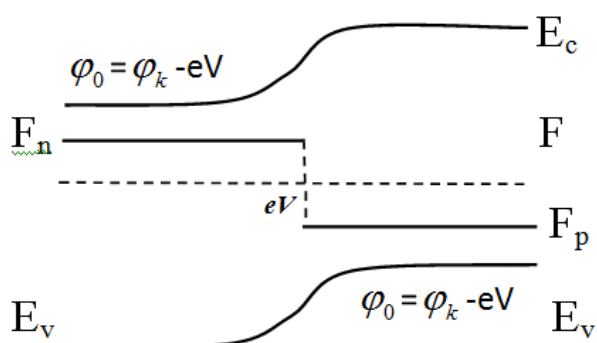
kemeyedi hám eV (sırtqı maydan potencialı) artıwı menen tiykarǵı zaryad tasıwshılardıń $p-n$ diffuziyası nolge umtıladı. Biraq bul halattaǵı potencial tosıqtıń artıwı tiykarǵı bolmaǵan zaryad tasıwshılar háreketine yaǵnıy dreyf toki mánisine tásir etpeydi. Endi $p-n$ ótiwdegi tok mánisi bul tek dreyf toki mánisi menen anıqlanadı hám sırtqı derek kernewine baylanıslı bolmay qaladı. $p-n$ ótiwge sırtqı derektiń bunday tutasıwı – kerı tutasıw dep qabıl etilgen. Bunda júdá kishkene hám sırtqı derek kernewine tiykarınan baylanıslı bolmaǵan ótip atırǵan tok mánisi I_{so} – kerı toyınǵan tok mánisi delinedi. Bul halattaǵı $p-n$ ótiw zonalar diagrammasına itibar berseńiz endi sistemada jalǵız teń salmaqlıq halattıń kórsetetuǵın Fermi qáddi ornına n hám p - tiptegi elektron hám geweklerdiń sırtqı derek qoyılǵandaǵı ózgeriwin sáwlelendiriwshi kvazi Fermi qáddileri (F_p, F_n) payda boladı. Olardıń ayırması $F_n - F_p = eV$ sırtqı qoyılǵan potencialǵa teń. I_{so} nıń sırtqı maydanǵa baylanıslılıq grafigi $p-n$ ótiwdiń kerı volt – amper xarakteristikası delinedi. I_{so} – tokınıń mánisi tiykarınan tiykarǵı bolmaǵan zaryad tasıwshılar mánisi menen anıqlanǵanlıǵı ushın, onıń muǵdarı júdá kishkene bolıp, tiykarǵı zaryad tasıwshılar koncentraciyası artıwı menen jáne de kemeyedi. Bunday toktıń mánisin temperatura hám yarımótkizgish fundamental parametrlerine baylanıslılıq ańlatpası tómendegige teń boladı:

$$I_{so} = e(N_c \cdot N_v) \left(\frac{1}{N_a} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + \frac{1}{N_d} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \right) \cdot e^{-\frac{E_g}{kT}}. \quad (8.14)$$

D_n, D_p, τ_n, τ_p – elektron hám geweklerdiń diffuziya koefficienti hám olardıń jasaw waqıtı, N_a hám N_d – donor hám acceptor kirispe atomları koncentraciyası, E_g – qadaǵan etilgen zona keńligi. (8.14) ańlatpadan kórinip turǵanıday, temperatura artıwı menen I_{so} nıń mánisi artıp baradı.

Endi $p-n$ ótiwdiń n tárepke sırtqı derektiń $< - >$, p tárepke bolsa $< + >$ polyusların jalǵayıq. Bunda sırtqı derek elektr maydanı baǵıtı $p-n$ ótiwdegi

elektr maydan bağıtına qarama – qarsı boladı. Bul jaǵdayda n – tipke sırtqı derekke jalǵaǵan kontaktten elektronlar, p – tipke bolsa gewekler aǵımı kirip baslaydı. Nátiyjede n – tipte injekciya qılınǵan elektronlar, ol jerdegi elektronlar koncentraciyasın arttırıwı menen birge, kólemlik zaryad qalınlıǵın kemeyttiredi. Mine usınday p – tipke jalǵaǵan derekten kirip kiyatırǵan gewekler aǵımında, p – n ótiwdiń p tárepinde payda bolǵan teris kólemlik zaryadlar koncentraciyasın kemeyttiredi. Soǵan sáykes halda bul shegaradaǵı kólemlik zaryad qalınlıǵıda kemeyedi. Demek, p – n ótiwdegi potencial tosıq muǵdarı da qoyılǵan sırtqı maydan kernewine sáykes halda kemeyedi: $\varphi = \varphi_0 - eV$. Bul bolsa tiykarǵı zaryad tasıwshılar bolǵan n – tiptegi elektronlar p – tipke hám p – tiptegi gewekler n – tipke diffuziya aǵımınıń artıwına alıp keledi yaǵnıy diffuziya toki muǵdarı artadı. Bul artıw sırtqı derek kernewi artqan sayın jánede kóbirek artıp baradı. Bul halatta bolsa tiykarǵı bolmaǵan zaryad tasıwshılar payda etip atırǵan dreyf toki óz mánisin saqlaǵan halda qaladı. Nátiyjede diffuzion tok muǵdarı dreyf tok muǵdarınan júdá úlken boladı hámde eV artqan sayın artıwı sebepli p – n ótiwden ótip atırǵan tok sırtqı derek kernewi artıwı menen eksponencial halatta artadı. Bul p – n ótiwdiń tuwrı baǵıtına sáykes keletuǵın volt – amper xarakteristikasınıń ańlatadı. Bul halattaǵı p – n ótiw zonalar diagramması kórsetilgen:



8.13 – súwret. Tuwrı maydanda p – n ótiw.

bul jerde F_n hám F_p $p-n$ ótiw tuwrı tutastırılǵandaǵı kvazi Fermi qáddileri. $p-n$ ótiwdiń ulıwma volt–amper xarakteristikası tómendegi ańlatpa menen anıqlanadı:

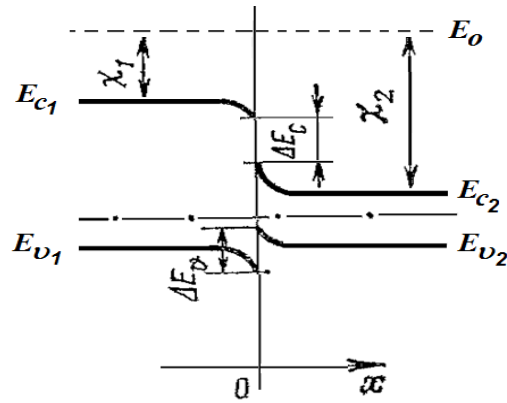
$$I = J_{so} \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right). \quad (8.15)$$

Bul ańlatpadan kórinip turǵanıday, temperatura artıwı menen tuwrı baǵıttaǵı tok muǵdarı kemeyedi. Joqarı temperaturada kerı toktıń artıwı tuwrı baǵıttaǵı toktıń kemeyiwi sebepli bul toklar mánisiniń berilgen kernewdegi ayırmaları áste – aqırın kemeyip, VAX endi Om nızamın sáwlelendiriwshi tuwrı sıızıq penen ańlatıladı, yaǵnıy $p-n$ ótiwdiń tuwrılaǵısh qásiyeti joǵaladı. Demek, hár qanday $p-n$ ótiwge iye bolǵan diodtıń tuwrılaǵısh qásiyeti temperatura artıwı menen jamanlasadı eken. Demek, $p-n$ ótiwdiń ózine jalǵanǵan derek baǵıtına qarap, token bir tárepleme júdá jaqsı ótkizedi eken, ekinshi baǵıtta bolsa $p-n$ ótiwden ótip atırǵan tok júdá kishkene boladı. $p-n$ ótiwdiń bunday ájayıp qásiyeti onıń tuwrılaǵısh sıpatında paydalanıw imkaniyatın beredi. Eger biz $p-n$ ótiwge ózgeriwsheń derek jalǵasaq, onda derektiń bir baǵıtında tok ótedi, ekinshi baǵıtında bolsa tok ótpeydi. Demek, $p-n$ ótiw ózgermeli toktı turaqlı tokqa aylandırıp beredi eken. $p-n$ ótiwli diodlarda kerı tok mánisi J_{so} júdá kem bolǵanlıǵı ushın olardıń tuwrılaǵısh qásiyetleri metall – yarımótkizgish diodlarına salıstırǵanda jaqsıraq boladı. Hár qanday tuwrılaǵısh diodlarınń sıpatı onıń tuwrılaǵısh koefficientine qarap baha beriledi. Ol qansha úlken bolsa, diod qásiyeti sonsha jaqsı boladı. Tuwrılaǵısh koefficienti k – tuwrı hám kerı baǵıtta $U = 1\text{ V}$ berilgendegi, tuwrı hám kerı toklar mánisi menen anıqlanadı:

$$k = \frac{J_{tuwrı}}{J_{kerı}} = \frac{J}{J_{so}}. \quad (8.16)$$

8.8-§. Geteroótiwler

Biz joqarıda bir ǵana kristall ishinde diffuziya jolı menen payda etilgen $p-n$ ótiw qásiyetlerin úyrendik. Bul jerde p hám n táreplerde kristall pánjere dúzilisi, olardıń qadaǵan etilgen zonaları hám basqa qásiyetlerinde hesh qanday ayırmashılıq joq, sebebi olar bir ǵana kristallda payda etilgen. Qadaǵan etilgen energetik zonaları hár qıylı bolǵan, eki túrli yarımótkizgish kontaktine *geteroótiw* dep ataladı. Álbette bunda eki túrli yarımótkizgish atom dúzilisi, kristall pánjere turaqlısı hám olardıń jıllılıqtan keńeyiw koefficientleri hár qıylı bolıwı anıq. Sonıń ushında geteroótiwdiń qásiyetleri álbette joqarıda keltirilgen – pánjere turaqlısı, jıllılıqtan keńeyiw koefficienti hám atom dúzilisindegi ayırmashılıqlarǵa júdá baylanıslı boladı. Geteroótiw payda etiwde bul ayırmashılıqlar eń kem bolǵan yarımótkizgish materiallar tańlap alınadı. Geteroótiwli qurılımalardıń mono $p-n$ ótiwlerden eń tiykarǵı áhmiyeti olar tiykarında yarımótkizgishli lazerler, jaqtılıq shıǵaratuǵın diodlar, júdá aktiv isleytuǵın quyash elementlerin jaratıw múmkin. Endi p – tipke iye bolǵan *Ge* kristallı menen n – tipke iye bolǵan *GaAs* kristallı tiykarındaǵı geteroótiw strukturasın kórip shıǵayıq (*Ge* hám *GaAs* kristall pánjere turaqlıları hám basqa qásiyetleri bir – birine júdá jaqın). Bul materiallardıń energetik zona dúzilislerinen kórinip turıptı, *Ge* diń shıǵıw jumısı hám elektronlardıń ótkiziwsheńlik zonasınan vakuumǵa shıǵıw ushın zárúr bolǵan energiya, *GaAs* materiallardikinen úlken hám qadaǵan etilgen zona keńligi $E_g(Ge) = 0,67\text{ eV}$, $E_g(GaAs) = 1,43\text{ eV}$ mánislerine iye. $p-n$ geteroótiwdegi energetik zonalar dúzilisi $p-n$ monoótiw energetik zonaları dúzilisinen ayırmashılıǵı *Ge* hám *GaAs* qadaǵan etilgen zonalar keńligindegi ayırma tásirinen ibarat boladı. Bunıń esabınan mono $p-n$ ótiwdegi ótkiziwsheńlik hám valent energetik qáddilerdiń úziliksiz ózgeriwi ornına olardıń ΔE_c hám ΔE_v úzilgen zonaları payda boladı.



8.14 – *súwret. Geteroótiwdiń zonalar diagramması.*

Ge (*p*- tipli) ÷ *GaAs* (*n* – tipli) geteroótiwde gewekler *Ge* kristalınıń kontakt shegarasınan *GaAs* kontakt shegarasına ótip, ol jerdegi elektronlar menen rekombinaciya boladı hám elektronlar *n*- *GaAs* kontakt shegarasınan *p*-*Ge* kontakt shegarasınan ótip, ol jerdegi gewekler menen rekombinaciyalanadı. Zaryad tasıwshılardıń óz – ara ótiw processı teń salmaqlıq ornatılğansha, yaǵnıy Fermi qáddileri teńleskenshe dawam etedi. Nátiyjede *Ge* kontakt shegarası teris zaryadlanadı (geweklerdi joǵaltqan akceptor ionları esabınan), *GaAs* kontakt shegarası bolsa soǵan sáykes halda elektronlardı joǵaltqan donor ionları esabınan oń zaryadlanıp, kólemlik zaryad shegaraları payda boladı. Nátiyjede *GaAs* ótkiziwsheńlik zonasınıń joqarıǵa φ_1 mánisine, *Ge* diń ótkiziwsheńlik zonası bolsa tómenge φ_2 mániske jılıwına alıp keledi. Geterowótiwde erkin zaryad tasıwshılar háreketine tosqınlıq etiwshi kontakt potencial tosıqtı payda etedi. Bul potencial tosıq mánisi tómendegige teń boladı:

$$\begin{aligned} \varphi &= F_n - F_p = (\eta_{Ge} + E_{g(Ge)} - \Delta\delta_{Ge}) - (\eta_{GaAs} + \Delta\delta_{GaAs}) \\ &= \varphi_1 + \varphi_2. \end{aligned} \quad (8.17)$$

Tómende keltirilgen zonalar diagrammasınan geteroótiw ótkiziwsheńlik zonalarındaǵı úziliw mánisin ΔE_c nı tabıw múmkin:

$$\Delta E_c = \Delta\delta_{GaAs} + \eta_{GaAs} - (E_{g(Ge)} - \Delta\delta_{Ge}) + \eta_{Ge}, \quad (8.18)$$

φ_1 hám φ_2 niń mánislerin (8.17) ańlatpaǵa paydalansaq, tómendegi ańlatpaǵa iye bolamız:

$$\Delta E_c = \eta_{Ge} - \eta_{GaAs}. \quad (8.19)$$

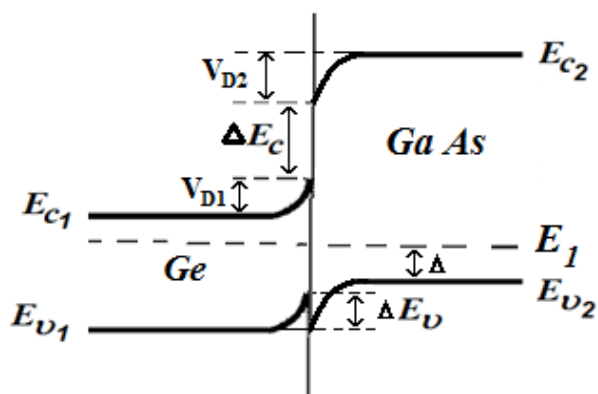
Demek, bul mánis, geteroótiwdi payda etip atırǵan yarımótkizgish materiallarınń elektron (sredstva) lar ınıń ayırmasına teń boladı eken. Mine usıǵan uqsap valent zonadaǵı úziliw mánisin de tabamız:

$$\Delta E_v = (E_{g(GaAs)} - E_{g(Ge)}) - (\eta_{Ge} - \eta_{GaAs}). \quad (8.20)$$

Valent zonasındaǵı úziliw ΔE_v niń mánisi yarımótkizgishler qadaǵan etilgen zonalar ayırmasınan olardıń elektron (sredstva) mánisleri ayırmalarınń ayırmasına teń boladı. (8.19) hám (8.20) ańlatpalardan

$$\Delta E_v + \Delta E_c = (E_{g(GaAs)} - E_{g(Ge)}). \quad (8.21)$$

Demak, ΔE_c hám ΔE_v lardı geteroótiwlerdi quraǵan eki yarımótkizgish qadaǵan etilgen zonalar hám elektron (srodstva) ları mánislerin bilgen halda hár qanday geteroótiw ushın onıń zonalar diagrammasın keltiriw múmkin eken. Mısalı, $p\text{-GaAs}$ hám $n\text{-Ge}$ geteroótiw zonaları diagramması tómendegi 8.15 – súwrette keltirilgen. Zonalar diagrammasınan kórinip turǵanıday, potensial tosıqtıń mánisi gewekler ushın elektronlarǵa qaraǵanda ádewir kishkene, bul bolsa bunday geteroótiwde tiykarǵı tok gewekler qózǵalı menen anıqlanıwın kórsetedi.



8.15–súwret. $p\text{-GaAs}$ hám $n\text{-Ge}$ geteroótiw zonalar diagramması.

Geteroótiwdiń volt – amper xarakteristikası ańlatpaların tómendegishe jazıw múmkin:

$$j = A \cdot \exp\left(-\frac{eV}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV_2}{kT}\right) - \exp\left(\frac{eV_1}{kT}\right) \right], \quad (8.22)$$

bunda

$$V_2 = k_2 V_0, \quad V_1 = k_1 V_0, \quad k_2 = \frac{1}{1 + \frac{N_d}{N_a} - \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}}, \quad k_1 = 1 - k_2.$$

V_0 – sırtqı derek kernewi hám V_1, V_2 ler p -GaAs hámde n -Ge geteroótiwde kontakt bólimlerine túsip atırǵan kernew, N_d, N_a – GaAs hám Ge donor hámde akceptor qosımta atomlar koncentraciyası. Geteroótiwge oń baǵıt berilgende, yaǵnıy derektiń $\langle\langle + \rangle\rangle$ polyusı Ge kristalına $\langle\langle - \rangle\rangle$ polyusı bolsa GaAs kristalına jalǵanǵanda VAX sı ańlatpası tómendegishe boladı:

$$j = A \cdot \exp\left(-\frac{eV_2}{kT}\right) \exp\left(\frac{ek_2 V_0}{kT}\right). \quad (8.23)$$

Bunda tok eksponencial nızam menen artadı, biraq tájriybede bul qatnas geteroótiwdegi tunnel tokları hám rekombinaciya esabınan ózgeriwi múmkin.

VIII bapqa tiyisli sorawlar:

1. Shıǵıw jumısı degenimiz ne?
2. Yarımótkizgishlerde shıǵıw jumısınıń mánisi nelerge baylanıslı?
3. Metall – yarımótkizgish kontaktları neshe túrge bólinedi hám olar qanday jaǵdaylarda payda boladı?
4. Metall – yarımótkizgish kontakt zonalar diagramması hám VAX sın sızıl hám túsindiril?
5. Omlıq kontakt payda etiwdiń tiykarǵı shárti ne?
6. p – n ótiw potencial tósıǵı temperatura artqanda qanday ózgeriwi múmkin?
7. p – n ótiwdiń zonalar diagrammasın sızıl hám túsindirip beril?
8. Shottki diodı qanday jaǵdaylarda payda boladı?

9. Shottki hám $p-n$ ótiw diodlarınıń tiykarǵı ayırmashılıǵı ne hám olar qaysı jerlerde isletiledi?
10. Geteroótiw degende ne túsiniledi hám ol qanday payda etiledi?

IX BAP

9.1-§. Yarımótkizgishlerdegi kinetikalıq qubılıslar

Kinetikalıq qubılıslar degende – yarımótkizgishke sırttan baǵdarlanǵan tásir (elektr hám magnit maydanı, temperatura gradienti) nátiyjesinde zaryad tasıwshılardıń belgili baǵıt boyınsha jıljıwı hám nátiyjede soǵan sáykes tok, elektr qozǵawshı kúshler payda bolıwına aytıladı. Sırttan qandayda bir tásir bolmaǵan jaǵdayda yarımótkizgish yamasa dene teń salmaqlıq jaǵdayında boladı. Demek, deneni qurawshı barlıq atomlar hám elektronlar energiyası, deneni orap turǵan ortalıqtıń temperaturasına sáykes jıllılıq energiyası $-kT$ ǵa teń bolıwı menen birge, elektronlardıń energetik qáddileri boyınsha bólistiriliwi de usı temperaturaǵa sáykes halda boladı. Bul halatta yarımótkizgishtegi barlıq elektronlar tártipsiz jıllılıq háreketinde boladı. Olardıń baǵıtları boyınsha bólistiriliwi de bir qıylı bolǵanlıǵı ushın bir tárepke qansha elektron háreketlenip atırǵan bolsa, oǵan qarama – qarsı tárepke de sonsha elektron háreketinde boladı. Nátiyjede yarımótkizgishte tok payda bolmaydı. Endi yarımótkizgishke sırtqı elektr deregi jalǵansa, hár bir elektrónǵa maydan baǵıtı boyınsha $F = eE$ – kúsh tásir etedi. Onda ol óz tezligin de muǵdarın da baǵıt boyınsha ózertiredi, yaǵnıy tezleniw aladı:

$$a = \frac{eE}{m_n^*}, \quad a = \frac{\Delta V}{t}, \quad \Delta V = \frac{eE}{m_n^*} \cdot t. \quad (9.1)$$

Teoriyalıq jaqtan qaraǵanda (9.1) – ańlatpaǵa sáykes elektron tezligin sheksiz arttırıw múmkin boladı. Biraq, joqarıdaǵı baplarda kórsetilgenindey, elektrónnıń kristall reshıyotkasındaǵı háreketi bar, har qıylı defektler menen (qosımta atomlar, basqa elektron hám gewekler, pánjerede jıllılıq terbelisi) soqlıǵısıwı nátiyjesinde

öz bağıtın özgeertiriwi menen birge, öz energiyasın joǵaltıp, aldındıday maydan tásirinde háreket ete baslaydı. Bul degen sóz elektron eki soqlıǵısıw arasında erkin háreket etip belgili aralıq (l) dı basıp ótedi. l – bul elektronnıń erkin juwırıw jolı dep ataladı hám bul aralıqtı t – waqıtta basıp ótedi.

$$\tau = \frac{l}{\Delta V}. \quad (9.2)$$

Bul jerde τ – elektronnıń sırtqı maydan tásirinde alǵan energiyasın soqlıǵısıw dawamında tolıq joq bolıp, aldındıday baǵıt boyınsha háreket etiwine kerek bólatuǵın waqıt túsiniledi. Ol relaksaciya waqıtı dep atalıp, ol sırtqı tásir toqtaǵannan soń sistemanıń jáne teń salmaqlıq halatına qaytıp keliwi ushın kerek bolǵan waqıt esaplanadı. Demek, kristalda elektron háreketine tek sırtqı tásir – elektr maydan emes bálkim, ishki tásir yaǵnıy elektronnıń kristall pánjere defektleri menen soqlıǵısıwı tásir etedi. Bul eki kúsh óz – ara qarama – qarsı baǵıtlanǵan bolıp, sırtqı tásir elektr maydan boyınsha háreketke keltirip teń salmaqlıqtı buzsa, ishki tásir onı jáne qaytadan teń salmaqlıqqa qaytarıwına alıp keledi. Sırtqı elektr maydan tásirinde yarımótkizgishten tok óte baslaydı hám onıń mánisi elektr maydan E ǵa baylanıslı:

$$J = \sigma \cdot E. \quad (9.3)$$

Bul jerdegi σ – proporcionallıq koefficienti bolıp, elektr ótkiziwsheńlik dep ataladı. Eger yarımótkizgishtiń bir bóleginde temperatura arttırılса, sol jerde elektronlar koncentraciyası artıp, ol temperatura túsken tárepke diffuziya bola baslaydı. Nátiyjede yarımótkizgishtiń jıllı hám suwıq tárepleri ortasında elektr qozǵawshı kúsh payda boladı, onıń mánisi

$$\Delta\varepsilon = -\alpha\Delta T, \quad (9.4)$$

α – yarımótkizgishtiń salıstırmalı jıllılıq ótkiziwsheńlik koefficienti dep ataladı. Eger yarımótkizgishke bir waqıttıń ózinde 2 túrli sırtqı kúsh mısalı, elektr (E) hám magnit maydani (B) óz – ara perpendikulyar halda tásir etse, onda elektr

hám magnit maydan baǵıtlarına perpendikulyar bolǵan qaptal táreplerinde Xoll elektr qozǵawshı kúshi yaǵnıy Xoll elektr potencialı payda boladı. Onıń mánisi

$$u_x = R_x \frac{J - B}{t}, \quad (9.5)$$

ǵa teń. Bunda proporcionallıq koefficienti R_x – Xoll koefficienti dep ataladı. Mine usınday yarımótkizgish materiallarına jaqtılıq tásir etkende yamasa bir waqıttıń ózinde jaqtılıq hám magnit maydan, jaqtılıq hám elektr maydani hámde basqa kúshler tásir etkende, soǵan sáykes jańa fizikalıq qubılıslar Dember effekti, fotomagnit effekt júzege keledi.

9.2-§. Yarımótkizgishlerdegi zaryad tasıwshılardıń háreketsheńligi hám onıń fizikalıq áhmiyeti

Joqarıda keltirilgenindey, sırtqı elektr maydanı tásirinde elektronlar ortasha qosımsha tezlik aladı:

$$\bar{V} = a \cdot \tau = -\frac{eE}{m} \cdot \tau. \quad (9.6)$$

Biraq, bul alǵan tezlik elektronlardıń kristall pánjeredegi bar defektler menen bárqulla soqlıǵısıwı nátiyjesinde úziliksiz artpastan bálkim, óz muǵdarın hám baǵıtın ózǵerttirip turadı eken. τ – elektronnıń relaksaciya waqıtı bolıp, onıń mánisi pánjeredegi defektler tábiyatın koncentraciyasına baylanıslı boladı. Bizge belgili, yarımótkizgishke elektr maydanı (E) tásir etkende onnan ótip atırǵan tok tıǵızlıǵı

$$j = \sigma \cdot E, \quad (9.7)$$

ańlatpaǵa teń boladı. Endi ekinshi tárepten ótip atırǵan tok tıǵızlıǵı zaryadlangan bólekshelerdiń berilgen waqıt ishinde maydan baǵıtına keri baǵıt boyınsha jılǵıwı menen anıqlanadı:

$$j = -en\bar{V}. \quad (9.8)$$

Endi (9.7) hám (9.8) – ańlatpadan elektronnıń ortasha tezligin tapsaq:

$$\bar{V} = -\frac{\sigma E}{en}. \quad (9.9)$$

Elektronnıń maydan tásirindegi alǵan tezliginiń mánisin (9.6) nı endi (9.9) ına qoysaq:

$$\frac{eE}{m} \cdot \tau = \frac{\sigma E}{en}. \quad (9.10)$$

Bunda σ – yarımótkizgishtiń salıstırmalı ótkiziwsheńligi:

$$\sigma = en \frac{e}{m} \cdot \tau. \quad (9.11)$$

Endi elektronlardıń jáne bir zárúr qásiyetlerinen biri bul – elektronlardıń háreketshenligi bolıp, ol tómendegige teń boladı:

$$\frac{e}{m_n^*} \cdot \tau = \mu_n. \quad (9.12)$$

Demek, bunnan kórinip turıptı, elektronnıń háreketshenligi tek τ yaǵnıy relaksaciya waqıtı menen ǵana anıqlanadı eken, $\sigma = en\mu$. Metallarda relaksaciya waqıtı – onda bar $\sim 10^{22} \text{ sm}^{-3}$ elektronlardıń óz – ara soqlıǵısıwı menen anıqlanadı hám olardıń relaksaciya waqıtı $\tau \sim 10^{-12} \text{ s}$ ge teń. Yarımótkizgish materiallarda bolsa elektronlar koncentraciyası $n \sim 10^{13} \div 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ bolǵanlıǵı ushın τ nıń mánisi tiykarınan elektronnıń pánjeredege defektler menen soqlıǵısıwı menen anıqlanadı. Bunnan kórinip tur, eger relaksaciya waqıtı sheksiz bolsa, elektronlar háreketinde hesh qanday soqlıǵısıw júz bermeytuǵın jaǵday bolsa, onda háreketshenlik de sheksiz hám deneniń salıstırmalı ótkiziwsheńligi $\sigma = en\mu$ de sheksiz kúshli ótkiziwsheńlikke iye boladı. Biz joqarıda elektronlardıń hár qıylı defektlerde shashılıwı bar ekenligin ayttıq. Endi usı shashıraw túsiniǵin de az ǵana aytip óteyik. Dáslep shashıraw 2 túrli boladı: elastik – yaǵnıy bunday shashırawda elektron óziniń kinetikalıq energiyasın joǵaltpaydı hám tek óz baǵıtın ózǵerttiredi. Bunday shashıraw elektronnıń oǵan salıstırǵanda massası júdá úlken bolǵan qosımta atomlar menen soqlıǵısqanda júz beredi. 2 – túrli bul elastik bolmaǵan shashıraw – elektron óz energiyasın ózǵerttiriwi nátiyjesinde

yaǵnıy onıń ózinen massası kishkene bolǵan defektler – fotonlar, fononlar menen soqlıǵısıwı nátiyjesinde júz beredi.

Endi soqlıǵısıw hám shashırw qubılıslarınıń abzallıǵın kórip shıǵayıq. Elektronlar kristalldaǵı qosımta atomları yamasa ionlar menen tuwrıdan – tuwrı soqlıǵıspaǵan jaǵdayda olardıń tásir sheńberi shegarasına kiriwi menen óziniń tuwrı sıızıqlı háreket baǵıtın ózgarttiriwi shashılıw processı boladı, eger defekt teris ion bolsa onnan uzaqlasadı. Eger defekt oń ion bolsa, ol tárepke awısadı. Awısıw múyeshi hám elektronnıń ion tásirinde awıspawın támiyinlewshi eń kem aralıq ion tábiyatına, elektron energiyasına hám álbette deneniń temperaturasına baylanıslı boladı. Bulardıń hámmesi elektron háreketshenligin shegaralawshı faktorlar bolıp esaplanadı. Elektron háreketshenliginiń defektler tábiyatı, temperaturaǵa qarap qanday ózgeriwi bul shashılıw mexanizmleri menen anıqlanadı. Bul mexanizmlerdi kórip shıǵıwdan aldın oǵan tiykar bolıwshı kinetikalıq qubılıslar mazmunın ashıp beriwshi Bolcman teoriyası menen tanısıp shıǵayıq.

9.3-§. Bolcman teńlemesi

Sistema teń salmaqlı jaǵdayda bolǵanda bólistiriliw funkciyası f (elektronlardıń energetikalıq qáddiler boyınsha bólistiriliwi) – zaryad tasıwshılar koordinataları (r) , tolqın vektorı (k) , hám álbette waqıt (t) ǵa baylanıslı boladı. Onı ańlatıwshı kórinisi tómendegishe boladı:

$$\frac{d}{dt}f(r, k, t) = \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial k} \frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial t} + (V \nabla_r f) + \frac{1}{h} (F \nabla_k f). \quad (9.13)$$

Elektronnıń tezligi $V = dr/dt$, F – elektronǵa ulıwma tásir etiwshi kúsh bolıp, bul ishki tásir hám sırtqı tásir kúshler jıyındısınan ibarat boladı. Teń salmaqlıq

halatta $df/dt = 0$ bolıwın esapqa alıp (9.13) ańlatpaǵa muwapıq tómendegini jazıw múmkin:

$$-\frac{\partial f}{\partial t} = (V \nabla_r f) + \frac{1}{h} (F \nabla_k f). \quad (9.14)$$

Ulıwma tásir kúshin endi ishki (F_i) hám sırtqı (F_t) tásir kúshler jıyındısı ekenligin esapqa alsaq onda (9.14) – ańlatpa tómendegi kóriniske keledi:

$$-\frac{\partial f}{\partial t} = (V \nabla_r f) + \frac{1}{h} (F_i \nabla_k f) + \frac{1}{h} (F_t \nabla_k f). \quad (9.15)$$

Ishki kúshler bul–elektronlardın kristall pánjere defektlerinde shashırawınan ibarat boladı. Eger elektronlar shashıraytuǵın defektler arasındaǵı aralıq $\sim 10^{-6} \text{ sm}$, yaǵnıy bir neshshe on pánjere turaqlısına teń dep alsaq, elektrondı defekt penen soqlıǵısıw (onda shashıraw) waqıtı $t \sim 10^{-13} \text{ s}$ ǵa teń bolıp, bul júdá tez process ekenligi kelip shıǵadı. Sol waqıt ishinde elektron óz impuls tezligin ózǵerttiriwge erisedi. Demek, elektron soqlıǵısıwı júdá qısqa waqıt ishinde júz beretuǵın process – fizikalıq qubılıs eken. Mine usı soqlıǵısıw nátiyjesinde bólistiriliw funkciyasınıń ózgeriwın tómendegishe jazamız:

$$-\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_i = \frac{1}{h} (F_i \nabla_k f). \quad (9.16)$$

Endi sırtqı tásir nátiyjesinde elektronlardın háreketke keliwi sebepli bólistiriliw funkciyasınıń ózgeriwi tómendegishe boladı:

$$-\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_t = (V \nabla_r f) + \frac{1}{h} (F_t \nabla_k f). \quad (9.17)$$

(9.16) hám (9.17) - ańlatpalardıń jıyındısı – bólistiriliw funkciyası ulıwma ózgeriwın kórsetedi. Bul bolsa Bolcman teńlemesi dep ataladı. Ol tómendegishe kóriniske iye boladı:

$$df/dt = (df/dt)_i + (df/dt)_t. \quad (9.18)$$

Eki tásir kúshleri payda bolǵanda sistema belgili bir turǵın jaǵdayǵa iye boladı. Bólistiriliw funkciyasınıń tolıq mánisi turaqlı mániske iye boladı:

$$\frac{df}{dt} = 0, \quad \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_i + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_t = 0. \quad (9.19)$$

Sırtqı tásir kúshler tábiyatı ulıwma alǵanda belgili másele ishki tásir kúshler tábiyatın tereńirek biliw hám abzallıǵın anıqlaw kerekligin bildiredi. Bunıń ushın sırtqı tásir toqtaǵannan soń sistemanıń teń salmaqlıq jaǵdayına qaytıw procesi tómendegishe anlatıladı:

$$-\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_i = \frac{f(r, k, t) - f_0(r, k)}{\tau(k)} = \frac{\Delta f}{\tau(k)}. \quad (9.20)$$

Bunda $f(r, k, t)$ – sırtqı tásir toqtaǵan jaǵdaydaǵı bólistiriliw funkciyası, $f_0(r, k)$ – teń salmaqlıq jaǵdayındaǵı bólistiriliw funkciyası, Δf – sırtqı tásir nátiyjesinde bólistiriliw funkciyasınıń waqıttıń ótiwi menen joǵalıp ketiwi kerek bolǵan ózgergen mánisi. Eger (9.20) – anlatpanı integrallaytuǵın bolsaq, onda tómendegi anlatpaǵa iye bolamız:

$$f - f_0 = \Delta f = [f - f_0]_{t=0} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right). \quad (9.21)$$

Bul anlatpadan kórinip turıptı, τ – bul sonday waqıt, mine usı waqıt ishinde $\Delta f = f - f_0$ e ese kemeyedi yaǵnıy sırtqı tásir nátiyjesindegi bólistiriliw funkciyasınıń ózgeriwi kemeyip teń salmaqlıq mánisine qaray umtıladı. Bunnan usı nárse kelip shıǵadı, τ – sistemanıń qanshelli tez yamasa áste teń salmaqlıq jaǵdayına qaytıwın anıqlawshı shama bolıp esaplanadı. Óz mazmunı hám abzallıǵı jaǵınan bul shama ishki kúshler–elektronlardıń kristall pánjere defektler tábiyatına sáykes shashırar mexanizmi menen anıqlanadı. Álbette bul shama zaryad tasıwshılar energiyasına baylanıslı boladı.

9.4-§. Elektronlardıń kristall pánjere defektlerindegi shashırawı

Joqarıda kórsetilgenindey, kristall pánjere defektleri óz tábiyatına qarap elektroneytral, zaryadlangan (on, teris, bir márte, eki márte) ápiwayı noqatlıq hám quramalı bolıwı múmkin. Sonıń ushın da olarda elektronlardıń shashıraw mexanizmi hám bul procestıń temperaturaǵa baylanıslılıǵı óz ayırmashılıǵına iye boladı. Bul bolsa zaryad tasıwshılar háreketsheńliginiń ózgeriwin anıqlaydı.

9.5-§. Zaryad tasıwshılardıń zaryadlangan defektlerde shashırawı

Belgili, hár qanday zaryadlangan defekt óz átrapında elektr potencial (maydan) payda etedi:

$$U(r) = \frac{e^2}{\kappa} \cdot r, \quad (9.22)$$

κ – deneniń dielektrik turaqlısı, r – defektten uzaqlasqan aralıq.

Zaryadlangan elektron yamasa gewek óz háreketi jolında álbette bul defekt payda etken elektr potencial tásirdi sezedi. Biraq elektron óziniń tuwrı sıızıqlı háreketin bul tásir nátiyjesinde ózgerttiriwi yaǵnıy $d\theta$ múyeshke awısıwı ushın ol ion janınan eń kóp degende r aralıqtan ótiwi shárt. Demek, $r + 2r$ – radius penen shegaralangan sheńber ishinde hárekettegi barlıq elektronlar (gewekler) menen $\theta + d\theta$ múyesh aralıǵında awısadı. Demek, $2\pi r dr$ – sheńber ishindegi barlıq elektronlar zaryadlangan defektte shashıraydı. Bul sheńber menen shegaralangan maydanı $2\pi r dr$ – shashırawdıń diffirencial maydanı dep ataladı.

$$\sigma(\theta)d\Omega, \quad d\Omega = 2\pi \sin\theta d\theta. \quad (9.23)$$

(2) – ańlatpanı esapqa alsaq, tómendegige iye bolamız,

$$\sigma(\theta) = \frac{r}{\sin \theta} \left(\frac{dr}{d\theta} \right), \quad (9.24)$$

dr diń mánisin (9.22) – ańlatpadan tapsaq, tómendegi payda boladı:

$$dr = -\frac{e^2}{2m\kappa v^2} \frac{1}{\sin^2 \frac{\theta}{2}} d\theta. \quad (9.25)$$

Demek,

$$\sigma(\theta) = \left(\frac{e^2}{2\kappa m v^2}\right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}, \quad (9.26)$$

Onda elektronlardıń shashıraw itimallıǵı w hám usıǵan sáykes halda relaksaciya waqıtı menen anıqlanadı:

$$w(\theta) = \frac{1}{\sigma(\theta)}, \quad \tau = \frac{1}{\int w(\theta) d\Omega}. \quad (9.27)$$

Onsha qıyın bolmaǵan matematikalıq almasırwlar nátiyjesinde zaryadlangan defektlerde shashıraw júz bergende relaksaciya waqıtınıń energiyaǵa baylanıslılıq ańlatpasın tómendegishe jazıw múmkin:

$$\tau = \frac{\kappa^2 \sqrt{2m^x} (kT)^{3/2} \varepsilon^{3/2}}{\pi e^4 \cdot A}. \quad (9.28)$$

(9.28) – ańlatpaǵa muwapıq sonı aytıp ótiw múmkin, relaksaciya waqıtı bunday hallarda temperatura artıwı menen $T^{3/2}$ nızamlıq penen artadı eken. Bunıń fizikalıq mánisi sonnan ibarat, temperatura artıwı menen zaryad tasıwshılardıń kinetikalıq energiyası artadı. Bul bolsa zaryadlangan defekt potencialınıń az tásir etiwine alıp keledi. Endi jáne bir nárse bul defektlerdiń zaryadlanganlıq dárejesi artıp barıwı menen, álbette joqarıda keltirilgenindey, olardıń diferencial shashıraw maydanı artıp baradı. Belgili, zaryadlardıń háreketshenligi olardıń relaksaciya waqıtına baylanıslı:

$$\mu = \frac{e}{m_n^x} \tau. \quad (9.29)$$

Bunnan kelip shıǵadı, shashıraw zaryadlangan defektlerde júz bergende háreketshenliktiń temperaturaǵa baylanıslılıǵı (7.29)-ańlatpaǵa sáykes halda boladı hám ol tómendegige teń boladı:

$$\mu = \mu_o T^{3/2}. \quad (9.30)$$

Temperatura artqan sayın háreketsheńlikde $T^{3/2}$ n ızamlıq penen ózgeredi eken.

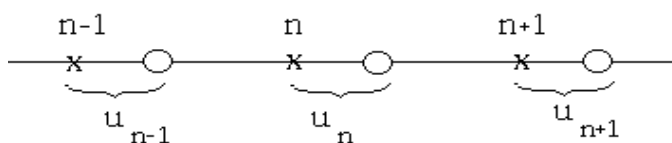
9.6-§. Elektroneytral defektlerde shashıraw

Kristall pánjerede júdá kóp defektler elektroneytral jaǵdayda boladı. Biraq olardıń massası, atom radiusı hám sırtqı elektron qabıqları yarımótkizgishtiń tiykarǵı atomlar parametrlerinen parqlanǵanlıǵı ushın olar hám elektronlar, (gewekler) ge shashıraw deregi boladı. Bul halatta relaksaciya waqıtı tek ǵana elektroneytral defektler koncentraciyasına (N_0) kerı proporcional halatta ózgeredi, biraq háreketine baylanıslı bolmaydı.

$$\tau = \frac{m^{*2} e^2}{20 \kappa h^3 N_0}. \quad (9.31)$$

Sonıda esletip ótiw kerek, barlıq qosımta atomları donor yamasa akceptor bolsa hám júdá tómen temperaturada elektroneytral halatta boladı hám olar ionlasaman degenshe neytral defect sıpatında shashıraw deregi ionlaǵannan soń bolsa zaryadlanǵan defektler sıpatında shashıraw deregi boladı.

9.7-§. Bir qıylı atomlardan dúzilgen sheksiz sıızıqlı reshetka



9.1 - súwret

Súwrette ko'rsetilgendeı bir qıylı atomlardan dúzilgen sheksiz sıızıqlı reshetkanın' u'sh atomı súwretlengen. Bul jag'dayda biz tek qon'sı atomlar arasındag'ı o'z-ara ta'sirdi esapqa alamız ha'm kvazielastik ta'sir dep esaplaymız. Kvazielastik ku'sh koeffitsentin β menen belgileymız. Usıg'an tiykarlana otırıp, n-atomg'a (n-1) –atomnıń ta'sir ku'shin $f_{n,n+1} = -\beta(U_n - U_{n-1})$ (9.32)

n-atomg'a (n+1)- atomnıń ta'sir ku'shin

$$f_{n,n+1} = -\beta(u_n - u_{n+1}) \quad (9.33)$$

ko'riniside su'wretlese, n-atomg'a eki qon'sı atomlar ta'repinen ta'sir etip atırg'an ulıwma ku'sh to'mendegishe jazıladı.

$$f_n = -\beta(2u_n - u_{n-1} - u_{n+1}) \quad (9.34)$$

Atomlardın massası m bolsa, bunday jag'dayda, n-atomnıń ha'reket ten'lemesi

$$mu_n = -\beta(2u_n - u_{n-1} - u_{n+1}) \quad (9.35)$$

ko'rinisine iye boladı. Kvazielastik ku'sh ta'sirinde payda bolatug'ın ha'reket garmonik ha'reket bolıwı ma'lim (mısalı matematikalıq mayatnikti eske alayıq). Demek, qarastırıp atırg'an reshetka atomları garmonikalıq terbelisli ha'reket qıladı, bul terbelisler o'z na'wbetinde reshetka boyınsha garmonik tolqınlar ko'riniside tarqaladı. Sonın ushın (9.35) ten'leme sheshimi, yag'nıy ıqtıyarlı n-atomnıń jılısıwın

$$U_n = Ae^{i(qan - \omega t)} \quad (9.36)$$

Garmonik tolqın ko'riniside su'wretlew mumkin, bul jerde A-amplituda, $q = 2\pi / \lambda$ -tolqın san, λ -tolqın uzınlıg'ı, a-reshetka turaqlısı, ω -terbelis jiyiligi. Eger (9.36) ti (9.35) ke qoyılsa onda ω ha'm g shamalar arasındag'ı baylanısı su'wretleytug'ın ha'reket ten'leme kelip shıg'adı.

$$\omega = \omega_m \left| \sin \frac{qa}{2} \right| = \omega_m \left| \sin \frac{\pi a}{\lambda} \right| \quad (9.37)$$

boladı, bunda $\omega_m = 2\sqrt{\beta/m}$ Eger (9.36) ten'lemede q dı $q^1 = q^+(2\pi/a)g$ (bul jerde g-putin san) menen almasırsı, bul jag'dayda bunday qatnasıq o'z ko'riniside qaladı, yag'nıy

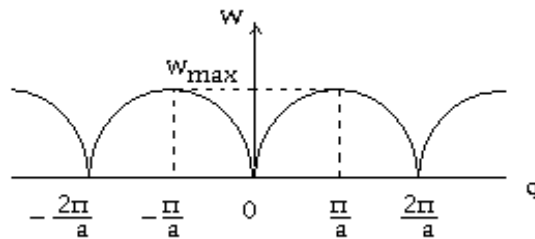
$$u_n(q + (2\pi/a)g) = Ae^{i(qan - \omega t)} e^{i(2\pi gn)} = Ae^{i(qan - \omega t)} = u_{n(q)}$$

Sunday aq

$$\omega(q^2 + 2\pi/a)g = \omega_m \left| \sin\left(\frac{qa}{2} + \pi g\right) \right| = \omega_m \left| \sin(qa/2) \right| = \omega(q).$$

Demek, U_n xa'mde $\omega(q)$ dın' ma'nisleri q -dın' ma'nislerine qarap da'wirli tu'rde o'zgerip baradı.

$$-\pi/a \leq q \leq \pi/a \quad (9.38)$$



9.2 – súwret

Ko'pshilik jag'dayda usı aralıqtın' yarımı menen shekleniw mumkin, sebebi $\omega(q)$ funktsiya simmetrik o'zgeredi. (9.2 su'wret) (9.37) dan ω nin' en' u'lken ha'm kishi ma'nislerin anıqlap alıw an'sat

$$\omega_{\min} = \omega(0) = 0; \quad \omega_{\max} = \omega(\pi/2) = \omega_m \quad (9.39)$$

ko'rinip turg'anday, $q = 0$ ge $\lambda_{\max} = \infty$, $q = \pi/2$ qa $\lambda_{\min} = 2a$ tuwra keledi.

Kristall pánjereni qurawshı atomlar $T = 0 K$ den basqa hár qanday temperaturada kT energiyağa iye bolğan halda, usı jıllılıq kinetikalıq energiyağa sáykes halda óz teń salmaqlıq halatınan jılıp terbelip baslaydı. Atomlar pánjerede óz-ara baylanısqa bolğanlıǵı ushın hár bir atom terbelisi álbette qońsı atomlardıń da jılıwına yaǵnıy, terbeliwine alıp keledi, nátiyjede kristall pánjerede elastik terbelisler tarqaladı. Álbette bunday terbelisler jiyiligi temperaturağa kristallda

kristall pánjere bağıtlarına baylanıslı bolǵanlıǵı ushın hár qıylı jıyilikli terbelisler payda boladı. Bulardı terbelis jıyilikleri dawıs tolqınlarına sáykes bolǵanlıǵı ushın olar okustikalıq terbelisler dep ataladı. Okustik terbelisler tiykarınan elementar yarımótkizgishler (kremniy hám germaniy) de payda boladı. $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$ hám basqa hár qıylı atomlardan quralǵan yarımótkizgish materiallarında pánjeredeǵı qońsı atomlar bir-birinen tek ǵana massası ólshemleri menen ǵana emes bálkim, ion halatları menen de túpten parıqlanǵanlıǵı ushın qos atomlardıń óz-ara qarama-qarsı bağıt boyınsha jılıwı nátiyjesinde optikalıq jıyiliklerge sáykes terbelisler júzege kelgen terbelisler optikalıq terbelisler dep ataladı. Kristall pánjere terbelisleri energiyasın ańlatıwshı kvazi elementar bólekshe $h\nu$ energiyaǵa iye bolǵan fonon túsiniǵı qabıl etilgen. Demek, kristall pánjerede hár qıylı jıyilikli optikalıq hám akustikalıq fononlar bar. Sonıń ushın zaryadlanǵan bólekshelerdiń pánjere terbelislerinde shashılıwın olardıń fononlarda shashılıwı yamasa tásirlesiwi dep de qaraw múmkin. Bir qansha quramalı teoriyalıq esaplawlar tiykarında relaksaciya waqıtınıń akustikalıq fononlarǵa baylanıslılıǵı tómendegishe anıqlanǵan:

$$\tau_L = \frac{\pi h^4 c_L \varepsilon^{*-1/2}}{\sqrt{2} E_1^2 (m^* k T)^{3/2}}. \quad (9.40)$$

C_L – kristall pánjereniń kóldeneń tolqınlardaǵı plastiklik turaqlısı, $E_1 = V_o \frac{dE_o}{dv_o}$ – qadaǵan etilgen zonanıń pánjere kólemi ózgeriwine sáykes ózgeriwi. Ádette (9.40 7.32) – anlatpa tómendegishe jazıladı:

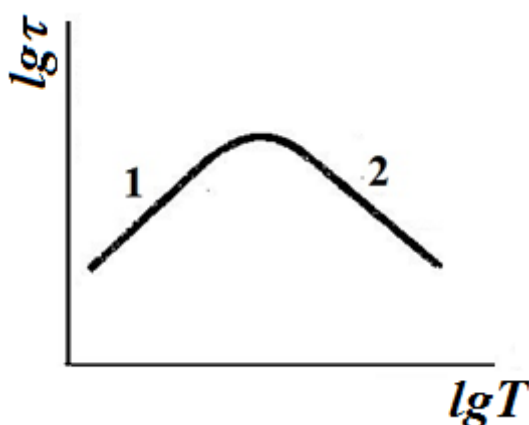
$$\tau = \tau_o(t) \cdot \varepsilon^{3/2}. \quad (9.41)$$

Demek, temperatura artıwı menen relaksaciya waqıtı $T^{-3/2}$ nızamlıq penen ózgeredi eken yaǵnıy, kemeyedi. Endi Debay temperaturasınan joqarı bolǵan temperaturalarda optikalıq terbelisler tásirinde relaksaciya waqıtı:

$$\tau_{on} = \tau_o \varepsilon^{1/2}. \quad (9.42)$$

Biz joqarıda relaksaciya waqıtınıń temperaturaǵa baylanıslılıǵın hár qıylı defektlerde shashırawı júz bergendegi jaǵdayların ayrıqsha kórip shıǵayıq. Biraq

real jaǵdayda bir waqıttıń ózinde joqarıdaǵı shashırawdıń hámmesi de boladı. Sonıń ushın de kórilip atırǵan anıq sharayatta qaysı shashıraw mexanizminiń tutqan ornı hám qásiyetine qarap relaksaciya waqıtı da háreketsheńlikte anıqlanıwı kerek. 9.3-súwrette kremniy kristalında relaksaciya waqıtı hámde elektronlar háreketsheńligi mánisi temperatura ózgeriwine baylanıslılıǵı keltirilgen:



9.3 – s úwret. Tok tasıwshılardıń qosımta ion (1) lar hám akustikalıq fonon (2) lar tásirinde bir waqıttıń ózinde shashırawınıń relaksaciya waqıtın temperatura ózgeriwine baylanıslılıǵı.

Bul nátiyjeler tiykarınan τ hám μ di temperatura $T = 100\text{ K}$ ǵa shekem tiykarınan ionlasqan defektlerde shashıraw mexanizmin anıqlaydı. $T > 200\text{ K}$ de bolsa shashıraw tiykarınan kristall pánjere terbelisleri tiykarında boladı. Endi qosımta atomlar (donor yamasa akceptor) koncentraciyası artıwı menen yamasa kristallda kóp zaryadlı defektler bar bolǵanda kristall pánjerelerde shashıraw táhiri endi temperatura $T = 100\text{ K}$ nen jánede joqarıraq temperaturalarda júz beriwı múmkin.

IX bapqa tiyisli sorawlar:

- 1) Kinetikalıq qubılıs degende ne túsiniledi?
- 2) Deneniń teń salmaqlıq jaǵdayı ne hám bul jaǵdayda qanday process júz beredi?
- 3) Relaksaciya waqıtı dep nege ayıladı?

- 4) Zaryad tasıwshılardıń háreketsheńligine hám ol nelerge baylanıslı?
- 5) Elektronnıń elastik hám elastik bolmaǵan shashılıwı degende neni túsinesiz?
- 6) Zaryad tasıwshılardıń zaryadlangan defektlerde shashırawında qanday process júz beredi?
- 7) Bolcman teńlemesin jazıń hám onı túsindirip beriń?

X BAP

YARÍMÓTKIZGISHLERDÍŇ MAGNITLIK QÁSIYETLERI.

Bul bap juwmaǵında hám elektr, hám magnit maydanları barlıǵın úlgede indukciyalangan elektr tokini kórip shıǵamız. Aldıńǵı baplarda aytııp ótilgenindey, ekinshi reń ótkiziwsheńlik tenzori σ kublıq kristallda ádette diagonal matrica menen ańlatılıwı múmkin. Biraq sońǵı jaǵdayda magnit maydannıń bolıwı natuwrı boladı. Bul jaǵdayda ótkiziwsheńlik tenzori magnit maydanına sıızıqlı baylanıslı bolǵan nodiaganal elementlerdi óz ishine aladı. Usı magnit ótkisiwsheńlik tenzori ushın bir mánis alamız hám onı Xoll effekti dep atalǵan zárúr qubılıstı úyreniw ushın qollaymız. Bul jerde klassikalıq jaqtan qarawdı qollaymız. Bul jerde eki ólshemli electron gazdaǵı kvantlı Xoll effekti táriyplenedi.

Belgili magnit qásiyetleri boyınsha diomagnetik, paramagnetik hám ferromagnetik zatlar toparı bar. Sırtqı H magnit maydanda jaylasqan hár qanday denede qosımsha magnit maydan payda boladı. Nátiyje magnit maydannıń $\vec{B} = \vec{H} + \vec{H}'$ kernewliligi manit indukciya vektori delinedi. Magnetiktiń kólem birligindegi magnitleniw vektori etip $\vec{M} = \chi H$ kiritilse,

$$\vec{B} = \vec{H} + 4\pi\vec{M} = (1 + 4\pi\chi)\vec{H} = \mu\vec{H} \quad (10.1)$$

baylanıs orınlı boladı. Bunda χ – magnit, μ - magnit sińdirgishligi. Eger berilgen dene ushın $\chi < 0$ yamasa $\mu < 1$ bolsa, onı diamagnetik deymiz, $\chi > 0$ yamasa $\mu > 1$ sha'rtlerin qanaatlandıratug'ın dene paramagnetik boladı.

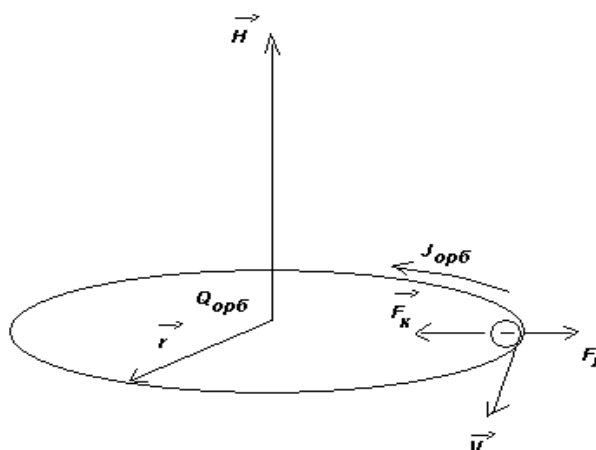
Ferromagnetik deneler (zatlar) ushın $\mu \gg 1$ bolıp, onıń magnet maydan kernewliligi $\vec{H}$ baylanıslılıǵı ózine tándir. Denelerdiń bólekshelerden quralıwı kóz qarasınan deneniń magnet qásiyetleri magnet momentiniń elementar tasıwshılarınıń biri – biri menen hám sırtqı magnet maydan menen óz – ara tásiiri arqalı anıqlanadı.

Magnet momentiniń elementar tasıwshılar – elektronlar, atom yadroları, protonlar hám neytronlar bolıp esaplanadı.

Biraq, yadronıń nátiyje magnet momenti elektronnıń magnet momentinen bir neshe tártipke kishkene hám sonıń ushın denelerdiń magnet momenti itibargá alınbaydı.

10.1-§. Atomdaǵı elektronnıń magnet momenti. Diamagnetizim

Belgili orbita boyınsha aylanıp atırǵan elektron orbital impuls momentine hám og'an sáykes magnet momentine iye boladı. Bunı Bor usınıs qılǵan vodorod atomı modeli mısasında kóriwi múmkin.



10.1. súwret

Yadro átirapında Bor orbitallarınan biri boylap v jiyilik penen aylanıp atırǵan elektron $I = ev$ aylanba (sheńber) tok payda etedi. Bul toktıń magnet momenti (elektronnıń orbital magnet momenti)

$$P_{\text{опб}} = I \cdot S = evS \quad (10.2)$$

Bunda S – elektron orbitasınıń maydanı. Bordin birinshi qaǵıydası boyınsha elektronnıń berilgen orbitadaǵı mexanik momenti, yaǵnıy impuls momenti $\hbar$ qa dárejeli bolıp

$$L_{\text{опб}} = mvr = n\hbar \quad (10.3)$$

bul jerde m – elektron massası, v – tezlik, G – Bor orbitasınıń radiusı, n – pútin san (1,2,3...) mexanik momenti basqashada súwretlew múmkin:

$$L_{\text{опб}} = mvr = m\omega r^2 = 2\pi r^2 mv = 2mvS \quad (10.4)$$

Bul (10.2) ha'm (10.3) formulalarınan $S = n\hbar / 2mv$ da tayıp, formulag'a qoysan' $P_{\text{опб}} = n \frac{e\hbar}{2m}$ (10.4) kelip shıǵadı. Elektron birinshi orbita boylap

háreket etkende ($n=1$) onıń magnit momenti $P_B = \frac{e\hbar}{2m}$ (10.5) boladı hám onı

Bor magnetonı dep ataydı ($P_B = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Dj / Tl}$)

Magnit momentiniń mexanik momentine qatnası $\Gamma_{\text{опб}}$ Giromagnit qatnas delinedi.

$$\Gamma_{\text{orb}} = \frac{P_{\text{orb}}}{L_{\text{orb}}} = \frac{e}{m} \quad (10.6)$$

Temir cilindrди óz kósheri átrapında aylandırıw aqıbetinde onıń magnitleniwi hám kerisinshe, temir cilindrden tok ótkergende onıń burılıwı (orbital impuls momentine iye bolıp qalıw) júz beriwinen ibarat Giromagnit tájriybelerde ólshengen Giromagnit qatnas (10.6) formulasınan 2 ma'rte u'lken bolıp shıqtı. Usı nátiyjeni túsindiriw ushın elektron óz kósheri átrapında aylanıwı menen baylanıslı magnit hám mexanik (spin) momentlerge iye boladı hámde olardıń qatnasın spin giromagnit qatnas

$$\Gamma_{\text{orb}} = 2\Gamma_{\text{orb}} = \frac{e}{m} \quad (10.7)$$

dep esaplawg'a tuwrı keldi.

Keltirilgen a'piwayı mısalda diomagnitizim qubılısın túsiniw alıw ańsat.

(10.1 – súwrette) kórsetilgenindey, elektron hám yadro arasındagı elektrostatik (Kulon) óz – ara tásir kúshi $F_{(K)}$ elektrondı w-múyeshli jiyilik penen aylandıradı:

$$F_K = m\omega^2 r \quad (10.8)$$

Sırtqı N magnit maydan payda qılınǵanda elektrongá Lorenc kúshi $F_L = evH$ tásir qıladı hám ol F_K qarama-qarsı baǵıtlanǵan boladı. Eki kúshtiń ayırması múyeshlik jiyilik $\Delta\omega$ shekem ózgertiredi $mr(\omega + \Delta\omega) = F_K - evH$ yamasa $mr\omega^2 + 2mr\omega\Delta\omega + mr(\Delta\omega)^2 = F_K - evH$ bul jerde $mr\omega^2 = F_K$, $v = r\omega$ ekenligin itibarǵa alsaq, $\Delta\omega \ll \omega$ dep esaplasa, joqarıdagı teńlikten

$$\Delta\omega = -\frac{eH}{2m} \quad (10.9)$$

qatnas kelip shıǵadı. Bul qubılıstı sonday etip túsindiriw (analiz) múmkin. Tuyıq tokqa (elektronnıń orbita boylap háreketinen payda bolǵan tokqa) magnit maydanında jup kúsh tásir etip, elektronnıń N maydan átrapında aylanba háreketin júzege keltiredi, onıń múyeshlik tezligi

$$\omega_L = eH/2m \quad (10.10)$$

kóriniske iye boladı. Bul háreket aqıbetinde elektronnıń orbital magnit momenti $\Delta_1 P$ hám onıń orbital togı $\Delta_1 I_{op6}$ ózgeredi:

$$\Delta_1 P = -\frac{e^2 r^2}{4m}; \quad \Delta_1 I_{op6} = -\frac{e^2 H}{4\pi m} \quad (10.11)$$

eger atomda i elektron bolsa, olardıń orbitaları r_i bolsa, atomınıń magnit maydanı tásirinde payda bolǵan indukciyalanǵan magnit momenti

$$\Delta P_a = -\frac{e^2 H}{4m} \sum_i^z r_{zi}^2 \quad (10.12)$$

kórinisinde súwretlenedi: r_{zi}^2 elektronnıń z- kósherinen (koordinata bası atom yadrosında, z kósheri bolsa H qa parallel etip alınǵan) uzaqlıǵınıń ortasha kvadratı. Ortasha summası

$$\sum_i^z r_{zi}^2 = \frac{2}{3} z \vec{r}^2 \quad (10.13)$$

boladı. Bul jerde $\vec{r}^2$ -elektronlardıń yadrodan uzaqlıǵınıń ortasha kvadratı. Demek

$$\Delta P_a = -\frac{e^2 z \vec{r}^2}{6m} H \quad (10.14a)$$

bolıp, 1sm^3 deneniń indukciyalanǵan diamagnit momenti

$$\Delta P = n_o \Delta P_a = -\frac{z n_o e^2 \vec{r}^2}{6m} \quad (10.14b)$$

formula arqalı anıqlanadı, bunda $n_o - 1\text{sm}^3$ taǵı atomlar sanı. Usı formuladan kórinip turǵanıday, indukciyalanǵan magnit moment sırtqı magnit maydangá qarama-qarsı baǵıtlanǵan boladı.

Kórip turǵanıımızday, atomlardagı elektronlardıń orbitalar boyınsha qozǵalıısına sırtqı magnit maydan tásirinde júzege keletuǵın bul moment diamagnit moment bolıp, bul qubılıs tiykarǵı orın tutatuǵın deneler diamagnit deneler boladı.

Joqarıdagı (10.14) formuladan diamagnitlik qabıllaǵıshın anıqlawımız múmkin:

$$\chi_d = -\frac{z n_o e^2 \vec{r}^2}{6m} \quad (10.15)$$

Solay etip, diomagnitizm barlıq denelerge tiyisli boladı. Biraq, bunnan basqa magnit qubılıslarıda bar, olardıń qaysı biri basım bolsa, sol qubılıs deneniń magnitlik qásiyetlerin anıqlaydı

10.2-§. Paramagnitizm

Eger atom yamasa molekula sırtqı magnit maydan bolganda, jáne óziniń magnit momentine iye bolsa, bunday atom (yamasa molekula) ózin kishkene magnitтей tutadı. Sırtqı magnit maydanniń payda bolıwı magnitshelerdiń maydan bağıtına burılıwın tastıyıqlap beredi. Bıraq, jıllılıq qozǵalıwı magnitshelerdiń tártipli bağıtlanıwın buzıp turadı. Bul eki qarama-qarsı tásirler aqıbetinde atom (yamasa molekula) lar magnit momentleriniń baǵdarları boyınsha qandayda bir bólistiriwi kelip shıǵadı. Eger bir atomnıń magnit momentine P_a dep, 1sm^3 daǵı atomlar sanın n_o dep belgilesek, bul jaǵdayda 1sm^3 kólemniń magnit momenti (magnitleniw vektori)

$$P(H) = \frac{n_o P_a^2 H}{3kT} \quad (10.16)$$

Formula arqalı anıqlanadı. Bul jaǵdayda paramagnit qabıllawshańlıq

$$\chi_n = \frac{n_o^2 P_a^2}{3K} \frac{1}{T} = \frac{C}{T} \quad (10.17)$$

ko'rinisinde boladı. Usı jerde C- Kyuri turaqlısı, (10.19) formulasındaǵı bul baylanıs Kyuri nızamı delinedi.

Ótkizgishlik elektronlarına magnit maydanınıń tásiiri eń áhmiyetli máselelerdiń biri bolıp esaplanadı. Sırtqı magnit maydan ótkizgishlik (erkin) elektronlarına eki qıylı tásir kórsetedi. Birinshiden, magnit maydan erkin elektronlarınıń qozǵalıw jolın iymeklestiredi, olardı vint sıyaqlı sızıq boylap qozǵalıwǵa májbúr etedi. Bul diomagnit qubılıs (Landau diamagnitizmi) boladı. Ekinshiden, spin magnit momentine iye bolǵan hár-bir elektronga magnit maydan baǵdarlawshı tásir kórsetedi, sebebi kristaldaǵı erkin zaryad tasıwshılar kvant sistemasın quraydı, Fermi – Dirak statistikasına boysınadı hám elektronlar spin magnit momentine Pauli nızamına boysınıw talabı qoyıladı. Bir qáddide turǵan eki elektronnıń spinleri antiparallel, yaǵniy birin-biri kompensatsiyalaydı. Sırtqı

maydan payda etilgende spin magnit momenti $\vec{H}$ qa parallel bolğan elektronnıń potentsial energiyası spini $\vec{H}$ ğa anti parallel bolğan waqtınan kemeyedi. Atap aytsaq, birinshi elektron turaqlı jaǵdayda boladı. Elektronlar sisteması turaqlı jaǵdayda bolıwı ushın anti parallel spinli elektronlar spin magnit momentleri awdarılıp, olar joqarı energiya jaǵdaylarına shıǵıp alıw kerek.

Ótkiziwsheńlik elektronlardıń paramagnit qabılshańlıǵı

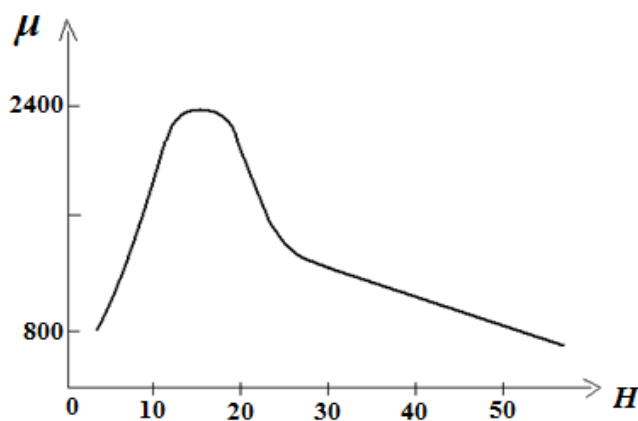
$$\chi_{\text{эп}} = \frac{n\mu_B^2}{F} \quad (10.18)$$

formula arqalı anıqlanadı. Usı jerde F – Fermi qáddi. Metallarda F hám n -temperaturalarǵa derlik baylanıslı bolmaydı. Sonıń ushında $\chi_{\text{эп}}$ temperaturaǵa hásiz baylanıslı boladı. Yarımótkizgishde elektronlar tıǵızlıǵın temperatura artqan sayın artıp baradı hám sonıń ushın olardıń paramagnit qabılshańlıǵı temperaturaǵa kúshli dárejede baylanısqa boladı.

10.3-§. Ferromagnetizmniń tábiyatı

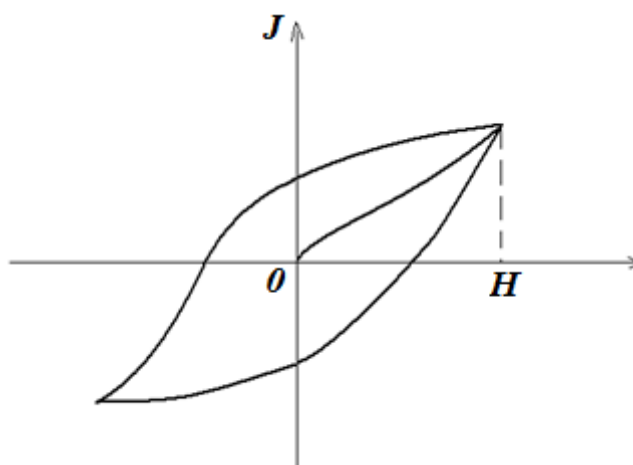
Ferromagnetik deneler kushli magnit qásiyetlerge iye bolğan deneler bolıp tabıladı. Olardıń tiykarǵı qásiyetleri tómendegilerden ibarat.

1.Ferromagnetiklerdiń deneler kúshli magnit sińdiriwsheńligi sırtqı magnit maydan kernewligine baylanıslı boladı (10.2 – súwret)



10.2 - súwret

2. Ferromagnetikler qaldıq magnetizmge iye boladı, yaǵnıy olar sırtqı magnit maydanı bolmaǵanda da magnitlengen jaǵdayda boladı. Qaldıq magnetizm magnit gisterezis juwmaǵı bolıp tabıladı (10.3 - súwret).



10.3 - súwret

3. Temir, nikel hám kobalt ferromagnit qásiyetlerge iye boladı. Kyuri noqatı dep atalatuǵın T_c temperaturadan joqarıda ferromagnetik paramagnetikke aylanıp qaladı hám onıń magnit qabılshańlıǵı

$$\chi = \frac{C}{T - T_c} \quad (10.19)$$

nızamǵa boysınadı (Kyuri - Veyss nızamı). Mısalı, temir ushın Kyuri noqatı 770°C boladı. Joqarıda aytıp ótkenimizdey, giro magnit tájriybeler ferromagnitlerde magnetizmnıń tiykarǵı sebebi spin bolǵanlıǵın tastıyqlaydı. Atap aytsaq, ferromagnetiklerdiń magnit momenti elektronlar spin magnit momenleriniń tártipsiz baǵıtlanǵanlıǵın anıqlaydı. Anıǵraǵı, ferromagnetizm payda bolatuǵınlıǵınıń zárúrli shárti ferromagnetik atomlardıń elektronlardıń birin – biri kompensaciya ete almaytuǵın spin magnit momentleri bar bolıwında. Mısalı, temir atomında kompensaciya qılınbaǵan spin boladı. Ferromagnetizm kristall denelerde kóringenliginen onıń imkaniyatı tómendegi qaǵıyda menen anıqlanadı: kristallı reshetka (tor) turaqlısı d nıń kompensaciya qılınbaǵan spinli elektron orbitası diametri $2R$ ge qatnası 1,5 den artıq bolıwı kerek, yaǵnıy

$$\left(\frac{d}{2R} \right) > 1,5 \quad (10.20)$$

P. Veys (1907) boljawına kóre, ferromagnit kristall judá kóp, biraq mikraskopiyalıq ólshemlerge iye bolğan kishkene oblastlar – domenlerden dúzilgen. Hár bir domen oblastında barlıq elementar magnetikler (atomlar magnit momentleri) bir qıylı bağıtlangan. Domen toyınğan úlken magnit momentine iye, biraq ayırım domenler magnit momentleri hár qıylı bağıtlangan. Aqıbetinde sırtqı magnit maydanı bolmağanda ferromagnetiktiń tolıq magnit momenti nolge teń bolıwıda mumkin.

Denelerdiń magnit qásiyeti tábiyatın tek kvant mexanikası ashıp túsindirip beredi. Oğan kóre, spontan (óz – ózinen) magnitleniw jağdayınıń júzege keliwinde almasıw óz – ara tásiiri sheshiwshi kriteriya boladı. Haqıyqattanda bul shárt orınlanganda almasıw energiyası ólshewi bolatuğın almasıw integralı oń boladı, usı jağdayda óz – ara tásirlesiwshi elektronlar spinleriniń parallel bağdarı maqullıraq, yaǵnıy domenler bar. Demek, ferromagnetik jağday orınlı boladı.

Domenlerdiń sıızıqlı ólshemleri $10^{-2} - 10^{-5} \text{ sm}$ tártipte bolıwına qaramastan, olardı mikroskopta kóriw múmkin. Tábiyatta anti ferromagnetikler dep atalğan denelerde bar ekenligi teoriyalıq jaqtan boljanğan, keyin bolsa (L. D. Londau 1933) usınday deneler tájriybe jolı menen anıqlanğan (Bizzet, Skvayr, Tze, 1938).

Mısalı, $MnO, MnS, NiSr, Cr_2O_3, VO_2$ hám basqa kop birikpeler antiferromagnetik deneler qatarına kiredi. Eger kirirken reshetskalar magnit momentleri bir – birine teń bolmasa, bunday zat ferromagnetik yamasa ferrit delinedi. Temir oksidi Fe_2O_3 hár bir yamasa bir neshe metall M oksidinen ibarat qatıspalar (M_x, Fe_y, O_z) ferritler boladı.

10.4-§. Yarımótkizgishli denelerdiń magnitlik qásiyetleri

Ápiwayı yarımótkizgish diomagnetikler boladı, olardı magnit yarımótkizgish dep esaplaymız. Biraq, bunday yarımótkizgishde anaw yamasa mınaw sebeblerden paramagnitizm júzegi keliwi múmkin, yaǵnıy erkin elektr toklar hám gewekler qosımta ataqları, túrli toshkalıq defektler hám olardıń toplamları jergilikli magnit momentleri iye bolıwı mumkin.

Eger magnit momentler kishkene hám onı júzege keltiriwshi momentler kem bolsa, bul jaǵdayda olar arasında tuwrı ximiyalıq baylanıs (tuwrıdan tuwrı, tikkeley almasıw) balmaydı, bálkim yarım erkin elektronlar járdeminde baylanıs (tikkeley bolmaǵan almasıw) ámelge asıwı múmkin.

Tikkeley almasıw bolmaǵan hám tikkeley bolmaǵan almasıw bolsa hálsiz bolǵan waqıtta járdemde ayılǵan magnit momentleri tártipke túspeydi, yarımótkizgish nomagnit boladı.

Atomlarında elektronlardıń d – yamasa f – qabıqları tolmaǵan qosımtaları bolmaǵan yamasa olar muǵdarı kem bolǵan $A^{IV}(Si, Ge)$, $A^{II}B^{VI}(CdS, CdTe, CdSe)$ túrindegi kristallar nomagnit yarımótkizgishlerge mısál boladı.

Bazı bir yarımótkizgishde atomlardıń d – yamasa f – qabıqları tolmaǵan qosımtalardıń eriwshenligi ádewir úlken. Bunday kristallǵa mısál retinde $Pb_{1-x}MnTe, Pb_{1-x}Fe_xTe$ bolıp (Mn xám Fe atomlarınıń keltirilgen qabıqları tolmaǵan). Olardıń x bir neshe procentti quraydı. Atomlarınıń úlesi jeterli dárejede úlken. Bul jaǵdayda Mn yamasa Fe atomları óz-ara kúshli tásirlerdi, júdá kóp magnit momentleri birlestirilgen magnit klasterler (inglizshe, acluster-bóleksheler jıynaǵı, toparı demek) payda boladı. Mısalı, $Pb_{1-x}Te$ da

$\chi = 5 \cdot 10^{-2}\%$ bolganda, bir neshe mınlarğa shekem temir atomlarınan dúzilgen klasterler bayqaladı. Bunda ferdomagnetik hám antiferromagnetiklik qubılısları bolıp ótiwi múmkin.

Diamagnet kristall reshetskası ishinde magnet tárepten tártiplengen oblastlar bolatuğın yarımótkizgish kristallar yarım magnet yarımótkizgishler delinedi.

Endi nomagnet yarımótkizgishlerdiń magnet qabıl etiwshenligi haqqında toqtap ótemiz. Bul úsh quramdı payda etiwshiden ibarat:

$$\chi = \chi_1 + \chi_2 + \chi_3 \quad (10.21)$$

bunda χ_1 – kristall reshetskaniń, χ_2 – zaryad tasıwshılardıń χ_3 – defektler magnet qabıl etiwshenligi. Ádette yarımótkizgishtiń ligerlenbegen mikrokristalınıń tájriybede ólshengen magnet qabıl etiwshenligi reshetskaniń χ_1 magnet qabıl etiwshenligi dep esaplanadı.

Erkin zaryad tasıwshılardıń χ_2 magnet qabıl etiwshenligi χ_{2n} paramagnet hám χ_{2d} diamagnet payda etiwshiler qosındısınan ibarat, biraq birinshi qurastırıwshı ekinshisi úlken, tilekke qarsı zaryad tasıwshılar paramagnet qásiyetke iye

Esaplawlar χ_{2n} niń tómendegi formulanı beredi.

$$\chi_{2n} = AT^{1/2} \exp(-Eg/2kT) \quad (10.22)$$

dep kórinip turganıNday haqıyqattanda erkin zaryad tasıwshılar menen baylanıslı χ_{2n} magnet kóbeytiwshiligi temperaturağa kúshli dárejede baylanısqan.

Endi túrli defektler payda qılatuğın χ_3 magnet qábil etiwshenlikti qaraymız.

Ápiwayı nomagnet yarımótkizgishde ayırım dárejede ornasqan (lokallang'an) magnet momentleri χ_3 du'ziwshi anıqlaydı. Qosımta atomları magnet momentine iye bolıwı múmkin. Óz-ara tásir etetuğın sayız donorlar yamasa aktseptorlardı

tómen tempereturadağı ionlaspağan jaǵdayda magnitlik qásiyetlerin túsini alıw ańsat boladı. Bunda qosımta atomınıń magnitlik qásiyeti artıqsha elektronın spin momenti qabıl etiwshenligi Lanjeven formulası boyınsha anıqlanadı.

$$\chi_{3p} = \frac{n_k \mu_B}{H} L(\alpha) \quad (10.23)$$

Bundağı $L(\alpha) = \text{ctg} \alpha - \frac{1}{2} : \alpha = \frac{\mu_B H}{kT}, n_k - 1 \text{ sm}^3$ qosımtadağı artıq elektronlar sanı.

Bunnan basqa, artıqsha elektron diamagnit qásiyetinede iye. Mısalı, eger sayız donorlar óz-ara tásirlesetuǵın jaǵdayda (qosımtalı zona payda bolǵan jaǵdayda) bunday donarlardıń paramagnit qabıl etiwshenligi

$$\chi_{3n} = c/T^{1-a} \quad (10.24)$$

boladı, bunda $c = n_k \mu_B (A/m^*)^a (1+a)^{-1}, a = n_k (Bm^*)^3$ A ha'm V – turaqlı sanlar.

10.5-§. Magnit maydanda rezonans qubılısları

Elektro – magnit nurlanıw kristallǵa túsip, onıń ishine kirip barǵanda barlıq tákirar nurlanıwdıń jutılıwı júz beredi, biraq tákrarlanıwda jutılıw júdá kúshli boladı, yaǵnıy jutılıwdıń eń joqarı shegine jetedi. Bul qubılıs rezonans qubılısı delinedi. Eger rezonans nurlanıwdıń atom yadroları spin magnit momentleri menen óz-ara tásiiri aqıbetinde júz berse, onı yadrolıq magnit rezonans (YAMR) delinedi.

Sunday-aq, kristall reshetkadağı qosımta atomlarınıń elektronları spini menen nurlanıw óz-ara tásirleskende júz beretuǵın rezonanstı elektron paramagnit rezonans (EPR) yamasa elektron-spin rezonans (ESR) delinedi.

Eger elektr magnit nurlanıw energiyası erkin elektronlardı (yamasa) gewekler jutatuǵın bolsa, bundaǵı rezonans ciklotron yamasa diamagnit rezonans dep ataydı.

Sinalǵan rezonanslardan jeke basqa quramalı óz-ara tásirlesiwinen kelip shıǵatuǵın rezonanslarda bar. Ayrımları haqqında toqtalıp ótemiz.

10.6-§. Yadrolı – kvadrupol rezonans (YAKR)

YAKR kórip shıǵılǵanda tek yadronıń kristallardaǵı qorǵanıw menen óz-ara magnittiń tásiiri itibarǵa alınadı. Elektr maydanınıń yadroǵa baǵdarlanǵanlıǵı tásiiri esapqa alınbaydı. Eger yadro zaryadı onıń bólistiriliwi sferik simmetrik bolmasa, bunday yadro kvadrupol elektr momentine iye boladı.

Kvadrupol elektr momentiniń óz-ara tásiiri energiyası bar

$$E_{\text{KB}} = \frac{e^2 q Q}{h J(J-1)} [3m^2 - J(J+1)] \quad (10.25)$$

Bul jerde q-yadro turǵan jerde elektr maydan gradienti, Q-yadronıń kvadrupol momenti, J-onıń spin momenti m-spinniń elektr maydanı baǵıtına proekciyası.

Sırtqı joqarı qaytalanıwshılıǵı maydan $|\Delta m| = 1$ bolǵan qáddiler arasında rezonans ótiwler payda etedi, joqarı qaytalanıwshılıq maydan energiyası jutıladı, yaǵnıy yadrolıq kvadrupol rezonans qubılısı payda boladı.

10.7-§. Elektron-paramagnit rezonans

Elektronlar spini turaqlı magnit maydandı eki qáddige maydalanadı, olardıń arasında ótiw imkaniyatı bar.

Magnit maydan bolmaǵanda elektronlar spinleri fazada tártipsiz baǵdarlanǵan hám jıyındı magnit moment nolge teń. Dene úlǵısı turaqlı magnit maydanǵa jaylastırılǵanda spinler magnit baylap yamasa maydanǵa qarata baǵdarlanǵan boladı. Spinniń magnit maydanına parallel salıstırǵanda ańsat bolǵanlıǵı sebepli elektronlar spinleriniń kópshilik bólegi magnit maydan bolıp

baǵdarlangan boladı. Nátiyjede indikiyalangan magnitleniw júzege keledi, magnitleniw vektorı magnit maydanı boylap baǵdarlangan boladı. Pauli paramagnitizm payda boladı. Qosımsha joqarı qaytalanıwshı maydan, onıń bir qaytalanıwshı maydanǵa parallel spinli elektronlardı antiparallel baǵdarlı jaǵdayda ótkeredi demek, joqarı tákirarlanıwshı elektromagnit maydan energiyası kúshli jutıladı elektron paramagnit rezonans (EPR) qubılısı júz beredi.

EPR juz beriwi ushın kristalldı spinleri juplangan elektronlar bolıwı shárt mısalı, temir atomında elektronlar ishki qabıǵı tolmaǵan hám juplangan spinler bar. Bunday atomlarda EPR dı jaqsı baqlaw múmkin. Eger yarımótkizgishli kristalına o'tiw elementleri (*Fe, Co, Ni*) nıń atomları bar bolsa, EPR usılında olardıń $10^{11} - 10^{12} \text{sm}^{-3}$ shamasındaǵı muǵdarın anıqlap alıw múmkin.

Magnit rezonans qubılıslardan jáne birewi ciklatron (diamagnit) rezonans qubılısı bolıp esaplanadı. Kúshli magnit maydanda erkin elektronlar yamasa gewekler maydan átirapında aylanba qozǵ'alıs qıladı. Eger bul qozǵ'alıs tákirarlanıwshı (tsiklatron qaytalanıwshı) alınǵan zattan ótkerilgen elektromagnit nurlanıw qaytalanıwshılıǵına teń bolsa, nurlanıw kúshli dárejede jutıladı. Bul qubılıs keńirek, toltırıp joqarıda bayan etilgen edi.

10.8-§. Magnit ótkiziwsheńlik tenzori

Dáslep, úlgi sheksiz, kublı magnit emes kristall dep qabıl etemiz. Ulıwmalıqtı joǵaltpay esaplaw múmkin, Bz magnit maydanı úlgige z kósheri boylap, F elektr maydanı bolsa – qáleget ıqtıyarıy baǵıt boyınsha berilgen. Úlgi arqalı toktı esaplaw ushın kvaziklassik jaqtan qarawdan paydalanamız. Elektr hám magnit maydanları birgeligindegi elektronlar háreketi teńlemesin Lorenc teńlemesi menen almastırıw zárúr:

$$m^* \frac{d^2 r}{dt^2} + \frac{m^*}{r} \frac{dr}{dt} = (-e) [F + (\nu \cdot B/c)], \quad (10.26)$$

Bunda c — jaqtılıqtıń vakuumdagı tezligi. m^* hám τ izotop, dep esaplağan edik. Teń salmaqlılıq sharayatlarda — $dv/dt = d^2r/dt^2 = 0$ bolǵanda, elektronnıń v_d dreyf tezligi ushın tómendegi ańlatpanı alamız:

$$(m^*/\tau)v_d = (-e)[F + (v_d \cdot B/c)] \quad (10.27)$$

x , y hám z kósherleri boylap v_d nıń úsh komponenti ushın tómendegishe jazıw múmkin:

$$(m^*/\tau)v_{d,x} = (-e)[F_x + (v_{d,y}B_z/c)], \quad (10.28a)$$

$$(m^*/\tau)v_{d,y} = (-e)[F_y - (v_{d,x}B_z/c)], \quad (10.28b)$$

$$(m^*/\tau)v_{d,z} = (-e)F_z. \quad (10.28v)$$

Bul teńlemelerdiń hár birin n elektronlar tıǵızlıǵına hám zaryadqa ($-e$) kóbeytirip, $j = n(-e)v_d$ tok tıǵızlıǵı ushın tiyisli teńlemelerdi alamız:

$$j_x = (ne^2\tau/m^*)F_x - (eB_z/m^*c)j_y, \quad (10.29a)$$

$$j_y = (ne^2\tau/m^*)F_y + (eB_z/m^*c)j_x, \quad (10.29b)$$

$$j_z = (ne^2\tau/m^*)F_z. \quad (10.29v)$$

Bul jerde tómendegi belgilerdi kirgiziw qolaylı boladı:

$$\sigma_0 = ne^2\tau/m^* \quad (10.30)$$

(nol maydanda ótkiziwsheńlik) hám

$$\omega_c = eB_z/(m^*c) \quad (10.31)$$

(B_z magnit maydanı bolǵanda elektronnıń klassikalıq ciklotron chastotası).

Bul belgilerden paydalanıp, (10.29) ti ápiwayılastırıw múmkin:

$$j_x = \sigma_0 F_x - \omega_c \tau j_y, \quad (10.32a)$$

$$j_y = \sigma_0 F_y + \omega_c \tau j_x, \quad (10.32b)$$

$$j_z = \sigma_0 F_z. \quad (10.32v)$$

(10.32) ni sheship, tok tıǵızlıǵınıń úsh komponentasın tabamız:

$$j_x = \frac{1}{1 + (\omega_c \tau)^2} \sigma_0 (F_x - \omega_c \tau F_y), \quad (10.33a)$$

$$j_y = \frac{1}{1 + (\omega_c \tau)^2} \sigma_0 (F_y + \omega_c \tau F_x), \quad (10.33b)$$

$$j_z = \sigma_0 F_z. \quad (10.33v)$$

(10.33) ge tiykarlanıp, elektronlar ushın $\sigma(B)$ magnet ótkiziwsheńliktiń ulıwmalastırılǵan tenzori ańlatpasın tómendegi kóriniste kiritiw múmkin:

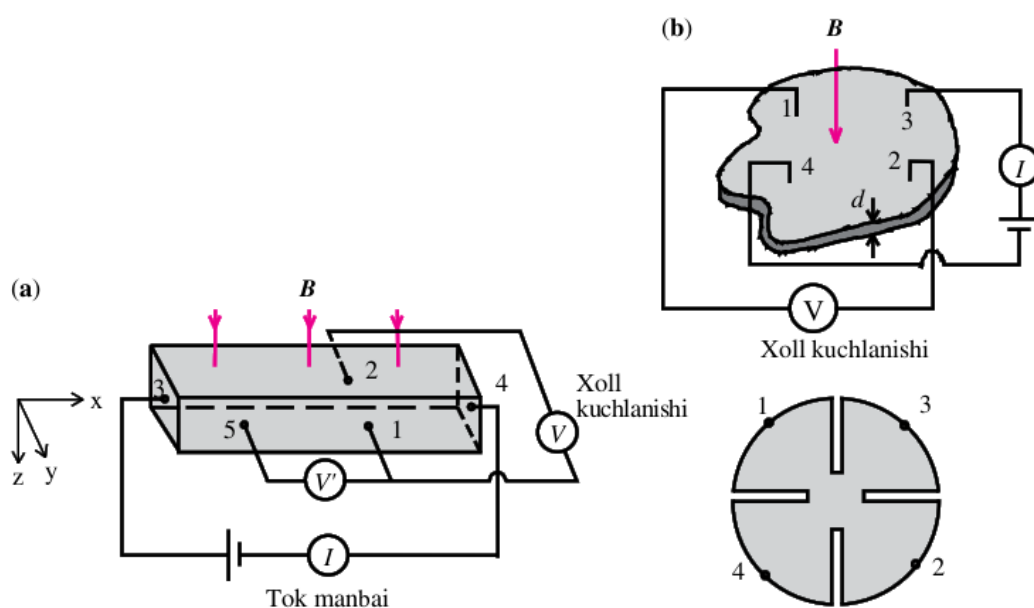
$$\sigma = \frac{\sigma_0}{1 + (\omega_c \tau)^2} \begin{pmatrix} 1 & -\omega_c \tau & 0 \\ \omega_c \tau & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 + (\omega_c \tau)^2 \end{pmatrix}. \quad (10.34)$$

(10.34) diogonal hám antisimmetrik tenzori jıyındısın óz ishine alǵanın eskertip óteyik. Nodiagonal hallarınıń belgisi zaryad belgisine baylanıslı boladı.

(10.34) ǵa tiykarlanıp juwmaq shıǵarıw múmkin, magnet maydanı zaryad transportına eki tárepleme tásir kórsetedi: 1) magnet maydanına perpendikulyar bolǵan ótkiziwsheńlik $[1 + (\omega_c \tau)^2]^{-1}$ márte kemeyedi. Úlginiń magnet maydanındaǵı qarsılıǵınıń tiyisli ósiwi magnet magnet qarsılıq dep ataladı (B nıń kishkene mánisleri ushın B^2 qa proporcional); 2) magnet maydanı berilgen elektr maydanına perpendikulyar baǵıtta tokti de indukciyalaydı, bul bolsa ótkiziwsheńlik tenzorında nodiagonal elementler payda bolıwına alıp keledi. Olar magnet maydanına sıızqlı baylanıslı, anıǵıraǵı diagonal elementler magnet maydanına kvadratlı baylanıslı boladı. Nodiagonal elementler Xoll effektine alıp keledi. Ol keying paragrafda bayan etiledi.

10.9-§. Xoll effekti

Óziniń uzın tárepi menen x kósheri boylap baǵıtlanǵan tuwrımúyeshli brusok formasındaǵı úlginı kórip shıǵamız. (10.4 - súwret). Endi F elektr maydanı x kósheri boylap berilgen, B magnit maydanı bolsa aldınǵıday z kósheri boylap baǵıtlanǵan. Lorenc nızamına muwapıq, elektronlar x kósheri boylap dreyf bolǵanda olar hám elektr maydanı tásirinde y baǵıtında kúsh tásinin sezedi. Bul bolsa y baǵıtında tok payda bolıwına alıp keledi, sonda bul baǵıtta berilgen elektr maydanı bolmaydı. Mine usınday tipli eksperimental konfiguraciyalardan biri – toktıń x baǵıtı boylap tuyıq shınjırı hám y baǵıtında ajratılǵan shınjırı esaplanadı. йўналишида ажратилган занжиридир (10.4 a – súwret) . Ekinshı shınjırı ajratılǵanlıǵı sebepli j_y tok tıǵızlıǵı nolge teń bolıwı kerek. (10.4. b) dan kórinip turǵanıday, B magnit maydanı tásirinde úlgide F_y elektr maydanı indukciyalanadı. Bul qubılıs Xoll effekti dep ataladı. Onı E.X. Xoll (1855-1938) Jon Xopkins universitetinde islegen waqtında 1879 jılda ashqan. Xoll sonday – aq 1881-1921 jıllarda Garvard universiteti professorı bolıpta islegen.



10.4 - súwret. Xoll ólshewleri ushın úlgiler konfiguraciyları: a) brusok formasındaǵı úlgi; b) van der Pau usılında isletiletuǵın juqa plynka kórinisindegi úlgi. Belgiler: B — magnit maydanı, I — tok deregi, V — Xoll kernewin ólshew ushın voltmetr.

Baqlanıp atırǵan qubılıstıń ápiwayı fızikalıq kórinisi tómendegilerden ibarat. Magnit maydanı tásirinde zaryadlardıń y baǵıtında dreyflik baqlanadı. Nátiyjede zaryadlar y baǵıtına perpendikulyar bolǵan úlginin eki qarama – qarsı betlerinde toplanadı hám Lorenc kúshi tásin kompensaciyalaytuǵın F_y elektr maydanın jaratadı. $j_y = 0$ bolǵan teńsalmaqlıq sharayatında, indukciyalanǵan maydan

$$F_y = -\omega_c \tau j_x / \sigma_0, \quad (10.35a)$$

X baǵıtındaǵı tok bolsa tómendegige teń boladı:

$$j_x = \sigma_0 F_x. \quad (10.35b)$$

Bul eksperimentte ólshenetuǵın shama F_y , sırtqı qadaǵalanıwshı parameter - j_x hám B. Sonıń ushın Xoll koefficienti R_H tómendegi qatnasta anıqlanadı:

$$R_H = F_y / (j_x B_z). \quad (10.36)$$

(10.35 a) hám (10.36) den tabamız:

$$R_H = -\frac{\omega_c \tau}{\sigma_0 B_z} = -\frac{1}{nec}. \quad (10.37)$$

R_H belgisi zaryad belgisine baylanıslılıǵın aaytıp óteyik. (10.37) degi Xoll koefficienti teris bolǵan waqıtta (zaryadlar elektronlar dep aldıq), R_H tesikler ushın ońǵa aylanıwın kórsetiw ańsat. Usı barısta kóriwge boladı, Xoll effekti úlgi degi zaryadlanǵan tasıwshılardıń hám koncentraciyası, hám belgisin anıqlawda zárúr usılda esaplanadı eken. Bul usıldıń qollanıwı tek yarımótkizgishler menen sheklenip qalmaq, metallardı úyreniwde keń paydalanıladı. Elektronlar hám gewekler bolǵan kompensaciyalanǵan yarımótkizgishli úlgi lerinde R_H tómendegi kóriniske iye:

$$R_H = \frac{N_p - b^2 N_n}{ec(bN_n + N_p)^2}, \quad (10.38)$$

bubda N_n hám N_p — sáykes halda óń hám teris zaryadlardıń koncentraciyaları, b bolsa olardıń háreketsheliginıń qatnasına teń: μ_n / μ_p . Anizotrop massalar hám τ ushın (10.37) ańlatpası Gerring hám Fogt tárepinen alıńǵan edi.

10.10-§. Juqa qatlamlarda Xoll koefficienti (van der Pau usılı)

Aldıńǵı paragrafda táriyplengen Xoll effektin ólshepler barısında, úlgi tórtmúyeshli brusok formasına iye bolıwı talap etiledi, bul belgili bir muǵdarda sheklewlerdi bildiredi. Úlgiler kóbinese ótkizbeytuǵın taglik ústindegi juqa epitaksiyal úlgipler plyonkalar kórinisinde óstiriledi. Bunday juqa plyonkalar Xoll usılın qollanıw van der Pau tárepinen ámelge asırıldı. Van der Pau usılı boyınsha Xoll koefficienti hám juqa úlginıń salıstırmalı qarsılıǵın ólshep ushın eki ádette qollanılatuǵın geometriyalar 10.4 b – súwrette keltirilgen edi. Bul usıl ásirese iqtıyariy yamasa disk formasındaǵı úlgi ushın qolaylı boladı.

Tok 3 hám 4 kontaktlarınan keltiriledi, Xoll kernewi bolsa 1 hám 2 kontaktler arasınan ólshenedi. Forması “beda japıraǵı” kórinisininiń ústinligi sonda (10.4 b – súwretke qarań), tok Xoll kontaktları arasınan ótpeydi. Xoll kernewin ólshep waqtında qátelikti kemeyttiriw ushın (bul qáte tok baǵıtı 1 hám 2 kontaktların birlestiriwshı sıızıqqa perpendikulyar bolmaslıǵı aqıbetinde payda boladı), kernew ádette $V_{12}(\pm B)$ magnit maydanı menen hám $V_{12}(0)$ maydansız ólshenedi. Van der Pau Xoll koefficienti tómendegishe kóriniske iye ekenligin kórsetedi:

$$R_H = \frac{[V_{12}(B) - V_{12}(0)]d}{I_{34}B} = \frac{[V_{12}(B) - V_{12}(-B)]d}{2I_{34}B}, \quad (10.39)$$

bunda d — plyonka qalınlıǵı, B — magnit maydanı hám I_{34} — 3 kontakttan 4 kontaktqa ótiwshi tok.

Úlginin salıstırmalı qarsılıǵı da van der Pau usılı járdeminde ólsheuge boladı. Bul halda eki qońsı kontakt, mısalı 2 hám 3 (I_{23}) tok kontaktları sıpatında isletiledi, qalǵan eki kontakt bolsa (V_{41}) kernewinin túsiwin ólsheu ushın qollanıladı. Nátiyje qarsılıǵı R_{41} , I_{23} arqalı belgilenedi:

$$R_{41, 23} = |V_{41}| / I_{23}. \quad (10.40)$$

Soń ekinshi ólsheu orınlanadı, bunda tok 1 hám 3 kontaktlar arasınan aǵıp ótedi, kernew bolsa 2 hám 4 kontaktları arasında ólshenedi. $R_{24,13}$ nátiyjelewshi qarsılıqtan hám $R_{41,23}$ qarsılıqtan tómendegi ańlatpa járdeminde q di esaplaw múmkin:

$$q = \frac{\pi d (R_{24, 13} + R_{41, 23}) f}{2 \ln 2}, \quad (10.41)$$

bunda f — $R_{24,13}/R_{41,23}$ qatnasına baylanıslı bolǵan kóbeyttiriwshi; bul qatnas 1 ge anıq teń bolǵanında bolsa $f = 1$ boladı. Eger bul qatnas 10 ǵa teń bolsa, bul halda f 0,7 ge shekem kemeyedi. Ádette bul qatnastın úlken mánisi anıq emes yamasa kontaktlardın sıpatsızlıǵı, yamasa úlginin tegis emes ligerleniwi haqqında ekenliginen derek beredi.

10.11-§. Elektronlar energiya boyınsha bólistiriliwi halatı ushın Xoll efekti

Házirge shekem barlıq zaryadlangan tasıwshılar energiyaları $f(E)$ bólistiriw funkciyası menen E diapazonında bólistiriliw jaǵdayın kórip shıǵamız. Elektronlardın qálegen xarakteristikalarınıń ortasha mánisi $a(E)$ ni $\langle a \rangle$ dep belgileymiz:

$$\langle a \rangle = \int a(E) f(E) dE \left(\int f(E) dE \right)^{-1}. \quad (10.42)$$

Bul ańlatpa járdeminde (10.43) di tómendegi kóriniste qayta jazıw múmkin:

$$\langle j_x \rangle = \alpha F_x - \gamma B_z F_y, \quad (10.43a)$$

$$\langle j_y \rangle = \alpha F_y + \gamma B_z F_x, \quad (10.43b)$$

$$\langle j_z \rangle = \langle \sigma_0 \rangle F_x, \quad (10.43v)$$

bunda

$$\alpha = \frac{ne^2}{m^*} \left\langle \frac{\tau}{1 + (\omega_c \tau)^2} \right\rangle, \quad (10.44a)$$

$$\gamma = \frac{ne^3}{m^{*2}c} \left\langle \frac{\tau^2}{1 + (\omega_c \tau)^2} \right\rangle. \quad (10.44b)$$

Kúshsiz magnit maydan shegarasında, yamasa $(\omega_c \tau)^2 \ll 1$ бۆлганида, $1 + (\omega_c \tau)^2$ ti 1 ge almastırıw múmkin:

$$\alpha \cong \frac{ne^2}{m^*} \langle \tau \rangle, \quad \gamma \cong \frac{ne^3 \langle \tau^2 \rangle}{m^{*2}c}. \quad (10.45)$$

Bul jaqınlasıw shegarasında elektronlardı bólistiriw ushın Xoll koefficientin tómendegishe ańlatıw múmkin:

$$R_H = \frac{\langle \tau^2 \rangle}{(-nec) \langle \tau \rangle^2} = -\frac{r_H}{nec}. \quad (10.46)$$

$r_H = \langle \tau^2 \rangle / \langle \tau \rangle^2$ kóbeyttiriwshi Xoll faktori dep ataladı. Onıń mánisi τ ға úlesin qosatuǵın shashılıw mexanizmlerine baylanıslı bolıp, ádette 1 mánisine iye boladı. Kúshli magnit maydanları yamasa júdá tazaúlgiler shegarasında, $(\omega_c \tau)^2 \gg 1$ bolánda, $r_H = 1$ ge iye bolǵan (10.46) ańlatpası tuwrı bolıp qalaberedi.

Ulıwma alganda, R_H hám σ_0 dı ólshep, tasıwshılar háreketsheńligin anıqlaw hámde (10.37) járdeminde tómendegi ańlatpanı alıw múmkin:

$$\mu = R_H \sigma_0, \quad (10.47)$$

Biraq tájriybede tasıwshılar ádette energiyalar boyınsha bólistiriledi, sonın ushın (10.47) ańlatpası menen anıqlanǵan háreketsheńlik μ_H Xoll háreketsheńligi dep ataladı hám μ menen tómendegi qatnas arqalı baylanıstırıladı:

$$\mu_H = r_{H\mu}. \quad (10.48)$$

Juwmaq

Bul bapta biz sırtqı maydanlar tásirinde yarımótkizgishlerde tok tasıwshılar transportı haqqında sóz ettik. Erkin tok tasıwshılardı qayta normallastırılǵan massalardı iye bolǵan klassik zaryadlar sıpatında kózden ótkeriw imkaniyatına iye bolıwı ushın, effektiv massa jaqınlasıwınan paydalandıq. Aldın kúshsiz maydanlar halatı kórip shıǵılǵan edi, onda maydan tok tasıwshılar bólistiriliwin buzbaydı, bálkim pútkil bólistiriliwdiń dreyf tezligine háreketleniwine alıp keledi. Dreyf tezligi shashıraw waqtı dep atalatuǵın waqıt penen anıqlanadı, bul waqıt dawamında tok tasıwshılar shashırawdan aldın maydan tásirinde tezlestiriledi. Dreyf tezligi hám elektr maydanı ortasında proporcionalıq koefficienti sıpatında, háreketsheńlik táreyplenedi. Biz akustikalıq hám optikalıq fononlarda hámde ionlasqan kirispelerde tasıwshılardıń shashıraw itimallıqların islep shıqtıq. Usı shashıraw itimallıqları járdeminde tok tasıwshılar háreketsheńliginiń temperaturaǵa baylanıslılıǵı tabıldı. Onıń tiykarında ionlasqan kirispelerde tómén temperaturalarda shashırawdı minimumǵa keltiriw jolı sıpatında, modullengen legirlew usılı usınıldı. Biz kúshli elektr maydanlarda tok tasıwshılar háreketiniń barısın sıpatlı bayan ettik. Íssı tasıwshılar Om nızamına boysınbaytuǵınlıǵı kórsetilgen. Bunıń ornına olardıń kúshli maydanlardagı dreyf

tezlikleri toyınıw tezligi dep atalıwshı turaqlı turaqlı mániske iye boladı. Optikalıq fononlarda shashıraw waqtında tasıwshılardıń energetikalıq hám impuls relaksaciyası nátiyjesinde, kópshilik yarımótkizgishler ushın toyınıw tezligi shama menen mánisin kórsettik. GaAs sıyaqlı n – tipindegi bir neshe yarımótkizgishlerde dreyf tezligi toyınıw tezliginen asıwı múmkin bolıp, teris diferencial qarsılıq qubılısı júzege keledi. Ol usı yarımótkizgishlerde ótkiziwsheńlik zonasınıń qosımsha jaylasqan qáddileri bar ekenligi áqibeti bolıp, bul jaylasqan qáddilerdiń energiyaları ótkiziwsheńliktiń eń tómen zonası minimumınıń energiyasınan shaması 0,1 eV shamaǵa joqarıraq jaylasqan. Teris diferencial qarsılıq mikrotolqınlı jıyiliklerde toktıń spontan oscillıyacıyalarına alıp keledi, bunda juqa úlgiler kúshli elektr maydanları tásirinde ushraydı. Bul qubılıs Gann effekti dep ataladı. Elektr hám magnit maydanları birgelikte tásir kórsetgen waqıtta, bul yarımótkizgishlerdegi tok tasıwshılar transportı ekinshu reń antisimmetrik tenzorı menen túsindiriledi, olar magnit ótkiziwsheńlik tenzorı dep ataladı. Bul tenzordıń zárúr qollanıw tarawı – Xoll effektin túsindirip beriw esaplanadı. Xoll koefficienti úlgidegi zaryadlangan tok tasıwshılardıń belgisi hám koncentraciyasın anıqlawdıń eń qolaylı usılın usınadı.

Paydalan ıl ған ádebiyatlar:

1. S. Zaynobiddinov., A. Teshebaev. Yarimótkazgichlar fizikasi. Toshkent, “Óqituvchi”, 1999-y.
2. Q.A. Ismaylov., S.I. Vlasov. Yarimótkizgishli ásbaplar fizikasi, (Oqıw qollanba). Nókis, “Bilim”, 2008.
3. Q.A. Ismaylov. Yarimótkizgishler fizikasi tiykarları, (Oqıw metodikalıq qollanba). Nókis, “Bilim”, 2010.
4. K.V. Shalimova. Fizika poluprovodnikov. M: “Energoizdat”, 1985.
5. V.I. Fistul. Vvedenie v fiziku poluprovodnikov. M: “Vısshaya shkola”, 1984.
6. V.L. Bonch-Bruevich., S.G. Kalashnikov. Fizika poluprovodnikov. M: “Nauka”, 1977.
7. P.T. Oreshkin. Fizika poluprovodnikov i dielektrikov. M: “Visshaya shkola”, 1977.
8. X. Akramov., S. Zaynobiddinov., A. Teshebaev. Yarimótkazgichlarda fotoelektrik hodisalar. Toshkent, “Ózbekiston”, 1994.
9. S. Zi. Fizika poluprovodnikovix priborov. Ch 1, 2. M: “Mir”, 1984.

M A Z M U N I

I BAP. YARIMÓTKIZGISHLER FIZIKASI TIYKARLARI. QATTI DENELER.

1.1-§. Kirisiw.....	3
1.2-§. Qattı deneler fizikasındaǵı tiykarı túsinipler.....	4
1.3-§. Qattı denelerdiń kristall pánjereleri.....	12
1.4-§. Miller indeksleri.....	20
1.5-§. Keri elementar pánjere.....	22

II BAP. YARIMÓTKIZGISH MATERIALLARDIŃ TÚRLERI

2.1-§. Ápiwayı yarımótkizgishler	31
2.2-§. Binarlı birikpeler.....	31
2.3-§. Oksidler.....	32
2.4-§. Qatlamlı yarımótkizgishler.....	33
2.5-§. Organikalıq yarımótkizgishler	33
2.6-§. Magnitli yarımótkizgishler	34
2.7-§. Basqa hár túrli yarımótkizgishler	34

III BAP. ÓSIRIW USÍLLARÍ

3.1-§. Choxral usılı.....	35
3.2-§. Bridjmen usılı.....	37
3.3-§. Gaz fazasınan ximiyalıq epitaksiya.....	37
3.4-§. Molekulyar nurlı epitaksiy.....	39
3.5-§. Suyıq fazalı epitaksiya.....	44

IV BAP YARIMÓTKIZGISHLERDIŃ TIYKARGÍ QÁSIYETLERI.

4.1-§. Yarımótkizgishlerdiń ájayıp qásiyetleri.....	45
4.2-§. Yarımótkizgishli materiallarda ximiyalıq baylanı.....	46
4.3-§. Yarımótkizgish materiallarında kristall pánjere dúzilisi	48
4.4-§. Yarımótkizgishli materiallardaǵı defektler.....	52
4.5-§. Yarımótkizgish materiallarına qosımta atomlardı kiritiw jolları.....	54
4.6-§. Qosımta atomlar diffuziyası.....	55

4.7-§. Kirispe atomlardıń eriwshenligi.....	59
4.8-§. Binar yarımótkizgish materiallarında qosımta atomlar eriwshenligi.....	62

V BAP YARIMÓTKIZGISHLERDE ELEKTRONLAR HÁM GEWEKLERDİŇ STATISTIKASI.

5.1-§. Yarımótkizgishlerde tok ótiw mexanizmi	65
5.2-§.Yarımótkizgishlerdegi zaryad tasıwshılar statistikası.	67
5.3-§. Zonadağı kvant jaǵdaylar tıǵızlıǵı.....	68
5.4-§.Elektronlar hám geweklerdiń energiyalar boyınsha bólistiriliwi.....	69
5.5-§. Zonalarda erkin elektronlar hám erkin gewekler tıǵızlıǵı (koncentraciyası).....	70
5.6-§.Menshikli yarımótkizgishlerdegi elektron hám gewekler tıǵızlıǵı formulaların analizlew.....	73
5.7-§.Qosımtalı aynımaǵan yarımótkizgishlerdegi elektronlar hám gewekler tıǵızlıǵı.....	76
5.8-§. Yarımótkizgishlerdegi tok tasıwshılardıń tábiyatı.....	80
5.9-§. Fermi–Dirak bólistiriliwi.....	84
5.10-§. Elektr neytrallıq teńlemesi.....	87
5.11-§. Menshikli yarımótkizgishler.....	88
5.12-§. Qosımta atomlı yarımótkizgishlerde Fermi qáddi.....	91
5.13-§. Donor hám akceptorlı qosımta atomlarına iye bolǵan yarımótkizgishler.....	95
5.14-§. Birden kóp energetik qáddi payda etiwshi qosımta atomları bar bolǵan yarımótkizgishler.....	96

VI BAP YARIMÓTKIZGISHLERDEGI FOTOELEKTRIK HÁDIYSELER

6.1-§ Fotoótkizgishlik.....	98
6.2-§ Zaryad tasıwshılardıń jasaw waqtı.....	100

6.3-§ Jutıw beti.....	102
6.4-§ Rekombinaciyalıq hám fotosezgirlikti asırıwshı oraylar.....	104
6.5-§ Rekombinaciya túrleri.....	106
6.6-§ Jaqtılıqtıń yarımótkizgishlerde jutılıwı yamasa optikalıq qásiyetleri.....	108
6.7-§ Jaqtılıqtıń yarımótkizgishte jutılıw tábiyatı haqqında qısqasha maǵlıwmat.....	110
6.8-§ Menshikli jutılıwlar.....	111
VII BAP QATTI DENELERDE ELEKTRONLARDIŇ ENERGETIK HALLARI	
7.1-§. Elektronlardıń atomlardagı energetik halları.....	113
7.2-§. Qattı denelerde elektronlardıń energetikalıq halı.....	117
7.3-§. Energetikalıq zonadag'ı elektronlardın' halatlar sanı.....	126
7.4-§. Kristall ushın Shredinger teńlemesi.....	128
7.5-§. Adibatikalıq jaqınlasıw hám valentli approksimaciya.....	130
7.6-§. Bir elektronlı jaqınlasıw.....	131
7.7-§. Elektronnıń effektiv massası.....	134
VIII BAP METALL – YARIMÓTKIZGISH KONTAKTI HÁM $p - n$ ÓTIWDIŇ FIZIKASI	
8.1-§. Qattı denelerdegi shıǵıw jumısı.....	140
8.2-§. Metall – yarımótkizgish kontakti.....	141
8.3-§. Omliq kontakt.....	146
8.4-§. Shottki diodı.....	147
8.5-§. $p - n$ ótiwdi alıw texnologiyası.....	151
8.6-§. $p - n$ ótiw fizikası.....	153
8.7-§. $p - n$ ótiwge sırtqı derek jalǵanǵandaǵı jaǵdayı.....	156
8.8-§. Geteroótiwler.....	160
IX BAP YARIMÓTKIZGISHLERDEGI KINETIKALÍQ QUBÍLISLAR HÁM DEFECTLER TÚRLERI	

9.1-§. Yarımótkizgishlerdegi kinetikalıq qubılıslar.....	164
9.2-§. Yarımótkizgishlerdegi zaryad tasıwshılardıń háreketsheńligi hám onıń fizikalıq áhmiyeti.....	166
9.3-§. Bolcman teńlemesi.....	168
9.4-§. Elektronlardıń kristall pánjere defektlerindegi shashırawı.....	171
9.5-§. Zaryad tasıwshılardıń zaryadlangan defektlerde shashırawı.....	171
9.6-§. Elektroneytral defektlerde shashıraw.....	173
9.7-§. Bir qıylı atomlardan du'zilgen sheksiz sıızqlı reshetka	173

X BAP YARÍMÓTKIZGISHLERDÍŇ MAGNITLIK QÁSIYETLERI.

10.1-§. Atomdağı elektronnıń magnit momenti. Diamagnetizim.....	179
10.2-§. Paramagnitizm.....	182
10.3-§. Ferromagnetizmniń tábiyatı.....	184
10.4-§. Yarımótkizgishli denelerdiń magnitlik qásiyetleri.....	186
10.5-§. Magnit maydanda rezonans qubılısları.....	189
10.6-§. Yadrolı-kvadrupol rezonans (YAKR).....	190
10.7-§. Elektron-paramagnit rezonans.....	191
10.8-§. Magnit ótkiziwsheńlik tenzorı	192
10.9-§. Xoll effekti.....	194
10.10-§. Juqa qatlamlarda Xoll koefficienti (van der Pau usılı).....	196
10.11-§. Elektronlar energiya boyınsha bólistiriliwi halatı ushın Xoll effekti.....	198
Paydalanılğan ádebiyatlar.....	201
M a z m u n i.....	202