

ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ
ОЛИЙ ВА ЎРТА МАХСУС ТАЪЛИМ ВАЗИРЛИГИ
З.М.БОБУР НОМЛИ АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

Қаххоров Шавкатжон Муҳаммаджонович

МОНОКРИСТАЛЛАРДА КИРИШМА АТОМЛАРИ
МИКРОБИРИКМАЛАРИНИНГ ХОСИЛ БЎЛИШ
МЕХАНИЗМЛАРИ

Ихтисослиги 5A440101- “Назарий физика”
Магистр-академик даражасини олиш учун ёзилган

ДИССЕРТАЦИЯ

Иш кўриб чиқилди ва химояга тавсия этилди:
“Физика” кафедраси мудири:

_____ ф-м.ф.н. А.О.Курбанов

Илмий раҳбари:

_____ проф. С.Зайнобидинов

Андижон - 2012 йил

МУНДАРИЖА.....	1
КИРИШ.....	2
I БОБ. КРИСТАЛЛАР ВА УЛАРНИНГ ТУЗИЛИШИ	
ҲАҚИДА УМУМИЙ МАЪЛУМОТЛАР.....	4
1.1. Кристалларнинг тузилиши, кремний монокристалли мисолида.....	4
1.2. Кристаллардаги нуқсонлар.....	21
1.3. Кремнийда кислород, углерод ва уларнинг бирикмалари.....	38
Қисқача хулосалар.....	45
II БОБ. КИРИШМА АТОМЛАРИНИНГ КРИСТАЛЛ	
ПАНЖАРАДАГИ ХОЛАТЛАРИ.....	47
2.1. Кристалларда киришма атомлари энергетик сатхларининг ҳосил бўлиши.....	47
2.2. Донор ва акцептор киришмалар.....	52
2.3. Киришма атомларининг кристал панжарадаги ҳолатлари. Марганец атомлари мисолида.....	54
Қисқача хулоса.....	61
III БОБ. КРИСТАЛЛАРДА КИРИШМА	
АТОМЛАРИНИНГ БИРИКМАЛАРИ.....	63
3.1. Кристал панжарада киришма атомлари микробирикмаларининг пайдо бўлиш механизмлари, уларнинг таркиби, тузилиши ва ўлчамлари.....	63
3.2. Микробирикмаларнинг кристал хусусиятларига таъсири.	72
Қисқача хулосалар.....	76
Умумий хулосалар.....	77
Фойдаланилган адабиётлар.....	80
Интернет маълумотлари.	

МУНДАРИЖА

I БОБ. КРИСТАЛЛАР ВА УЛАРНИНГ ТУЗИЛИШИ ҲАҚИДА УМУМИЙ МАЪЛУМОТЛАР

1. Кристалларнинг тузилиши, кремний монокристалли мисолида.
2. Кристаллардаги нуқсонлар.
3. Кремнийда кислород, углерод ва уларнинг бирикмалари.

Қисқача хулосалар

II БОБ. КИРИШМА АТОМЛАРИНИНГ КРИСТАЛЛ ПАНЖАРАДАГИ ХОЛАТЛАРИ

1. Кристалларда киришма атомлари энергетик сатхларининг ҳосил бўлиши.
2. Донор ва акцептор киришмалар.
3. Киришма атомларининг кристал панжарадаги ҳолатлари. Марганец атомлари мисолида.

Қисқача хулоса.

III БОБ. КРИСТАЛЛАРДА КИРИШМА АТОМЛАРИНИНГ БИРИКМАЛАРИ

1. Кристал панжарада киришма атомлари микробирикмаларининг пайдо бўлиш механизмлари, уларнинг таркиби, тузилиши ва ўлчамлари.
2. Микробирикмаларнинг кристал хусусиятларига таъсири.

Қисқача хулосалар.

Умумий хулосалар.

Фойдаланилган адабиётлар.

Интернет маълумотлари.

Кириш

Маълумки яримўтказгичларнинг ўзига хос хусусиятларга эга. Уларнинг бу хусусиятлари кўп жihatдан яримўтказгич кристалл панжарасининг мукамаллик даражасига боғлиқ. Бошқа томондан уларнинг хусусиятларини бошқариш мақсадида кристаллга турли киришмалар киритилади.

Маълумки киритилган киришма атомларининг хаммаси ҳам электр фаол ҳолатда бўлавермайди. Тажрибаларнинг кўрсатишича киришма атомларининг асосий қисми электр фаол бўлмаган микробирикмалар ва комплекслар шаклида бўлади. Ҳозирги пайтда микробирикмалар табиатини, уларнинг яримўтказгич электрофизик хусусиятларига таъсирини ўрганиш борасида кўплаб ишлар қилинмоқда. Лекин, шунга қарамай бу соҳада ҳозиргача кўплаб ҳал этилмаган муаммолар қолмоқда.

Яримўтказгичли асбобларнинг функционал имкониятларини ва сифатини ошириш, уларнинг турли шароитларда (юқори ҳарорат, радиация, юқори босим) ўз хусусиятларини ўзгартирмасдан ишлашида киришмавий атомлар, уларнинг микробирикмалари муҳим аҳамиятга эга эканликлари маълум бўлмоқда. Шу нуқтаи-назардан келиб чиққан ҳолда микробирикмаларнинг тузилишини, уларнинг табиатини билиш яримўтказгичли асбоблар параметрларини яхшилашда муҳим аҳамиятга эканини айтиш мумкин.

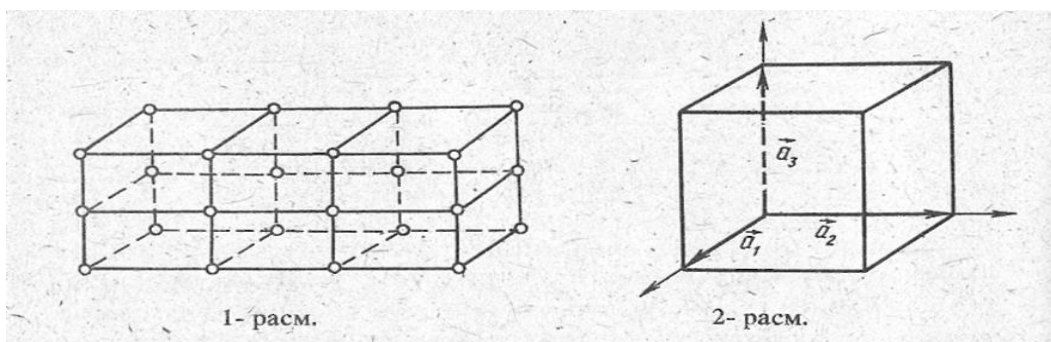
Ушбу ишда биз кристалл панжара, хусусан яримўтказгич кристалл панжарасининг тузилиши, кристалл ҳажмига киришма атомларини киритиш усуллари, киришма атомларининг яримўтказгич кристалл панжарасидаги жойлашиши, $\text{Si} \langle \text{Ni} \rangle$ таркибидаги Ni микробирикмаларининг табиати, уларнинг ҳосил бўлишига таъсир қилувчи омилларни, уларнинг тузилиши, кимёвий таркибини ўрганиш шу куннинг фани ва амалиёти учун ғоят муҳим

аҳамиятга эга. Шу муносабат билан ушбу ишда кремний монокристалларида киришма атомлари ҳолатларини ўрганишга бағишланади.

I БОБ. КРИСТАЛЛАР ВА УЛАРНИНГ ТУЗИЛИШИ ҲАҚИДА УМУМИЙ МАЪЛУМОТЛАР

1.1. Кристалларнинг тузилиши, кремний монокристалли мисолида

Мутлақ ноль температурада кристалл атомларининг (масалан, уни ташкил қилувчи ҳар қандай зарралар) нинг марказлари бир-бири билан туташтирилса, фазовий панжара ҳосил бўлади, уни *кристалл панжараси* дейилади.



1-расм

2-расм

(1-расм). Демак, кристалларда атомларнинг жойлашиши фазовий даврийлик (ёки трансляцион симметрия) хоссасига эга.

Ҳар қандай кристаллда бир текисликда ётмаган учта асосий йўналиш (бош йўналишлар) бўлади: бу йўналишларда бир хил ўриндаги (эквивалент вазиятдаги) қўшни атомлар (ионлар, молекулалар) орасидаги масофалар векторлар орқали белгиланади. Чексиз кристалл панжарасини ҳар бир вектор йўналишида уларга қаррали масофага силжитиш кристалл панжараси вазиятини ўзгартирмайди. Шунинг учун ($i = 1, 2, 3, \dots$) векторлар *асосий* ёки *масштаб векторлар* ёки *трансляцион даврлар* дейилади.

Шу учта векторлар устига қурилган параллелепипед энг кичик катак (элементар ячейка) дейилади (2-расм). Равшанки, бундай энг кичик катакнинг ҳажми $V_0 = []$ бўлади. Кристалл панжарасида атомларнинг марказлари жойлашган нуқталар—*тугунлар*, улар орасидаги соҳа—*тугунлараро соҳа* деб аталади.

Ҳар қандай мураккаб фазовий панжара содда панжаралардан (Браве панжараларидан) тузилган бўлади. Браве панжаралари геометрик жиҳатдан мумкин бўлган содда панжаралар бўлиб, уларнинг сони 14 та.

Идеал кристаллнинг асосий хоссаси—фазода атомларнинг даврий жойлашишидан қуйидаги муносабат келиб чиқади: агар чексиз кристалл

$$\vec{a}_n = n_1 \vec{a}_1 + n_2 \vec{a}_2 + n_3 \vec{a}_3 \quad (1.1)$$

вектор қадар кўчирилса, у ўз-ўзига мос, тушади, бунда n_1, n_2, n_3 —бутун сонлар.

Равшанки, координаталар функцияси бўлган барча физик катталиклар кристалл ичида уч ўлчовли даврий функция бўлади. Бунда $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$ векторлар билан белгаланадиган кристаллдаги нуқталарда мазкур катталиклар бир хил қийматга эга бўлади. Шунинг учун, масалан, $V(\vec{r})$ электростатик потенциалнинг даврийлик шарти бундай бўлади:

$$V(\vec{r}) = V(\vec{r} + \vec{a}_n). \quad (1.2)$$

Бу уч ўлчовли даврий функцияни Фурье қаторига ёйиб, баъзи бир алмаштиришлар бажарилгандан кейин, уни

$$V(\vec{r}) = \sum_b V_b e^{i(\vec{b} \cdot \vec{r})} \quad (1.3)$$

кўринишда ифодалаш мумкин. (1.2) шартни (1.3) ифодага татбиқ этиб векторни аниқлаш шартини топамиз:

$$\vec{b} \cdot \vec{a}_1 = 2\pi g_1, \quad \vec{b} \cdot \vec{a}_2 = 2\pi g_2, \quad \vec{b} \cdot \vec{a}_3 = 2\pi g_3, \quad (1.4)$$

бунда g_1, g_2, g_3 - бутун сонлар. Бу (1.4) шартлар асосида вектор қуйидаги

$$\vec{b} = \vec{b}_g = g_1 \vec{b}_1 + g_2 \vec{b}_2 + g_3 \vec{b}_3 \quad (1.5)$$

кўринишда ифодаланади. Бу ерда $\vec{b}_i$ ларни ,

$$\vec{b}_1 = 2\pi \frac{[\vec{a}_2 \vec{a}_3]}{V_0}, \quad \vec{b}_2 = 2\pi \frac{[\vec{a}_3 \vec{a}_1]}{V_0}, \quad \vec{b}_3 = 2\pi \frac{[\vec{a}_1 \vec{a}_2]}{V_0} \quad (1.6)$$

кўринишда танлаб олиш керак.

Ҳақиқатан,

$$\vec{a}_i \cdot \vec{b}_i = \begin{cases} \text{агар } i \neq k \text{ бўлса, } 0 \\ \text{агар } i = k \text{ бўлса, } 2\pi \end{cases} \quad (1.7)$$

Агар панжара векторлар асосида тузилган бўлса, бундай панжара *тўғри панжара* дейилади ва вектор *тўғри панжара вектори* деб юритилади. Аксинча, векторлар асосида тузилган панжара *тескари панжара* дейилади ва вектор *тескари панжара вектори* деб юритилади. Учта вектордан ясалган параллелепипед тескари панжаранинг энг кичик катаги (*элементар ячейкаси*) дейилади, унинг ҳажми қуйидаги ифодадан аниқланади:

$$V_{\text{таҳ}} = \vec{b}_1 [\vec{b}_2 \vec{b}_3] = \frac{(2\pi)^3}{V_0}$$

Тескари панжара тушунчасининг тадбиқига мисол сифатида Брегг-Лауэ қонунининг тегишли ифодасини келтирамиз. Маълумки, кристалл панжара рентген нурлари учун дифракцион панжара вазифасини бажаради

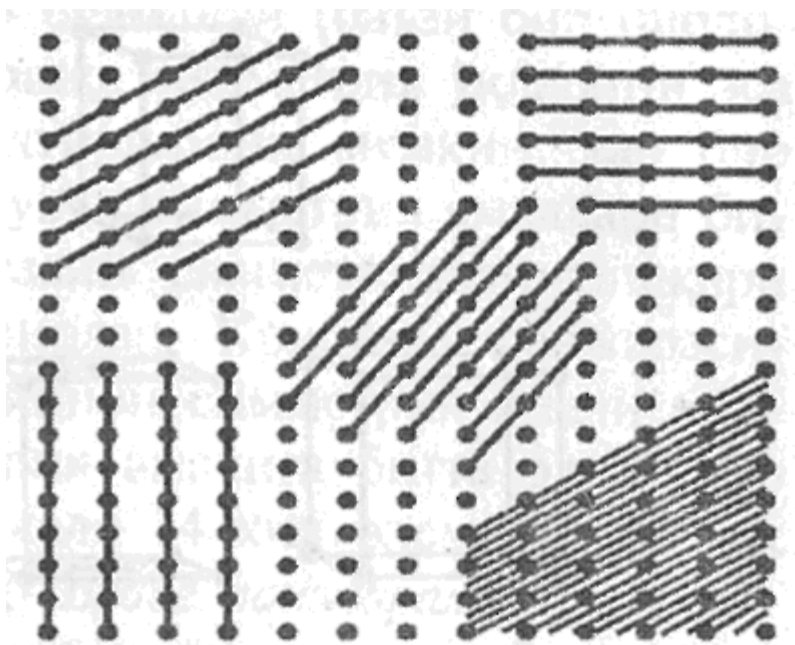
(рентген нурлари λ тўлқин узунлиги кристалл панжарасининг доимийси тартибида бўлади).

Кристаллга тўлқин вектори билан аниқланадиган рентген нурлари тушаётган бўлсин. Бу ҳолда интерференцион максимумлар шарти қуйидаги кўринишда бўлади:

$$\frac{1}{2} \vec{b}_g^2 + (\vec{b}_g \vec{k}) = 0 \quad (1.8)$$

Миллер индекслари.

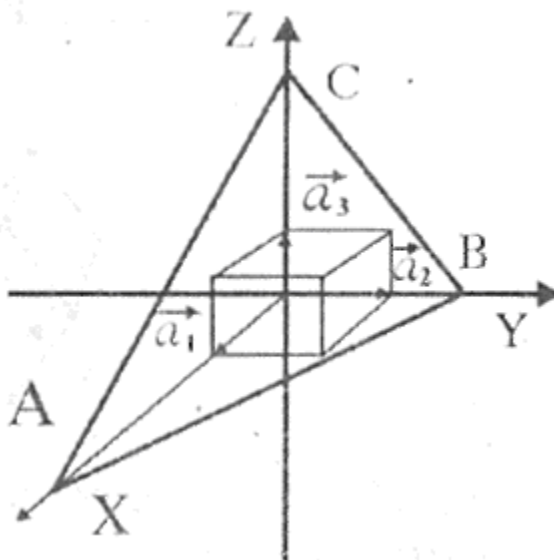
Кристаллларнинг анизотропияси, уларда турли йўналишларда физик хоссаларни турлича бўлиши, шу йўналишларни фарқлаш учун маълум бир белгилашлар зарур эканлигини кўрсатади. 3-расмда кристалл панжараси тасвирланган, ундан кўриниб турибдики О 0 ва 0А кесиб ўтувчи текисликлар турли йўналишга эга ва улар трансляцион векторларга нисбатан турлича жойлашган.



3-расм. Текисликларнинг Миллер индекслари

Бундай текисликларни фарқлаш учун *Миллер индекслари* белгиларидан фойдаланамиз. Ушбу индекслар қандай топилишини қуйида кўрсатиб ўтамиз. Координаталар ўқини шундай танлаб оламизки, улар элементар катакнинг трансляцион векторлари билан устма-уст тушсин. (3-чизма). Бизга (ABC) текислик индексларини топиш керак бўлсин. Унинг учун дастлаб биз текисликни координата $\rightarrow$ ўқлари билан кесишган жойларини

аниқлаб $m = \frac{OA}{a_1}, n = \frac{OB}{a_2}, p = \frac{OC}{a_3}$ сонларни топамиз.

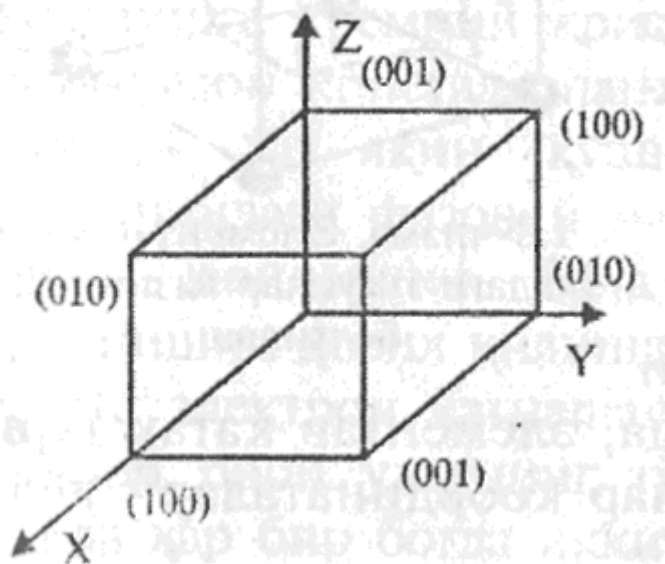


4-расм. Миллер индексларини топишга доир

Координата ўқларини бир узунлик бирлиги ўша ўқда ётувчи трансляцион вектор узунлигига тенг бўлади. Бундай турли масштабдаги координата ўқларини танлаш, белгилашларни осонлаштиради. (m, n, p) сонлари топилгандан кейин ўша текисликнинг Миллер индексини аниқлаш мумкин. Унинг учун (m,n,p) сонларининг тескари нисбатлари ёзилади, яъни ва шу нисбатга тенг бўлган энг кичик бутун сонлар ёзилади, масалан у сонлар h; k; l бўлсин. Демак,

$$h : k : \ell = \frac{1}{m} : \frac{1}{n} : \frac{1}{p} \quad (1.9)$$

У ҳолда (h , k , ℓ) сонлар ABC текисликнинг *Миллер индекслари* деб аталади. Бир мисол кўриб ўтамиз. Бирор текислик учун $m=1$, $n=1/2$, $p=1/3$ бўлсин, у ҳолда $h:k:l = \frac{1}{1} : \frac{1}{\frac{1}{2}} : \frac{1}{\frac{1}{3}}$ яъни ушбу текислик учун Миллер текисликлари $h=1$, $k=2$, $l=3$ бўлади ва мазкур текислик (123) кўринишда белгиланади. Агар текислик бирор координата ўқиға параллел бўлса, шу ўққа мос индекс 0 га тенг бўлади. Агар текислик ўқни манфий қисмида кесиб ўтса, ўша ўққа мос индекс манфий бўлади, лекин ишора соннинг олдиға эмас тепасиға қўйилади, $h=-1$, $k=2$, $l=2$ бўлса, текислик (122) кўринишда белгиланади. 5-чизмада кубнинг ён текисликлари келтирилган. [(100), (010), (001), (100) ва бошқалар]. Бу текисликлар эквивалент булгани учун уларни бир оилаға мансуб текисликлар деб қаралади ва катта қавс билан белгиланади {100}, қаттиқ жисмнинг ушбу йўналишлар бўйича физик хоссалари бир хилдир.



5-расм. Миллер индексларини топиш мисоли.

Кристалда текисликлардан ташқари, йўналишларни ҳам белгилаш қабул қилинган. Йўналишни белгиловчи индекслар шундай энг кичик бугун u , v , w , сонларки, уларнинг нисбати (u,v,w) шу йўналишда олинган

векторнинг координата ўқларидаги проекциялари ўзаро нисбатига тенгдир. Бу ерда ҳам координаталарнинг масштаб бирлиги трансляцион вектори узунлигига тенг деб олинади. Йўналиш индекслари тўртбурчак қавслар ичига ёзилади. Масалан, $[100]$, $[100]X$ — ўқи бўйича мусбат ва манфий йўналишларни билдиради. Эквивалент йўналишлар оиласи синиқ қавс билан белгиланади $\langle u,v,w \rangle$ XOY ёқнинг диагонали $[110]$ билан белгиланади. $[111]$ - кубнинг фазовий диагонали. Кубик сингонияда агар $h=u$, $k=v$, $l=w$ бўлса, $[uvw]$ йўналиш (hkl) текисликка перпендикуляр бўлади.

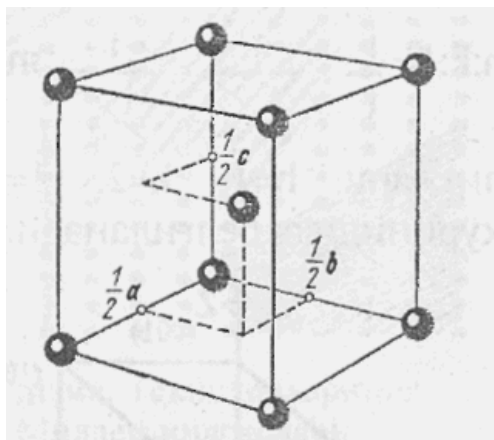
Элементар катакдаги тугун координаталари ҳолатини аниқлаш учун ҳам белгилаш қабул қилинган. Тугунлар трансляцион векторларнинг қанча қисмини ташкил этса, ўша сонлар билан белгиланади.

Масалан, 6-чизмада келтирилган элементар ячейка марказидаги тугун координатаси ни ташкил қилади.

Ушбу сонлар қавсиз ёзилади.

Агар тугунлар ён ёқлар марказларида бўлса, (ёқий марказлашган элементар катак) уларнинг координаталари қуйидагича ёзилади:

$$\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0; 0 \frac{1}{2} \frac{1}{2}; \frac{1}{2} 0 \frac{1}{2}.$$



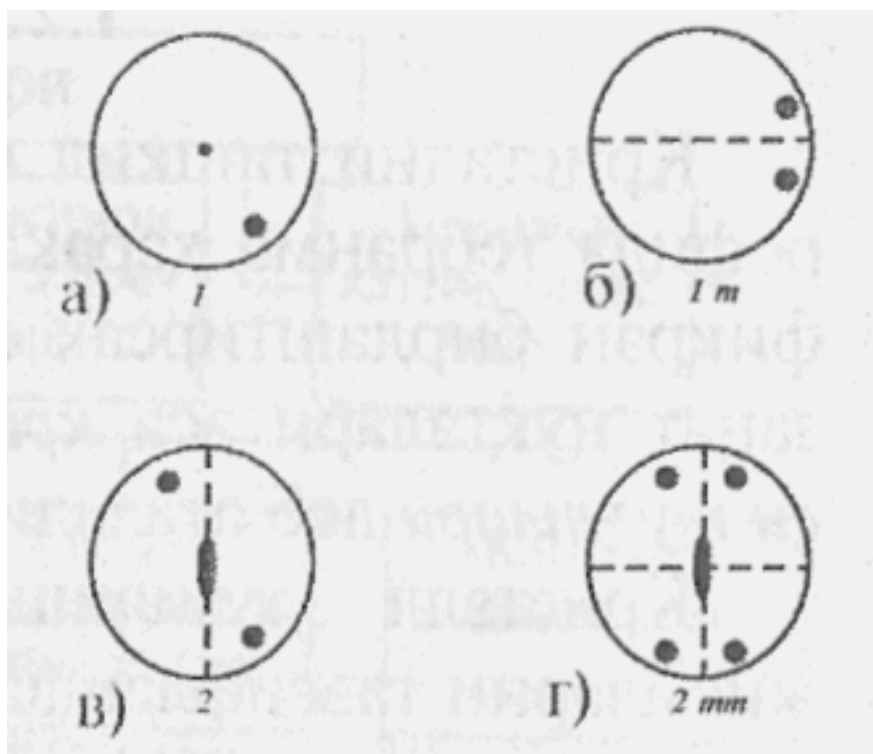
6-расм. Элементар катакдаги тугунлар вазиятини белгилаш

Кристалл тузилишлар тавсифи келтирилган жадвалларда олдин одатда, элементар катак тури ва ўлчамлари берилади, кейин тугунлар координаталари келтирилади.

Кристаллар сингониялар.

Симметрия деганда биз жисмнинг устида маълум бир амалларни (буриш, силжитиш, акслантириш) бажарганимизда жисм ўз-ўзига устма-уст тушиши ва барча йўналишларда физик хоссаларининг аввалгидек ўзгаришсиз қолишини тушунамиз.). Мисол тариқасида 6-чизмада келтирилган шакллар симметриясини кўриб чиқамиз.

7,а- расмдаги шаклнинг бирор ўққа ёки текисликка нисбатан симметрияси йўқ. Ушбу шакл фақат 360° бурчакка бурилганда ўзи билан ўзи устма-уст тушади. Бундай куйи симметрияга эга бўлган жисмларни халқаро



7-расм. Шакллар симметрияси

белгилашда 1 рақами билан белгиланади ва шакл биринчи тартибли симметрия ўқиға эға дейилады. 7, б-расмдаги шакл эса узук-узук чизик билан тасвирланган текисликка нисбатан симметрик бўлады, бундай шакл симметрияси $1m$ кўринишда ёзилады. 7, в-расмдаги шаклни 180° га маълум бир ўқ атрофида бурганимизда устма-уст тушади, 360° га бурганда у икки марта устма-уст тушади, демак, иккинчи тартибли симметрия ўқиға эға — 2. Охирги шаклимиз иккинчи тартибли симметрия ўқиға ва икки симметрия текислигига эға, яъни — $2mm$. Кристаллар ҳам симметрияға эға, уларнинг симметрияси кристалл панжарасининг симметриясидан келиб чиқади. Кристаллар элементар катакнинг ташкил этувчиларини, яъни трансляцион векторларнинг узунлигига ва улар орасидаги бурчакларнинг қийматига қараб 7 та катта гуруҳға бўлинадилар. Бу гуруҳларнинг ҳар бири ўз номиға эға бўлиб, *кристалл сингониялари* деб аталади (1-жадвалға қаранг).

Кристал учун мумкин бўлган барча симметрия амаллари кристалнинг *симметрия гуруҳини* ташкил қилады. Симметрия гуруҳлари ҳам икки тоифаға бўлинади: *нуқтавий* ва *трансляцион*.

1-жадвал

№	Кристалл сингонияси	Элементар катакни тавсифловчи катталиклар (параметрлар)
1	Триклин	$a_1 a_2 a_3$
2	Моноклен	$a_1 a_2 a_3$
3	Ром бик	$a_1 a_2 a_3$
4	Тетрогонал	$a_1 = a_2 a_3$
5	Кубик	$a_1 = a_2 = a_3$
6	Тригонал	$a_1 = a_2 = a_3$
7	Гексагонал	$a_1 = a_2 a_3$

Нуктага нисбатан акслантириш (инверсия), ўқ атрофида буриш ва текисликка нисбатан акслантириш билан боғлиқ бўлган симметрия амаллари *нуқтавий симметрия* гуруҳини ташкил қилади. Кристалнинг ташқи симметриясини аниқловчи бундай нуқтавий симметрия гуруҳларининг сони 32 та бўлиб уларнинг кристалл сингониялари бўйича бўлиниши 2- жадвалда келтирилган.

2- жадвал

Кристалл сингониялар	Нуқтавий гуруҳнинг белгиланиши		Нуқтавий гуруҳ номи
	Халқаро	Шёнфлис бўйича	
1.Триклин		C_1 C_i	Моноэдрик Пиромидал
2.Моноклин	2 m 2/m	C_2 C_s C_{2h}	Ўқли диэдрик Ўқсиз диэдрик Призматик
3.Ромбик	222 mm mmm	D_2 D_{2v} D_{2h}	Ромб-тетраэдрик Ромб-пирамидал Ромб- дипирамидал

4.Тетрагонал	4	C_4	Тетрагонал пирамидал
	422	D_4	Тетрагонал трапетсионал
	4/m	C_{4h}	Тетрагонал дипирамидал
	4/mm	C_{4v}	Дитетрагонал пирамидал
	4/mmm	D_{4h}	Дитетрагонал Дипирамидал дипирамидал
	2m	S_4	Тетрогонал тетраэдрик
5.Тригонал		D_{2d}	Тетрагонал скаленоэдик
	3	C_3	Тригонал пирамидал
	32	D_3	Тригонал трапетсиоэдик
	3 m	C_{3v}	Дитригонал пирамидал
	м	C_{3i}	Ромлоэдик
		D_{3d}	Дитригонал скаленоэдик

6.Гексагонал		C_{3h}	Тригонал
	$6/m2$	D_{3h}	дипирамидал
	6	C_6	Дитригонал дипирамидал
	622	D_6	Гексагонал
	$6/m$	C_{6h}	пирамидал
	$6/m\bar{m}$	C_{6v}	Гексагонал трапетсиоэдрик
7.Кубик	$6/m\bar{m}m$	D_{6h}	Гексагонал дипирамидал
			Дигексагонал
			пирамидал
			Дигексагонал дипирамидал
7.Кубик	23	T	Тритетраэдрик
	m	T_h	Дидодексаэдрик
	3m	T_d	Гексатетраэдрик
	432	O	Трионтоэдрик
	$m\bar{m}$	O_h	Гексантиоэдрик

2-жадвалда ушбу 32 та нуқтавий симметрия гуруҳларини халқаро қабул қилинган белгиланишидан ташқари, кристаллограф олим Шёнфилис киритган белгилашлар ҳам келтирилган. Қаттиқ жисмда кристалл панжарасиниң мавжудлиги 1,2,3,4, 6-чи тартибли симметрия ўқларидан юқори тартибли симметрия ўқлари бўлмаслигига олиб келади. 5-чи, 7-чи тартибли. симметрия ўқи ҳам бўлиши мумкин эмас, чунки беш ва етти

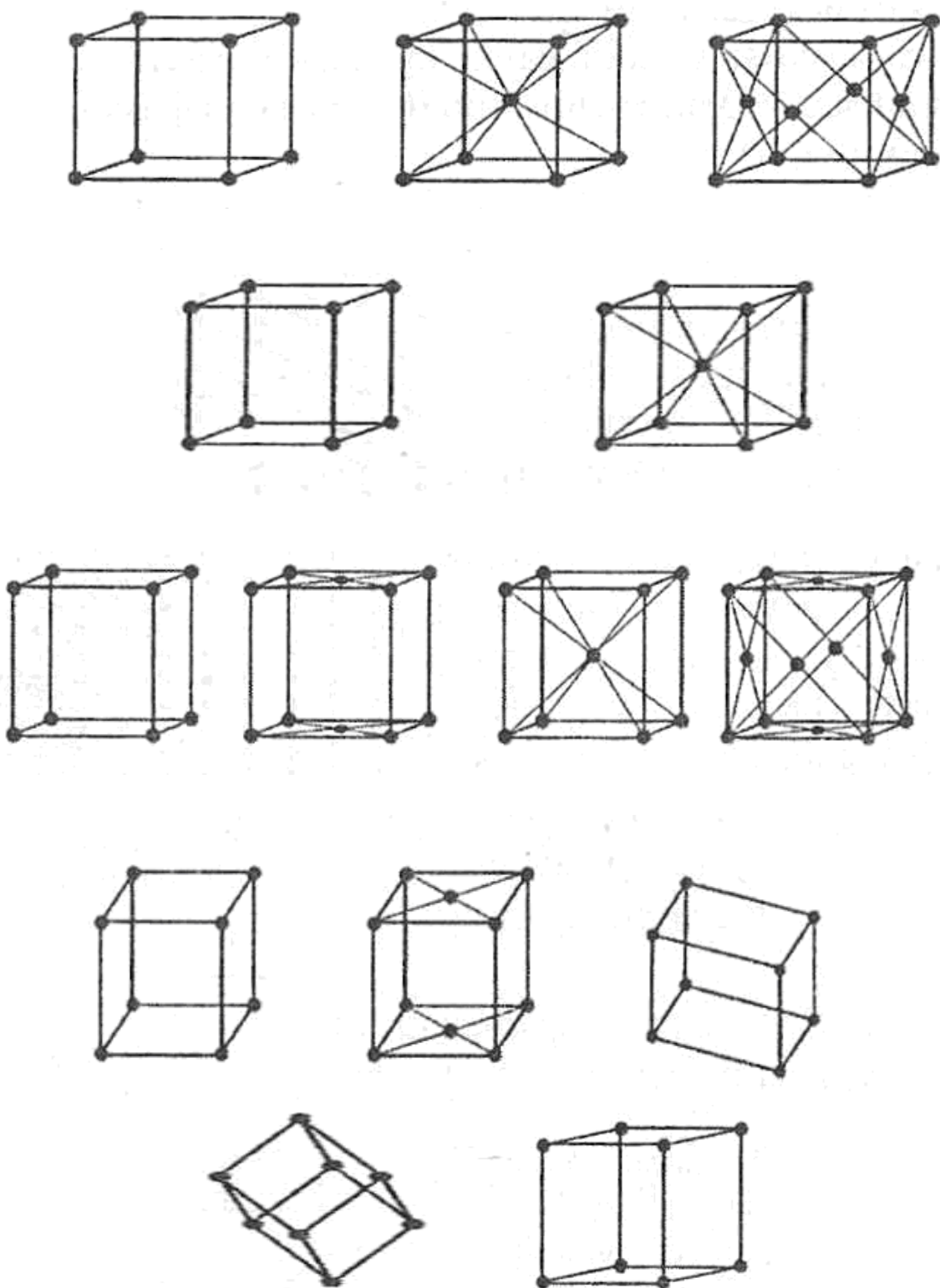
бурчакли шакл ёрдамида фазони қолдиқсиз тўлдириб бўлмайди (баъзи бир биологик кристаллар бундан истисно). Бошқа симметрия ўқларини эса юқоридаги симметрия ўқларига келтирилиши мумкин, ҳар бир симметрия гуруҳи асосий ҳосил қилувчи симметрия амаллари билан белгиланади.

Кристаллар нуқтавий симметриядан ташқари трансляцион симметрияга ҳам эгадирлар. Кристалл панжарасининг мумкин бўлган 14 хил трансляцион симметрия амали мавжуд. Ҳар бир трансляцион симметрия амалига битта элементар катакни мос қўйиш мумкин. Натижада 14 хил элементар катак ҳосил бўлади (8-расм), бу элементар катаклар *Браве панжаралари* деб аталади. Трансляцион симметрия — бу кристални маълум бир вектор бўйича кўчирганимизда ўзи билан устма-уст тушишидир. Ҳар бир кристаллар сингониясида фақат маълум бир турдаги Браве панжараси бўлиши мумкин.

Кристалл панжарасининг тўлиқ симметриясини фазовий симметрия гуруҳи аниқлайди. Фазовий симметрия гуруҳида кристални нуқтавий, ва трансляцион симметрия амаллари мужассамлашган бўлади. Ҳаммаси бўлиб 230 та фазовий гуруҳлар мавжуд бўлиб, ҳар қандай кристалл ўз тузилишига кўра ана шу гуруҳларнинг бирига мансуб бўлади. Кристалнинг фазовий симметрия гуруҳи маълум бўлса, унинг кристалл тузилишини келтириб чиқариш жуда осон, шунинг учун кристалнинг симметрия гуруҳини билиш муҳим аҳамиятга эга. Ҳозирги пайтда кристалл симметрияси рентген нурлари ёрдамида аниқланади. Фаннинг ушбу йўналиши *кристаллография* деб номланади. 8- расмдан кўриниб турибдики:

1. *Триклин сингония* панжаралари фақат содда Р - шаклдаги панжаралардир. Браве панжарасини ифодаловчи параметрлар сони 6 та: уч қирра ва учта бурчак.

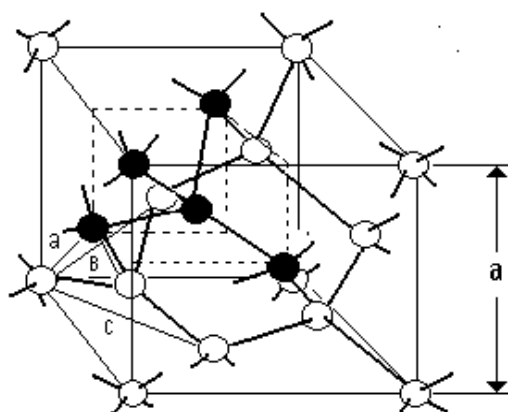
2. *Моноклин сингонияда* иккита Браве панжараси шакллари бўлиши мумкин. Улардан бири P — шаклдаги содда катакка эга бўлиб, иккинчиси эса, марказлашган асосли яъни C — шаклдаги катакка эга. Ушбу панжараларни 6 та параметр аниқлайди $(a_1, a_2, a_3, \alpha, \beta, \gamma)$.
3. *Ромбик сингонияда* тўрт хил Браве панжаралари мавжуд бўлиши мумкин; P — содда, C — марказлашган асосли, ҳажмий марказлашган — I ва ёқий марказлашган — F турдаги панжаралар. Ушбу шаклдаги панжаралар тўртта параметр билан аниқланади. (a_1, a_2, a_3, α)
4. *Тетрагонал сингония* икки хил, яъни P ва I шаклдаги панжараларга эга бўлиб учта параметр билан аниқланади. (a_1, a_2, a)
5. *Тригонал сингония* иккита параметр билан аниқланади (a, α) бу сингонияда фақат P - шаклдаги Браве панжараси мавжуд.
6. *Гексагонал сингонияда* битта Браве панжараси бўлиб, тўрт параметр билан аниқланади. Ушбу катак C — шаклга мансуб бўлиб кўп ҳолларда уни учта P — шаклдаги содда катак кўринишида ҳам ифодаланади.
7. *Кубик сингонияда* уч хил катак бўлиши мумкин: P , I ва F шаклдаги катаклар. Кубик сингонияни икки параметр билан аниқлаш мумкин (a, α) .



8- расм. Кристал сингониялари

Кремний монокристалининг тузилиши.

Агар бирор модданинг атомлари унинг ҳажми бўйлаб ўзаро маълум даврийлик билан маълум ўзгармас масофаларда жойлашган бўлса, у ҳолда бундай модда кристалл тузилишга эга дейилади. Атомлар ана шундай тартиб билан жойлашиб кристалл панжарани ҳосил қилади. Мисол сифатида кремний ва германийни олсак, уларнинг кристалл панжараси бир хил бўлиб, олмос кристалл (9-расм) панжарасининг ўзгинасидир.



9-расм. Олмос кристалл панжараси

Ушбу кристалл панжарада ҳар бир атом тўғри тетраэдр учларида ўрнашган тўрттадан атом билан ўралган ҳолатда туради. Атомларнинг кристалл панжарада ана шундай тарзда мустаҳкам жойлашган нуқталари кристалл панжаранинг тугунлари дейилади. Бу атомларнинг ҳар бирини алоҳида қарасак, улар электрик жиҳатдан бетараф бўлади. Лекин шунга қарамасдан атомлар ўзаро етарлича боғланиш кучи билан тортишиб, ўз жойларида мустаҳкам туради. Ҳўш, бу қандай куч экан

Бу куч кристалл панжарани ташкил қилувчи атомларнинг валент электронлари воситасида юзага келувчи кимёвий боғланиш кучидир. У одатда ковалент куч деб юритилади. Маълумки, биз таҳлил қилаётган

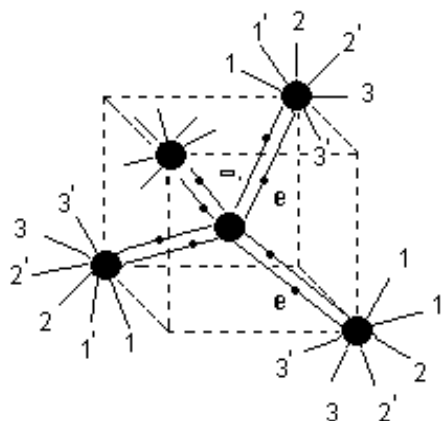
21

кремний, германий ва углерод атомлари тўрт валентли бўлиб, тўрттадан валент электронларга эга.

Демак, бундай атомлар бир вақтда тўртта атом билан ковалент боғланиш ҳосил қилиши мумкин. Ковалент боғланишни юзага келтирадиган асосий сабаб бу ўзаро алмашилиш таъсиридир. Албатта, бу турдаги ўзаро таъсир квантмеханик табиатга эга. Икки атом орасида ушбу алмашилиш ўзаро таъсири юзага келиши учун уларнинг валент электронлари қобиклари қисман бўлса ҳам устма-уст тушмоғи керак. Бошқача айтганда бу электронлар иккала атомга тегишли, яъни умумлашган бўлиб қолиши керак.

Бунга энг муҳим омил олмос туридаги кристалл панжарада атомларнинг етарлича бир-бирига яқин ётганлигидир (бу масофа тахминан 2×10^{-10} м га тенг). Ундан ташқари ковалент боғланишнинг ўзига хос хусусияти шундаки, у маълум йўналиш бўйлаб, хусусан умумлашган электронларнинг энг кўп қисми мужассамлашган йўналиш бўйлаб юзага келади. Шундай қилиб, олмос панжарасига мансуб бўлган кристалларда (олмос, кремний, германий) ҳар бир атом ўзининг энг яқин атрофидаги тўртта атом билан ана шундай ковалент боғланган бўлади.

Демак, кристаллнинг барча уячалардаги бу бешта атомни саккизта "умумлашган" электронлар ковалент боғланиш ҳосил қилиб кристалл панжаранинг тугунларида мустаҳкам ушлаб турар экан. Буни шартли равишда кремний учун (10-расм) қуйидагича акс эттириш мумкин. Шунини таъкидлаш лозимки, кристалл панжарада ковалент боғланишни ҳосил қилишда фақат валент электронлар қатнашади, холос. Яъни, атомнинг қолган барча ички электронлари ўз ядролари таъсирида қолиб, бундай боғланишда иштирок этмайди.



10- расм. Кремнийда ковалент боғланиш

1.2. Кристаллардаги нуқсонлар

Ҳақиқий кристалларда ҳамма вақт кристалл панжарасининг анча миқдордаги бузилиши (нуқсонлари) мавжуд бўлади. Даставвал макро ва микронуқсонларни фарқлаш лозим. Макронуқсонлар микроскопда осон кўринади. Бундай макронуқсонларнинг мисоллари — металл қуймалардаги коваклар, дарзлар, ёт моддалар киришмалари уюмлари, поликристаллнинг доначалари — айрим кристаллчаларнинг кўринма чегараларидир. Электронлар микроскопиясининг пайдо бўлиши санаб ўтилган нуқсонларни анча кичик ўлчамли бўлганда ҳам кузатиш имконини берди.

Микронуқсонларга ёки атомлар ўлчамида қараладиган нуқсонларга уч ўлчамдан (x,y,z) ҳеч бўлмаганда бири кристалл панжарасининг $a = 0,2 : 0,5$ нм даври билан таққосланувчи бўлган нуқсонлар мансуб бўлади. Айрим кўринишдаги нуқсонларни қарашдан

олдин хақиқий кристаллни нуқсонсиз (идеал) кристаллдан фарқловчи умумий белгиларни топайлик.

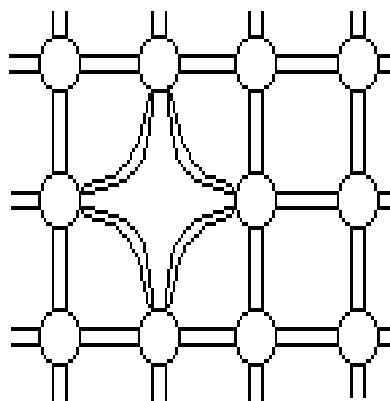
Идеал кристаллда атомлар қатъий даврий жойлашганлиги оқибатида кристалл ичида даврий электрик майдон шаклланган бўлади. Кристаллнинг даврий ички электр майдонининг ҳар қандай бузилиши нуқсон бўлади. Нуқсонлар мисоли тариқасида ёт атом — киришманинг кристалл атоми ўрнига жойлашиб олиши ва кристалл атомининг жойидан кетиши — вакансия (бўш жой) ҳосил бўлишини келтириш мумкин.

Агар кристаллдаги нуқсонлар оз бўлса, бу ҳолда улар бири-биридан анча йироқда жойлашган, яъни кристалл панжараси нуқсонлари маҳаллийлашган бўлади. Бунда кристалл ичидаги электр майдон фақат нуқсон атрофидагина бузилади, бошқача айтганда, кристаллнинг даврий V_0 потенциалига нуқсон яқинида V' қўшимча потенциал қўшилади, тўла потенциал $V = V_0 + V'$ бўлади. Шунинг учун ҳам фақат шу соҳада бўлган электронларнинг энергетик ҳолатлари ўзгаради, бу эса идеал қаттиқ жисм электронлари энергия зоналарига қўшимча маҳаллий энергетик ҳолатларнинг пайдо бўлишига олиб келади. Бундай маҳаллий ҳолатлар сони N нуқсонлар сонига тенг, ёки агар бир нуқсон бир неча ҳолатда бўла олса, маҳаллий ҳолатлар сони нуқсонлар сонидан катта бўлади.

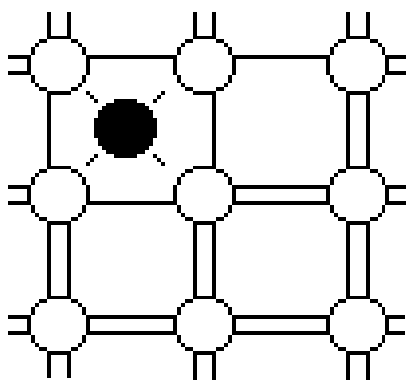
Маҳаллий энергетик сатҳлар (ҳолатлар)да электронлар боғланган, бу боғланиш турли қаттиқ жисмларда мохиятан турличадир. Металларда нуқсонлар пайдо қилган сатҳлар руҳсат қилинган энергиялар зонаси ичида жойлашади. Металларда электронлардан бўш нуқсонларнинг ионланган ҳолатда бўлишлиги энг эҳтимоллигидир.

Яримўтказгичлар ва диэлектриклар электронлари тақиқланган энергиялари зонаси бўлган энергетик спектрга эгадир. Албатта, бундай кристалларда маҳаллий энергетик ҳолатлар рухсатланган зоналарга тушиши мумкин. Агар улар ўтказувчанлик зонасида жойлашса, уларни резонанс сатҳлар, агар улар валент зонасида жойлашса, уларни анти резонанс сатҳлар дейилади. Бу ҳолларда нуқсонларга тегишли электронлар улар билан боғланишини йўқотади ва умумлашган зона электронлари жамоасига қўшилади. Лекин, аксарий кўп ҳолларда нуқсонлар сатҳларида жойлашган электронлар нуқсонларга боғлиқлигича қолиши мумкин, уларни фақат иссиқлик ҳаракати ёки бошқа энергия манбаи ҳисобига ўз нуқсонларидан ажратиб юбориш — активлантириш мумкин. Нуқсонларга боғлиқ электронлар электр ўтказувчанликда қатнаша олмайди, албатта. Бундай нуқсонларнинг электронлар учун сатҳлари яримўтказгичнинг (диэлектрикнинг) тақиқланган зонасида жойлашган бўлади.

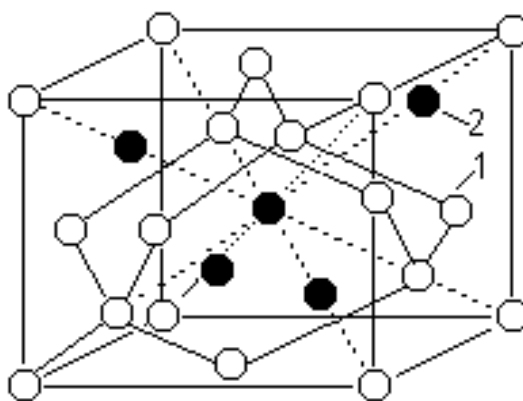
Ҳақиқий кристалларда қатор сабаблар туфайли турли хил нуқсонлар мавжуддир. Нуқсонлар деганда атомларнинг кристал панжарадаги нормал жойларидан силжиши ёки кристал панжарага бегона атомларнинг кириб қолиш ҳоллари тушунилади. Бундай нуқсонлар кристаллга махсус ташқи таъсир кўрсатиш жараёнида ёки бошқариб бўлмайдиган тасодифий омиллар туфайли юзага келади. Айниқса, яримўтказгич кристаллар кўпчилик нуқсонларга ўтасезгир бўлади. Яримўтказгичларда содир бўладиган қатор ҳодисалар (электрик ўтказувчанлик, диффузия, кристалларнинг ўсиши, оптик ва бошқа хоссаларнинг намоён бўлиши ва ҳоказолар) кристалл панжарадаги нуқсонларнинг таъсири билан тушунтирилиши мумкин.



11, а-расм. Кристалл панжарада вакансия ёки Шоттки нуқсони



11, б-расм. Кристалл панжарада тугунлараро атом

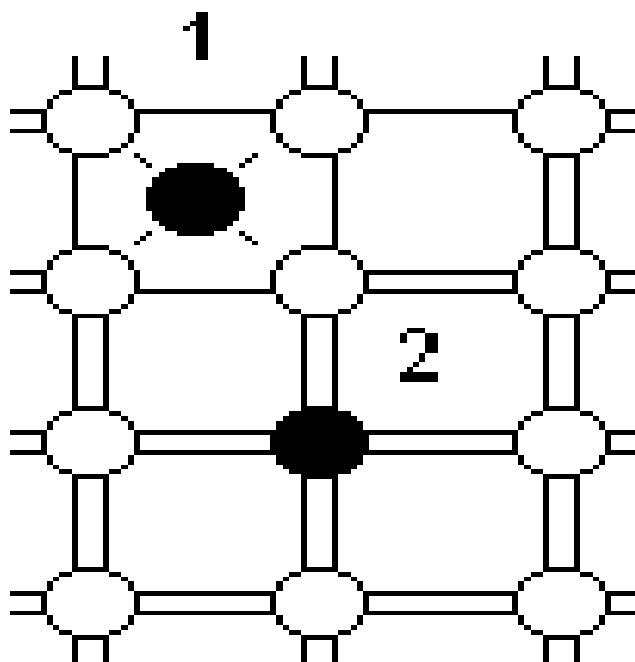


11, в-расм. Кристалл панжарада атомларнинг жойлашиши:

1-тугунлар; 2-тугунлараро киришма атомлар

Кристалларда учрайдиган нуқсонларни тўртта гуруҳга ажратиш мумкин. Булар нуқтавий, чизиғий, сиртий ва ҳажмий нуқсонлардир. Нуқтавий

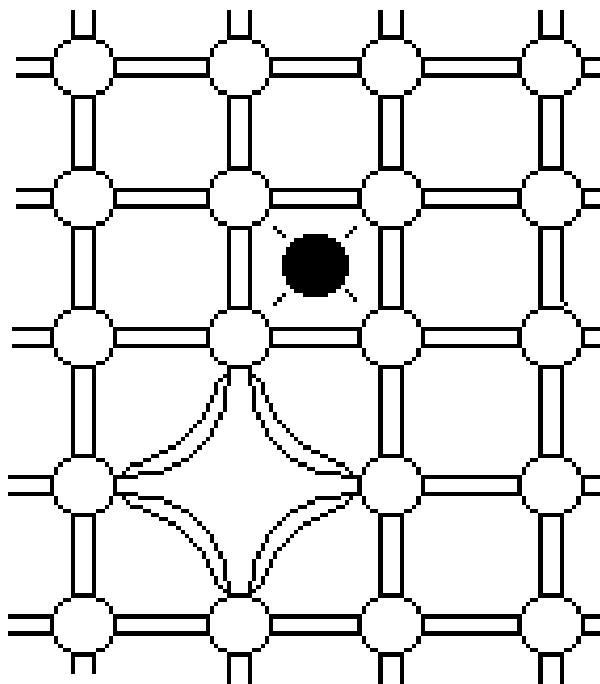
нуқсонлар кристалл панжаранинг баъзи нуқталарида панжаранинг ўз атомлари йўқлиги ёки бирорта ортиқча атом мавжудлиги натижасида юзага келади. 11(а, б, в, г, д)-расмда энг кўп учрайдиган нуқтавий нуқсонлар тасвирланган. Агар кристалл панжаранинг бирор тугунида хусусий атом етишмаса (11, а-расм) у ҳолда бундай нуқсон вакансия ёки Шоттки нуқсони деб аталади. Кристалларда баъзибир ҳолларда вакансиялар жуфти мавжуд бўлади. Бундай нуқсонлар дивакансиялар деб аталади. Агар тугунлар орасида ортиқча атом жойлашган бўлса, бундай нуқсон киришмавий нуқсон (11, б-расм) деб аталади. Кристалл панжаранинг тугунларида ёки тугунлари орасида жойлашган киришма атомлар ҳам нуқтавий нуқсон дейилади (11, г-расм).



11, г-расм. Кристалл панжаранинг нуқтавий нуқсони:

1-тугунлараро киришма атом; 2-тугундаги киришма атом

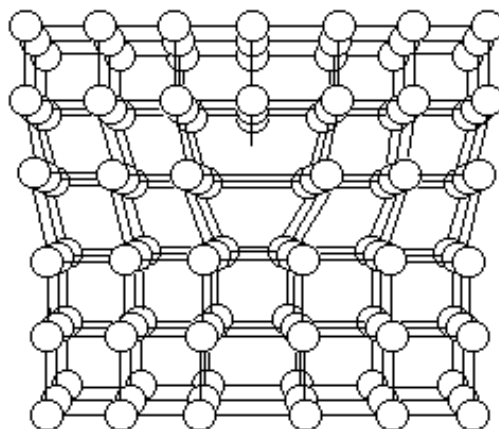
Вакансия ва тугундан чиқиб қолган хусусий атом жуфти ҳам нуқтавий нуқсон ҳисобланади ва Френкель жуфти номи билан юритилади (11, д-расм).



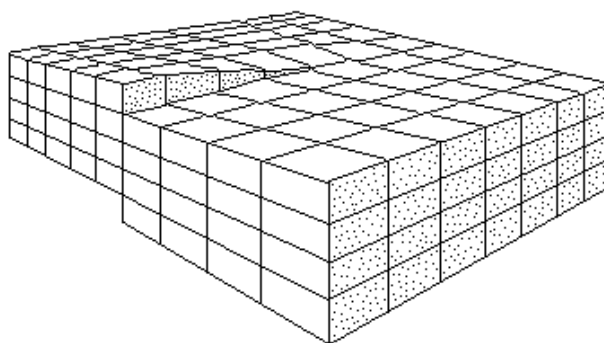
11, д-расм. Френкель нуқсони: вакансия ва тугундан чиққан хусусий атом жуфти

Чизиғий нуқсонларга чегаравий ва винтсимон дислокациялар таалуқлидир. Чегаравий дислокация 12, а-расмда тасвирланган. Бу хил дислокациялар атомларнинг шундай тартибсизлигидан иборатки, бунда чексиз кўп атомлар текисликлари ичида битта дислокация чизиғи билан тугайдиган атомлар яримтекислиги кузатилади.

Агар кристаллни ҳаёлан яримтекислик билан кесиб, кристаллнинг ажралган қисмларини яримтекислик чегараси йўналиши бўйлаб бир бирлик атомлар орасидаги масофагача силжитсак, винтсимон дислокация (12, б-расм) тасвирини тасаввур қилишимиз мумкин.

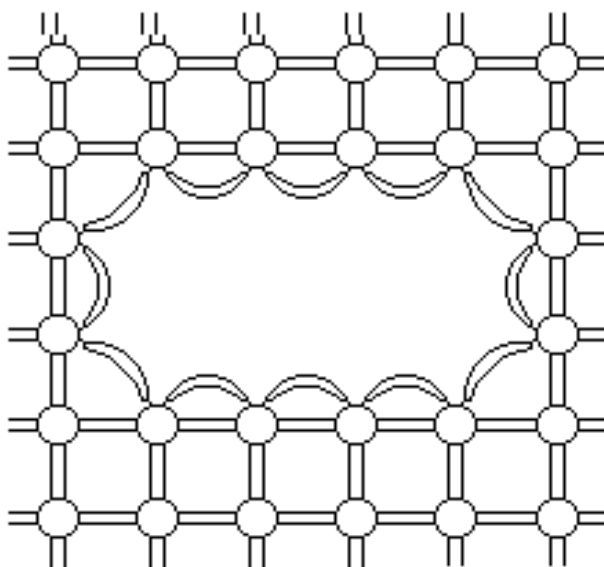


12, а-расм. Кристалл панжарадаги чегаравий дислокация



12, б-расм. Кристалл панжарадаги винтсимон дислокация

Сиртий нуқсонлар икки тур: ташқи ва ички бўлади. Кристалл сиртининг бошқа муҳит билан чегарадош бўлганлиги ташқи нуқсонларнинг юзага келишига асосий сабабчидир. Муҳит билан ўзаро таъсирлашиш натижасида кристалл сиртида адсорбцияланган бегона атомлар қатлами, оксидланган қатлам ва бошқа сиртий нуқсонлар юзага келади. Ички нуқсонлар кристалл панжара бир хил ориентациядан иккинчи хил ориентацияга ўтган жойларда юзага келади. Бундай нуқсонларга қўшмоқланиш текисликлари, поликристалл жисмлар доначаларининг чегаралари, кичик бурчакли дислокация чегаралари киради.



13-расм. Кристалл панжаранинг ҳажмий нуқсонлари

Ҳажмий нуқсонларга стехиометриядан четланиш, вакансиялар мажмуаси (13-расм) ёки бошқа элементар нуқсонлар тўплами ва дарз кетган жойлар, бўшлиқлар, бошқа фазаларнинг аралашмаси каби тартибсизликлар ва ҳоказо нуқсонлар киради.

Биз юқорида зикр қилиб ўтган нуқсонлар ҳақида батафсил тўхталиб ўтирмаймиз. Бу мавзу билан қизиққан ўқувчига махсус адабиётга мурожаат қилишни тавсия этамиз. Келгусида айниқса киришма атомлар билан боғлиқ нуқсонларни кўп учратамиз. Чунки, зарур параметрларга эга бўлган яримўтказгичлар олишнинг кенг тарқалган йўли - унга маълум миқдорда зарур киришма киритишдир.

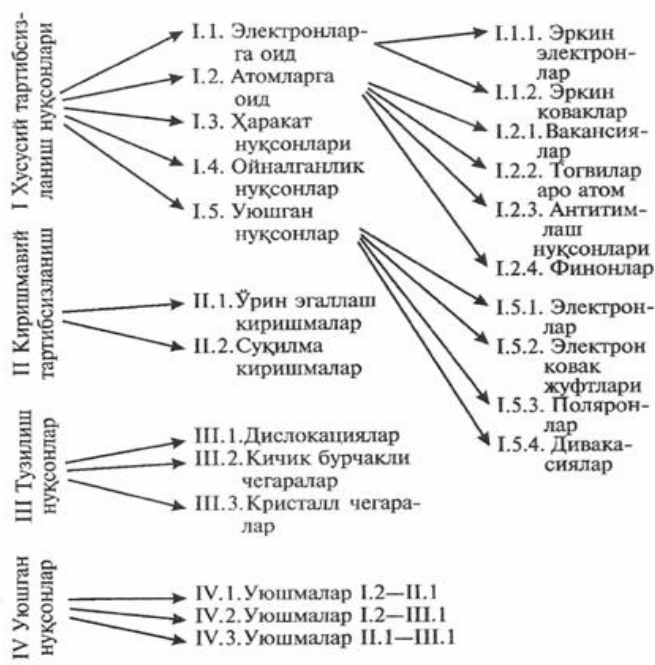
Биз шу мавзуга қисқача бўлса ҳам тўхталиб ўтганимизнинг асосий сабаби шундаки, яримўтказгич хоссаларига ва у асосида ясалган турли хил яримўтказгич асбоблар электрфизик параметрларига ҳар қандай нуқсон ҳам жуда кескин таъсир кўрсатади. Шунинг учун техникада соф, тузилиш нуқтаи назардан бенуқсон яримўтказгич материаллар олиш муаммоси доим алоҳида ўрин эгаллайди.

Нуқтавий нуқсонлар.

Нуқтавий нуқсонларнинг қаттиқ жисмда ҳамма вақт мавжуд бўладиганлари атомлардан бўшаб қолган тугунлар — вакансиялар ва тугунлар оралиғига жойлашиб олган атомлардир.

Вакансияларнинг мувозанат шароитида ҳосил бўлиши кристалл атомларининг иссиқлик тебранишлари билан боғлиқ. Мўътадил температураларда атомлар тебранишларининг ўртача амплитудаси атомлараро масофа (панжара доимийси)нинг бир неча фоизига етиши мумкин. Тугунлар атрофида тебранувчи атомларнинг энергияси жуда кичикдан то анча катта қийматларга эга бўла олади.

Юқори энергияли атомлар ўз мувозанатий вазиятларидан узоқлашиб кетиши (тугунни ташлаб кетиши), тугунлар оралиғига ўтиши мумкин. Тугунлар оралиғига ўтган атом яна бўш тугунга қайтиши —

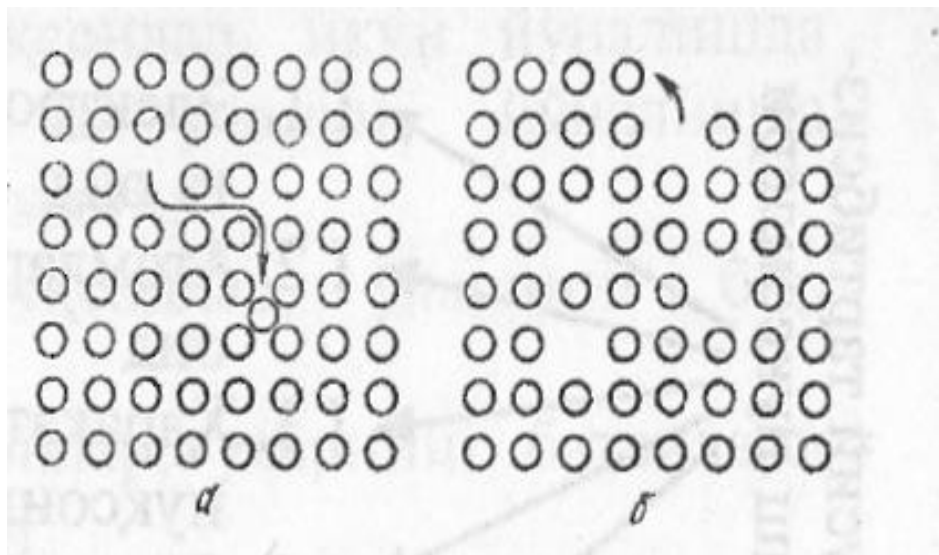


14 — расм. Кристаллнинг тартибсизланиши бўйича нуқсонларнинг синфлари.

рекомбинацияланиши мумкин. Лекин, мазкур атом вакансияга энг яқин тугунлар оралиғидан узоқроқдагиларига томон диффузияланиши ҳам мумкин. Шу равишда Френкел нуқсонлари деб аталган вакансия — тугунлараро атом жуфтлари вужудга келади. Улар кристалл ҳажмида кўчиб юради, бу дайдиш жараёни бу икки нуқтавий нуқсон қўшни вазиятларда учрашиб, рекомбинация юз бергунча, ёки улардан бири сиртга чиқиб олмагунча давом этади(15-расм).

Агар вакансия, кристалл бўйлаб диффузияланиб, сиртга чиқса, бу ҳолда унга ичкарироқдаги қатламдаги атом ўтиб олиши мумкин. Пайдо бўлган вакансияга кейинги қатламдаги атом ўтади ва ҳ.к, натижада тугунлараро атомларсиз вакансиялар пайдо бўлади. Бу хил вакансияларни Шотки нуқсонлари дейилади.

Тугунлараро атом кристалл ҳажмидан сиртга чиққан атомлар кўшимча қатлам ҳосил қилади, кристалл ҳажми бир мунча ортади.



15-расм. Френкел(а), Шотки(б) нуқсонлари.

Радиацион нуқсонлар

Юқори энергияли нурланишлар таъсирида қаттиқ жисмларда ҳосил бўладиган нуқсонларни радиацион нуқсонлар дейилади. Бундай нурланишлар — қаттиқ рентген нурланиши, γ — нурланиш, юқори энергияли электронлар, нейтронлар оқимидир.

Радиацион нуқсонлар назариясида бирламчи нуқсон Френкел жуфти бўлади деб ҳисобланади, кейинчалик бошқа иккиламчи нуқсонлар юзага келади. Агар атомни тугундан уриб чиқариш учун керак энергия E_d — бўлса, атомга нурланиш томонидан бериладиган E_a энергия E_d дан катта бўлса, атом, албатта тугундан чиқиб кетади, агарда бу атомда E_d дан ортиқ энергия қолса, у бошқа атомни уриб чиқаради ва ҳ.к.

Бироқ, радиацион нуқсон ҳосил қилишнинг бўсағавийдан пастрок энергияга тегишли механизмлари бор. Бу механизмларнинг моҳияти шундаки, аввал кристаллнинг электронлари системачаси уйғотилади, энергия кристалл атомларига узатилади ва бирламчи радиацион нуқсонлар ҳосил бўлади. Бу уйғотиш кристаллнинг рентген квантлари, паст энергияли электронлар ва ҳатто ультрабинафша фотонлар билан нурлаш йўли билан амалга оширилади.

Бўсаға ости нуқсонлар ҳосил бўлиши қуйидаги босқичлардан иборат:

1. Квантнинг ютилиши ва экситон ҳосил бўлиши;
2. Экситоннинг икки ионда (масалан, ишқорий — галоген кристаллда галогеннинг икки ионда) жойланиши, яъни квазимолекула ҳосил бўлиши;
3. Кулон итаришиш оқибатида квазимолекуланинг тугунлараро атом ва вакансияга парчаланиши.

4. Радиацион нуқсонлар ҳосил бўлишининг бошқа йўллари ҳам мавжуд (плазмонлар механизми, ионизацион механизм ва бошқалар.).

Радиацион нуқсонлар, одатда, катта кинетик энергияга эга ва шунинг учун улар кристалларда жуда ҳаракатчан бўлади. Радиацион нуқсонларнинг ўзаро ва бошқа радиацион бўлмаган нуқсонлар билан учрашуви эҳтимоллиги катта. Бу ҳолларда юз берадиган таъсирлашиш оқибатида нуқсонларнинг бирлашмалари ва ҳатто йирик уюмлари ҳосил бўлади.

Кристалл атомларининг ўз тугунларидан γ — квантлар таъсирида жилиб кетиш эҳтимоли кичик. Лекин γ — нурланиш фотоэффект, Комптон эффекти, электронлар ва позитронлар жуфтлари туғилиши оқибатида вужудга келади.

Нейтронлар оқими моддага тушганда унинг бир қисми ютилиб, нуқсонлар пайдо қилади.

Кристалл атомларнинг ўз тугунларидан γ — квантлар таъсирида жилиб кетиши эҳтимоли кичик. Лекин, γ — нурланиш фотоэффект, комптон эффект, электронлар ва позитронлар жуфтлари туғилиши оқибатида вужудга келади.

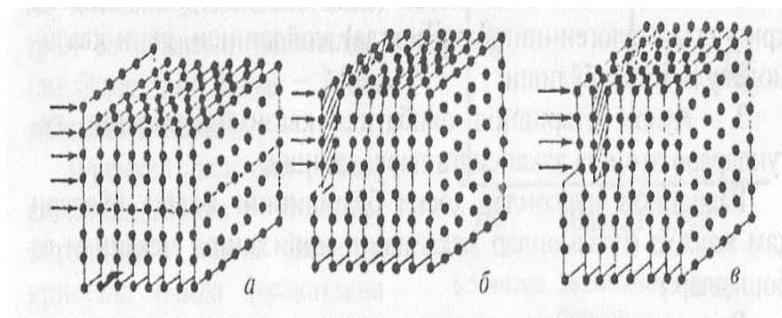
Кейинги даврда моддашунослик соҳасида бир вақтда қаттиқ жисмда мавжуд бўлган (киритилган) турли киришмалар бир-бири билан таъсирлашиши оқибатида модданинг айрим физик хоссалари жиддий ўзгариши мумкинлиги ва бу ўзгаришлардан амалда самарали фойдаланиш мумкинлиги аниқдаимокда.

Қаттиқ жисмларда чизигий нуқсонлар

Нуқсонларни ўлчамлар жиҳатидан синфларга ажратганда бир ўлчовли (чизигий) нуқсонлар айтиб ўтилган эди, бу нуқсонларнинг ўлчамлари икки

йўналишда жуда кичик ($<a$) ва учинчи йўналишда ҳар қанча узун бўлиши мумкин. Бундай нуқсонларни **дислокациялар дейилади.**

Дислокациялар ҳосил бўлишини қарайлик. Кристаллнинг бир қисмига ташқи куч таъсир қилаётган бўлсин (16, а- чизма).



16-чизма. Дислокация ҳосил бўлишининг кетма-кет босқичлари:
а) кристаллга силжитиш кучи қуйилиши; б) атомлар текисликлари букилиши; в) экстратекислик ҳосил бўлиши.

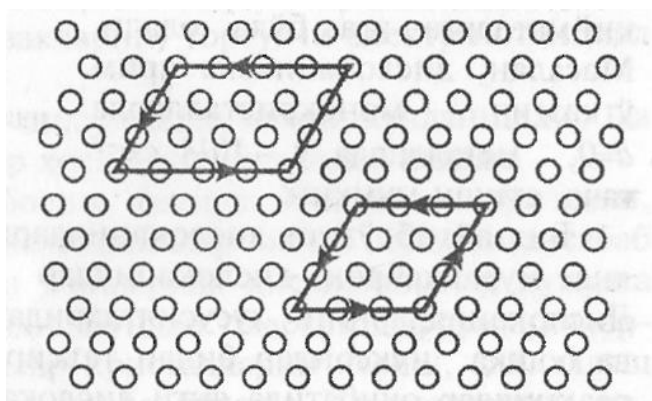
Кучнинг қандай бўлишига қараб кристалл эластик ёки пластик деформацияланади. Иккинчи ҳолда таъсир этувчи кучнинг бирор бўсағавий қийматига - силжиш кучланишига эришилганда сирпаниш вужудга келади. 16, а- чизмада узун чизик билан қандайдир фаразий текислик (сирпаниш текислиги) тасвирланган, атомлар текисликлари унинг юқорисида ўнгга силжийди, унинг пастидаги кристалл қисми эса қўзғалмайди.

Кристаллографик (атомлар) текислигининг деформацияланувчи қисми (ярим текислик) ўнгга бирор масофага силжийди. (16, б- чизма) ва кейинги атомлар ярим текислигини деформациялайди.

Биринчи яримтекислик куч таъсири ортганда оқибатда кейинги юқориги ярим текислик устига тушади, пастки яримтекислигидан узиб қўяди (16, в- чизма). Узилган яримтекислик «ортикча», озгина деформацияланган иккита оддий (атомлар) текисликлари орасига «киритилган» (қистирилган) бўлиб қолади.

Янада каттароқ ташқи силжитиш кучланиши мавжуд бўлса, «ортиқча» экстратекислик ўз навбатида келгусини жилдириб, унинг ўрнини эгаллайди, бу жараён токи намунанинг юқориги қисми пастки қисмига нисбатан ϵ Бюргере вектори қадар силжимагунча давом этади (17- чизма).

Шундай қилиб, **дислокация** ёки **дислокация чизиғи** деб кристаллнинг силжиган соҳасини силжимаган соҳасидан ажратиб турувчи чизикни айтилади. Бюргере вектори ϵ кристалл панжарасида атомларнинг силжиш катталигини ва йўналишини аниқлайди.



17- чизма. Дислокация контури ва Бюргерс вектори

Бюргерс вектори қиймати дислокация ўлчови бўлади.

Ушбу эслатмаларни билиш зарур:

1. Дислокация чизигидан йироқда кристалл идеал кристаллдан фарқ қилмайди.
2. Бу чизик яқинида атомлар идеал кристалл тугунларига нисбатан анча силжиган бўлади.
3. Нолга тенг бўлмаган Бюргерс вектори мавжуд.

4. Бюргерс вектори дислокация чизигига тик бўлади, бундай дислокацияни чегаравий дислокация дейилади.

Чегаравий дислокациядан ташқи винтсимон дислокациялар ҳам мавжуд. Дислокация чизиги Бюргерс векторига параллел.

Ҳақиқий қаттиқ жисмларда дислокациялар зичлиги катталиги d киритилади ва y 1 см^2 сиртдаги дислокациялар сонини билдиради. Дислокациялар зичлигини аниқлашнинг энг кўп тарқалган усули кристалл сиртини кимёвий едиришдир. Кристалл сиртига чиқувчи дислокациялар соҳасида едириш чуқурчалари пайдо бўлади. Уларни микроскоп ёрдамида санаш мумкин. Дислокациялар зичлиги d нолдан то катта сонга қадар қийматларга эга бўла олади. Масалан, дислокациясиз ярим ўтказгич монокристалларда ичидаги чегаранинг ҳосил бўлиши. $d=0$, металлларда y 10^{12} см^{-2} гача етиши мумкин.

Биз айтиб ўтган дислокацияларнинг икки туридан бошқа яна мураккаброқ дислокациялар мавжуд бўлиши мумкин. Дислокацияларнинг хусусиятларидан бири — уларнинг ўзаро ва бошқа нуқсонлар билан таъсирлашишидир. Дислокацион реакциялар оқибатида янги дислокациялар ҳосил бўлиши ёки дислокациялар бирлашиши мумкин: ли дислокация иккита ва Бюргерс векторли дислокацияга ажралиши ва аксинча реакциялар бўлиши мумкин:

$$\vec{a}_1 \leftarrow \vec{a}_2 + \vec{a}_3 \quad (2.1)$$

Дислокацион реакцияларнинг маҳсули нуқсонларнинг бошқа турлари бўлиши эҳтимоллиги мавжуд. Масалан, икки дислокация учрашиб вакансия ҳосил қила олади. Қаттиқ жисмдаги киришмалар билан дислокацияларнинг ўзаро таъсири эластик ва электр йўсинда юз бериши мумкин.

Кристаллда чўзувчи кучланиш ҳосил қиладиган киришма атом дислокация атрофидаги қисилган соҳа томон кўчади, қисувчи кучланиш ҳосил қиладиган атом эса, — чўзилган соҳа томон кўчади. Бундай ўзаро таъсир чегаравий дислокацияларга хосдир. Дислокацияларнинг электр ўзаро таъсирлашишида унинг энергиясини кулон потенциали аниқлайди ва шунинг учун $1/\tau$ га пропорционал.

Металл кристалларда кўп миқдордаги эркин электронлар, дислокациялар ёки нуқтавий нуқсон майдонини экранлайди, шунинг учун металлларда бу ўзаро таъсир муҳим эмас. Ярим ўтказгичлар ва ионлар кристалларида экстра текислик пастидаги атомларнинг узилган кимёвий боғланишлари электр потенциал ҳосил қилади, улар акцепторлик (электронни қабул қилиш) хоссасига эга. Шунинг учун n — тур ярим ўтказгичларда бу боғланишлар ўтказувчанлик электронларини тутиб олади ва дислокацияларга манфий заряд беради, у эса мусбат ионларни (ёки ковакларни) тортувчи электр потенциал ҳосил қилади.

Ҳар қандай механик ишлов ҳам макро кучланишдир ва бинобарин, дислокациялар ҳосил қилишга олиб келади.

Қаттиқ металлларда босим остида ишлов — чўзгилаш, болғалаш, сурғалаш — дислокациялар пайдо бўлишига сабаб бўлади. Юқори кучланиш жойларида дислокациялар вужудга келади, кейин улар кўпаяди. Бундай пластик деформациялардан ташқари, дислокациялар кристалларни кесиш, сайқаллаш жараёнлари оқибатида ҳам пайдо бўлади. Кристалланиш жараёнида температура градиентлари мавжуд бўлиши дислокациялар манбаи бўлиши мумкин. Кристалларни ўстириш жараёнида пайдо бўлган дислокациялар юқорида тавсифланганларидан фарқ қилади. Бирламчи ҳамиртуруш кристалл дислокациялари ўстирилган кристаллга мерос бўлиб ўтади (меросий дислокациялар). Кристалл бошқа моддадан ясалган таглик

билан контактлашганда номослик дислокациялари намоён бўлади. Бундай дислокациялар $A^{III}B^V$ — Ge, $A^{II}B^6$ - $A^{III}B^1$ ва ҳоказо каби яримўтказгич гетеротузилмаларни эпитаксия усулида ўстиришда катта ўрин тутати.

Дислокациялар асосан қаттиқ жисмларнинг механик хоссаларига, биринчи навбатда уларнинг мустаҳкамлик характеристикаларига таъсир кўрсатади. Ҳақиқий кристалларда дислокациялар маҳкамланиши эффекти мавжуд. Бунинг бир неча механизмлари бор: ёт зарралар (киришмалар) билан маҳкамланиш; дислокацияларнинг «**чирмашиши**». Биринчи механизм фақат баъзи ҳолларда муҳим. Бу ҳолларнинг бири Коттрел атмосфераларининг ҳосил бўлишидир. Ёт зарралар - асосий кристалланидан бошқа моддаларнинг микроскопик киришмалари эриган модда томонидан ушланади ва суюлмани совутиб қотирганда унда қолади. Бу зарралар асосий модда билан биргаликда қотишма ҳосил қилади.

Дислокацияларнинг чирмашиши равишида ҳам дислокациялар бири-бирини тормозлайди. Энг муҳим масала дислокацияларнинг заряд ташувчилар (электронлар ва ковалар) энергиялари спектрига киритадиган ўзгаришларидир. Олдин айтганимиздек, дислокация электронларни қабул қилувчи акцептор вазифасини ўтайди. Бундай қарашда дислокациялар таъсири ковалент кристаллга киритилган киришма атомлар таъсирига ўхшайди. Бундай акцептор сатҳлар бир — бирига яқин бўлиб, ўзаро таъсирлашиб, дислокацион энергетик зонани вужудга келтиради. Дислокацияли яримўтказгичда электронлар зичлигини ҳисоблашда электр нейтраллик шартида дислокациялар зарядини ҳам ҳисобга олиш керак бўлади. Яримўтказгичларда дислокациялар ҳаракатчан заряд ташувчиларни сочиб юбориш орқали уларнинг ҳаракатчанлигига таъсир қилади. Дислокациялар заряд ташувчиларнинг яшаш вақтига муҳим таъсир кўрсатади. Дислокациялар атрофидаги ҳажмий заряд номувозанатий электронларнинг ушланишига ҳалақит беради. Дислокация электронларнинг

яхши ёпишиш марказлари бўлади. Барча қаттиқ жисмларда дислокациялар диффузия жараёнига таъсир кўрсатади.

1.3. Кремнийда кислород, углерод ва уларнинг бирикмалари

Маълумки кремний монокристаллари таркибида, улар қандай усул билан олинганлигидан қатъий назар, катта миқдорда кислород ва углерод мавжуд. Кислород ва углерод атомлари оддий шароитда нейтрал ҳолатда бўлишига қарамай, турли ташқи таъсирлар, эксплуатация шароити ва термик ишловлар оқибатида кислород ва углерод атомлари иштирокида нуқсонларнинг турли бирикмалари ҳосил бўлади. Оқибатда кремний тақиқланган зонасида турли кераксиз энергетик сатҳлар ҳосил бўлади бу эса ўз навбатида яримўтказгич қурилмаларнинг параметрларига салбий таъсир кўрсатиши мумкин. Шу сабабали ҳам монокристал кремнийдаги кислород ва углерод ҳолатларини ўрганиш жуда муҳимдир.

Si даги кислород атомлари ҳолатларини ўрганиш натижасида маълум бўлдики, кремний кристал панжарасида кислород атомлари асосан тугунлараро жойлашади. Кремний элементар катагчасининг, унда эриган кислород туфайли, 10 % гача катталашиши [83] кислород атомларининг тугунлараро табиатидан дарак беради. Si нинг $\nu = 1100 \text{ см}^{-1}$ спектрдаги ютилиш, иккита кремний атоми билан боғланган, битта кислород атомига тегишли экани аниқланган. Кислороднинг кремнийдаги фазафий ҳолатлари тахлили [80] натижасида қуйидаги хулосаларга келинган:

- 1) кремнийдаги барча кислород SiO_2 майда бирикмалари шаклидаги боғланган ҳолатда бўлади;
- 2) Si даги кислород билин боғлиқ бўлган, электр ўтказувчанлик ва ИҚ спектрдаги ютилишларнинг ўзгаришлари, иккинчи фаза

ҳосилаларидаги, термик ишлов туфайли юзага келувчи фазавий ўтишлар орқали тушунтирилиши мумкин;

- 3) фазавий қайта тузилишлар оқибатида, термодонорлар манбайи бўлган, зарядланган мустақил SiO_4 комплекслари ҳосил бўлиши мумкин.

Кремний кристал панжараси доимийсининг ундаги кислородга боғлиқлигини рентген-дифракция усули билан тадқиқ этиш натижасида, шу нарса маълум бўлдики, кварц тигельдан тортиш усули билан олинган (кислород концентрацияси максимал) Si монокристалларининг кристал панжара доимийси, зонали эритиш усули билан олинган (кислород концентрацияси минимал) Si монокристалларининг кристал панжара доимийсидан кичикроқдир [82]. Муаллифларнинг фикрича бу Si даги кислород атомларининг ўрин алмашилиш ҳолати билан боғлиқ.

Тадқиқотлар натижасида маълум бўлдики, олиниш усулиги боғлиқ равишда Si даги кислород концентрацияси 10^{16} см^{-3} дан $1,8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ гача бўлиши [85] мумкин. Кислород концентрациясининг температуравий боғланиши қуйидаги муносабат билан аниқланади

$$N_0 = 1,6 \cdot 10^{21} \exp(-0,94/kT).$$

Кузатилаётган, термик ишловлар таъсиридаги, кислород ҳолатларининг ўзгариши ва концентрациясининг олиниш усулиг боғлиқлиги шундан дарак берадики, O нинг Si даги ҳаракати диффузион табиатга эга. Аниқланишича кислороднинг кремнийдаги диффузия коэффиценти 1300° C да $D_0 = 10^{-9} \text{ см}^2/\text{с}$ ва 450° C да $D_0 = 3 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2/\text{с}$ [84]. Кислород диффузия коэффицентининг температурага боғлиниши қуйидаги ифода билан аниқланади

$$D_0 = 0,21 \cdot \exp(-2,55/kT).$$

Шундай қилиб, кислород кремнийда ўрин олиш киришмаларидан анча

тез лекин суқилиш киришмаларидан секин диффузияланиши маълум бўлди.

Юқорида айтиб ўтилганидек, кремнийда эриган кислород атомлари электронейтрал ҳолатда бўлади. Бироқ термик ишловлар оқибатида ортиқча кислород SiO_2 бирикмасини ҳосил қилиб, локал марказлар юзага келтиради. Маълумки, SiO_2 ҳамда кислород ва кристал панжара сутруктураси нуқсонлари иштирокидаги бошқа комплекслар кремнийнинг оптик ва электрофизик хусусиятларига катта таъсир кўрсатади.

Паст температурали (450°C) термик ишловдан сўнг, концентрацияси 10^{16} см^{-3} бўлган ва донор табиатга эга электроактив марказларнинг пайдо бўлиши ҳақида илк бор [86] ишда хабар берилган эди. Термодонорлар ҳосил бўлиш кинетикасини ўрганиш натижасида қуйидагича қонуниятлар аниқланган;

- 1) куйдириш жараёнининг бошланғич босқичларида термодонорлар генерацияси тезлиги $[\text{O}]^4$ га пропорционал; $[\text{O}]$ – кислород концентрацияси;
- 2) $\ln(N_{td}^{max} - N_{td}) = f(t)$ боғланиш чизиқли табиатга эга бўлиб, кислороднинг кремнийдаги диффузияси фаоллашиш энергияси (2,55 эВ)га яқин 2,88 эВ фаоллашиш энергиясига эга;
- 3) 450°C да ишловдан ўтган намуналарга яна 500°C да ишлов берилса донор марказлар йўқ бўлиб кетади;
- 4) олдиндан 1000°C да ишлов берилган намуналарда кейинги 450°C даги ишловдан сўнг термодонорлар ҳосил бўлмайди.

[87] ишда термик ишлов жараёнида кислород атомлари O_n группаларга бирлашиши ва бу группаларга тобора кўпроқ O атомларининг келиб қўшилиши натижасида, таркибида $n=1, 2, 3, \dots$ атом бўлган, O_n шаклидаги кислород комплекслари ҳосил бўлиш модели илгари сурилган.

Кремнийдаги кислороднинг яхши ўрганилган комплексларидан бири бу – вакансия – кислород комплекси, А- марказдир. А – марказ кремний тақиқланган зонасида $E_c = 0,16$ эВ энергияли акцептор сатҳ ҳосил қилади. Марказ диффузиясининг фаоллашиш энергияси $\sim 1,3$ эВ. Комплекс термик ишловларга чидамли бўлиб, ~ 600 К да парчаланади.

Кислород атомлари иштирокида турли электроактив марказларнинг ҳосил бўлиши кристаллнинг рекомбинацион хусусиятларига таъсир кўрсатади. Баъзи тадқиқотчиларнинг [92] фикрича, термик ишлов жараёнида рекомбинацион марказларнинг ҳосил бўлишига кислород таъсир қилмайди. Баъзи ҳолларда термик ишловдан сўнг кислород ток ташувчилар яшаш вақтининг ортишига олиб келади. Бунда кислород, бошқа, рекомбинация марказлари билан бирикиб, нисбатан кичикроқ тутиб олиш юза кесимига эга комплекслар ҳосил қилиши тахмин қилинади.

[88, 93, 94] ишларда Si кристаллининг рекомбинацион хусусиятларининг кислород миқдорига боғлиқлиги батафсил ўрганилган. Юқори концентрацияли кислородга, $300-500^\circ\text{C}$ да термик ишловдан ўтган Si да ионлашиш вақтининг ортиши аниқланган. Шу билан бир вақтда, муаллифларнинг фикрича кислород билан боғлиқ бўлган, $E_c = 0,38$ эВ энергияли акцептор сатҳ юзага келиши ҳам кузатилган. Муаллифлар яна $E_g = 0,35$ эВ энергияли сатҳни ҳам O_3 типдаги комплекслар билан боғлайдилар. $600\div 1000^\circ\text{C}$ оралиқдаги термик ишловнинг Si даги О га таъсири $400\div 500^\circ\text{C}$ оралиқдагига нисбатан сустроқ экани аниқланган. Кислород билан боғлиқ электр фаол марказларнинг пайдо бўлиши фақат кучли легирланган кремний намуналарида кузатилган. Баъзи муаллифлар буни акцептор киришмалар таъсири натижаси десалар, бошқалари кислород – III гуруҳ элементи комплекси ҳосил бўлиши билан тушунтирадилар.

[76, 95] ишларда, 500...900°C ораликдаги термик ишловларнинг, юқори температурали термодонорларга таъсири ўрганилган. Намуналардаги паст температурали термодонорлар концентрацияси $4,4 \cdot 10^{15} \text{см}^{-3}$ ни, кислород концентрацияси эса $\sim 10^{18} \text{см}^{-3}$ ни ташкил этган. Намуналарни қисқа муддатли (30 дақиқагача) 650°C да ишлов берилган, натижада ток ташувчилар концентрацияси $4 \cdot 10^{13} \text{см}^{-3}$ гача пасайиб кетган. Тажрибаларнинг кўрсатишича, термодонорлар концентрацияси ишлов хароратига боғлиқ бўлиб, узок муддатли термик ишловда ўз максимумига эришади.

Кремний кристаллида катта концентрацияда учрайдиган яна бир технологик киришма бу углерод С атомларидир. Углерод – IV гурух элементи бўлиб, кремнийдаги каби s^2p^2 ташқи электрон қобикқа эга. Шу сабабли С атомлари Si кристал панжарасида асосан тугунларда жойлашади. Бу холни углерод атомларининг кремнийдаги диффузия фаоллашиш энергиясининг катта қиймати $\sim 3 \text{эВ}$ тасдиқлайди. Углерод атомлари диффузия коэффициентининг температурага боғланиши қуйидаги тенглама билан аниқланади

$$D = 0,33 \exp(-3/kT).$$

Максимал эрувчанлиги $4 \cdot 10^{18} \text{см}^{-3}$ ни ташкил этади. Углеродли кремний ютилиш спектрида, С – Si комплекси билан боғлиқ 16,6 мкм ли ва С – О комплекси билан боғлиқ 9 мкм ютилиш полосалари кузатилади. Аниқланишича кремнийдаги углерод атомлари кремний кристал панжараси доимийсини, углерод концентрациясига пропорционал равишда камайишига олиб келади:

$$\Delta d/d = 6,3 \cdot 10^{-24} N_c$$

N_c – углерод концентрацияси.

Оптик ютилишнинг спектрларидан углероднинг C^{12} , C^{13} , C^{14}

изотопларига тегишли $\nu = 604, 586, 576 \text{ см}^{-1}$ пиклар аниқланган.

Текширишлар натижаларига кўра кремнийдаги С атомлари электр нофаол ҳолатда. Бирок, кристалдаги бошқа бир қатор нуқсонлар билан таъсирлашиш натижасида С атомлари мураккаб электр фаол комплекслар ҳосил қилиши ва шу орқали, кислород билан бир қаторда, материал хоссаларига катта таъсир ўтказиши мумкин.

Ni билан легирланган Si нинг, нейтронлар билан нурлантирилгандан кейинги ИҚ ютилиш спектрларининг ўрганилиши натижасида шу нарса маълум бўлдики, никел билан легирланган намуналарда легирланмаганларига қараганда углеродга тегишли ютилиш полосалари интенсивлиги ортиб кетади.

Нурлантириш натижасида ҳосил бўлган тугунлараро Si атоми, вакансия билан бевосита аннигиляция бўлмаган шароитда, ўзининг юқори миграция энергияси туфайли тугунлардаги атомлар, жумладан С билан таъсирлашиши мумкин. Углерод атомлари кичик тетраэдрик радиусга эга бўлганлиги туфайли, кремний атомлари уларни тугунлардан чиқариб юбориб, тугунларга чиқиб олишлари ва нейтраллашиши мумкин. Тугунлараро Si атомлари концентрацияси С концентрациясидан ортиб кетганда, тугунлараро кремний атомлари миқдори ортиб кетиши оқибатида, кристалл хусусиятлари ўзгариб кетади. Агарда, кристал панжарада Ni атомлари мавжуд бўлса, тугунлараро Si атомларининг бир қисми улар билан таъсирлашиши оқибатида тугунларга ўтувчи кремний миқдори камайяди. Углерод атомлари концентрацияси, легирланмаган намуналардагига нисбатан ортиб кетади. Шу тарзда углерод атомлари кремний хусусиятларини шакллантиришда иштирок этади.

[99] ишда ўта тўйинган Si<Cu>, Si<Ag> ва Si<Au> қаттиқ эритмаларининг парчаланиш жараёнида углерод атомлари иштироки

ёритилган. Таъкидланишича, углерод атомларининг тугунлардан микробирикмалар таркибига ўтишидан бўшаб қолган, кристал панжара тугунларига чуқур сатхли киришма атомлари жойлашади ва кристал хусусиятларини ўзгартиради. Бу айниқса Cu билан легирланган Si намуналариди яққол кузатилади.

Шундай қилиб кислород ва углерод яримўтказгич материалнинг электрофизик хусусиятларини бошқаришда катта ўрин эгаллайди ва шунинг учун кремний таркибидаги бу киришмалар концентрацияси ва ҳолатларини бошқариш жуда муҳимдир.

Қисқача хулоса

Илмий адабиётлардан маълумки, кремний кристал панжараси ковалент боғланишли, ҳажмий марказлашган, кристал панжара доимийси 0,543095 нм бўлган кубик структурага эга.

Реал кристалларда, панжара даврийлигини бузувчи нуқсонлар мавжуд. Нуқсонлар келиб чиқишига кўра хусусий ёки киришмавий, ўлчамларига кўра эса нуқтавий, чизигий ва ҳажмий бўлиши мумкин.

Кремний таркибида асосий киришма атомларидан ташқари бошқариб бўлмайдиган ёки технологик киришмалар мавжуд. Кислород ва углерод кремнийдаги энг кўп миқдорли технологик киришмадир ва у асосан SiO_2 кўринишидаги майда бирикмалар шаклида боғланган ҳолатда бўлади.

Тадқиқотлар натижасида маълум бўлдики, олиниш усулига боғлиқ равишда Si даги кислород концентрацияси 10^{16} см^{-3} дан $1,8 \cdot 10^{-18} \text{ см}^{-3}$ гача бўлиши мумкин ва унинг температуравий боғланиши қуйидаги муносабат билан аниқланади

$$N_0 = 1,6 \cdot 10^{21} \exp(-0,94/kT).$$

Аниқланишича кислороднинг кремнийдаги диффузия коэффиценти 1300° C да $D_0 = 3 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2/\text{с}$ ва 450° C да $D_0 = 10^{-9} \text{ см}^2/\text{с}$.

Углерод – IV гуруҳ элементи бўлиб, кремний атомига ўхшаш s^2p^2 ташқи электрон қобикқа эга. Шу сабабли углерод атомлари кремний кристали панжарасида асосан тугунларда жойлашади. Углерод атомлари диффузия коэффицентининг температуравий боғланиши қуйидаги тенглама билан аниқланади

$$D = 0,33 \exp(-3/kT).$$

Максимал эрувчанлиги $4 \cdot 10^{18} \text{см}^{-3}$ ни ташкил этади. Углеродли кремний ютилиш спектрида, C – Si комплекси билан боғлиқ 16,6 мкм ли ва C – O комплекси билан боғлиқ 9 мкм ютилиш полосалари кузатилади. Аниқланишича кремнийдаги углерод атомлари кремний кристал панжараси доимийсини, унинг концентрациясига пропорционал равишда камайишига олиб келади:

$$\Delta d/d = 6,3 \cdot 10^{-24} N_c$$

N_c – углерод концентрацияси.

Оптик ютилишнинг спектрларидан углероднинг C^{12} , C^{13} , C^{14} изотопларига тегишли $\nu = 604, 586, 576 \text{ см}^{-1}$ пиклар аниқланган.

II БОБ. КИРИШМА АТОМЛАРИНИНГ КРИСТАЛЛ ПАНЖАРАДАГИ ХОЛАТЛАРИ

2.1. Кристалларда киришма атомлари энергетик сатхларининг хосил бўлиши

Киришмалар хақидаги маълумотни уларнинг яримўтказгичлар кристалларида электронлар учун хосил қиладиган энергия сатхлари тўғрисидаги қисқача ахборот билан яқунлаймиз.

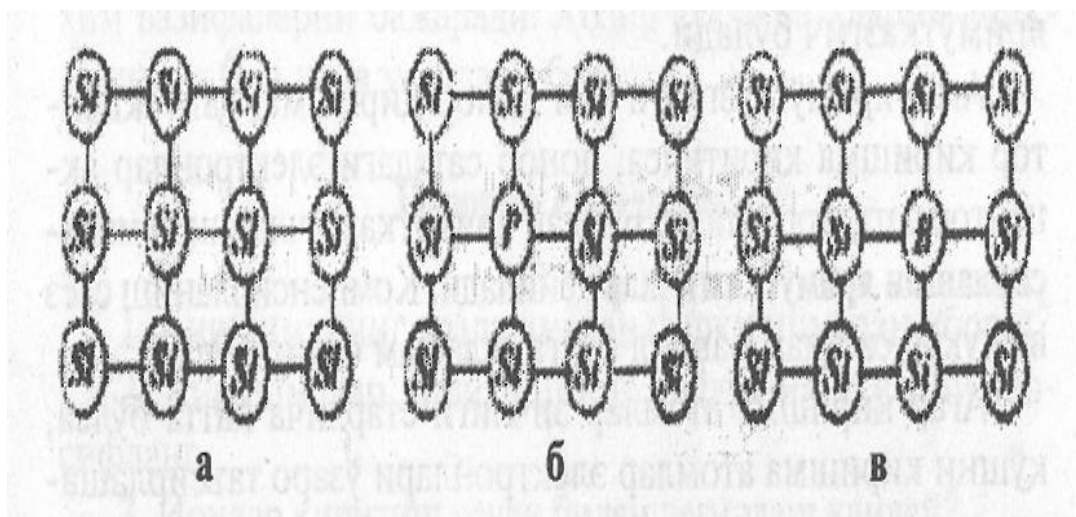
Кристалл панжарасига кириб олган киришмалар идеал металл панжараси қатъий даврийлигини бузувчи нуқсонлардир ва улар электронлар учун ўзига хос энергетик ҳолатлар пайдо қилади. Агар киришмалар зичлиги унча катта бўлмаса (айнимаган яримўтказгич), мазкур ҳолатлар киришма атомлар яқинида (маҳаллий жойларда) ўрнашган бўлиб, бу маҳаллий ҳолатлар сатхлари яримўтказгичнинг тақиқланган зонасида жойлашган бўлади. Маҳаллий сатхдаги электрон боғланган электрон бўлиб, уни эркин электронга айлантириш учун ёки валент зонадаги электронни маҳаллий сатхга ўтказиш учун муайян энергия керак бўлади. Агар маҳаллий сатх ўтказувчанлик ёки валент зонасига яқин жойлашган бўлса, уни *саёз сатх дейилади*. Саёз сатхдаги электронни фаоллаш энергияси (киришмани ионлаш энергияси) тақиқланган зона кенглиги E_g дан анча марта кичик бўлади.

Тақиқланган зонанинг ўрта қисмидаги маҳаллий сатхлар *чуқур сатхлар* деб аталади. Баъзи киришмалар саёз сатхлар хосил қилса, баъзилари чуқур сатхлар пайдо қилади.

Энг кўп қўлланиладиган кремний кристаллини олайлик. Маълумки, кремний панжарасида ҳар бир атомнинг 4 та энг яқин қўшниси бўлиб, улар билан 4 та валент электрони воситасида ковалент боғланган (18-а-расм). Агар шу панжарага 5 валентли элемент атоми (масалан, фосфор) киритилса,

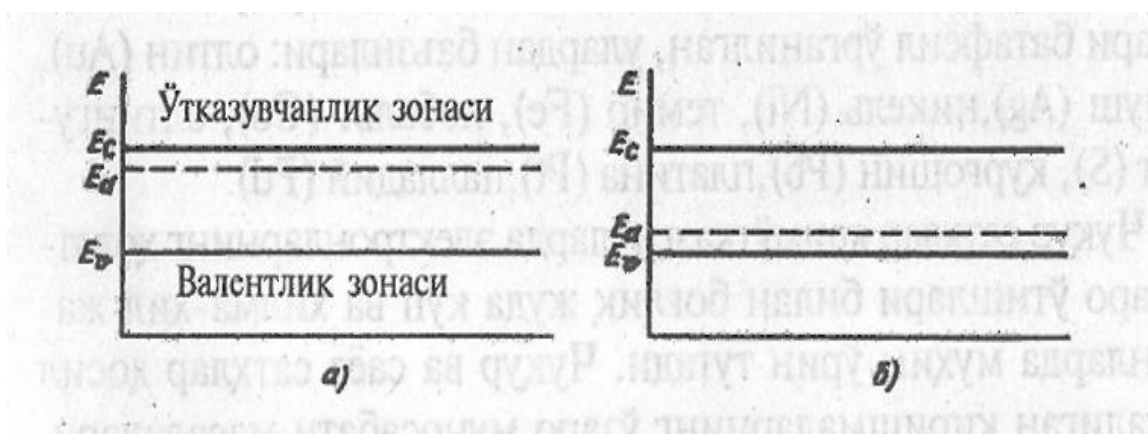
киришма атом кремний атоми ўрнига жойлашади (18-б-расм). Унинг 4 та валент электрони 4 та қўшни кремний (Si) атомлари билан ковалент боғланишни таъминлайди, 5 валентли электрон эса ўз атоми билан кучсиз боғланишда бўлади. Унга E_g га нисбатан анча кам E_d энергия (у хона температурасида kT тартибида) берилса, у ўз атомидан ажралиб, ўтказувчанлик электрони бўлиб қолади, яъни ўтказувчанлик зонасига ўтиб олади. Бу электроннинг кремний энергетик зонавий диаграммасидаги сатҳи ўтказувчанлик зонасидан E_d энергия қадар пастда, тақиқланган зонада тасвирланади (19-а-расм). Бу саёз сатҳ. Ўтказувчанлик зонасига электрон бера оладиган киришмани *донор киришма*, у ҳосил қилган сатҳни *донор сатҳ* дейилади. Етарлича донор киришма киритилган ва ўтказувчанлик электронлари тоза кристаллдагидан кўп бўлган яримўтказгични *n-тур яримўтказгич* дейилади. Агар кремнийга V элементлари (P, As, Sb) атомлари киритилса, кремний хона температурасида асосан электрон ўтказувчанликли (*n-тур*) яримўтказгич бўлади. Агар кремний (Si) кристаллига 3 валентли бор(B) атомлари киритилса, улар ҳам кремний атомлари ўрнига жойлашиб олади(18-в-расм).

Бор (B) атомида 3 та валент электрон бор. Унинг 4 та қўшни кремний Si атомлари билан ковалент боғланиш ҳосил қилиши учун бир электрон етишмайди. Бу электронни бор (B) атоми кремний (Si) атомлари орасидаги боғланишдан (валент хонадан) тортиб олиши мумкин. Бунинг учун унча катта бўлмаган E_a энергия керак бўлади.



18-расм. Кремний кристаллига киритилган киришмалар жойлашиши: а-киришмасиз кремний кристалли; б-фосфор киритилган кремний кристалли; в-бор (В) киритилган кремний кристалли.

E_a ҳам хона температурасида кТ тартибидадир. Бу сатҳ ҳам тақиқланган зонада. Аммо валент зона яқинида жойлашган (19-б-расм).



19-расм. Яримўтказгичнинг энергетик диаграммаси: а) донор киришмали яримўтказгич; б) акцептор киришмали яримўтказгич.

Валент зонадаги электронни ўзига бириктириб оладиган (ковак ҳосил қиладиган) киришмани акцептор киришма, E_a энергияли сатҳни акцептор сатҳ дейилади.

Акцептор киришма киритиб, коваклари кўпайтирилган яримўтказгични *p-тур яримўтказгич* дейилади.

Кремнийга III гуруҳ элементлари (In, Al, Ga, B,...) атомлари киритилса, у хона температурасидаёқ *p-тур яримўтказгич* бўлади.

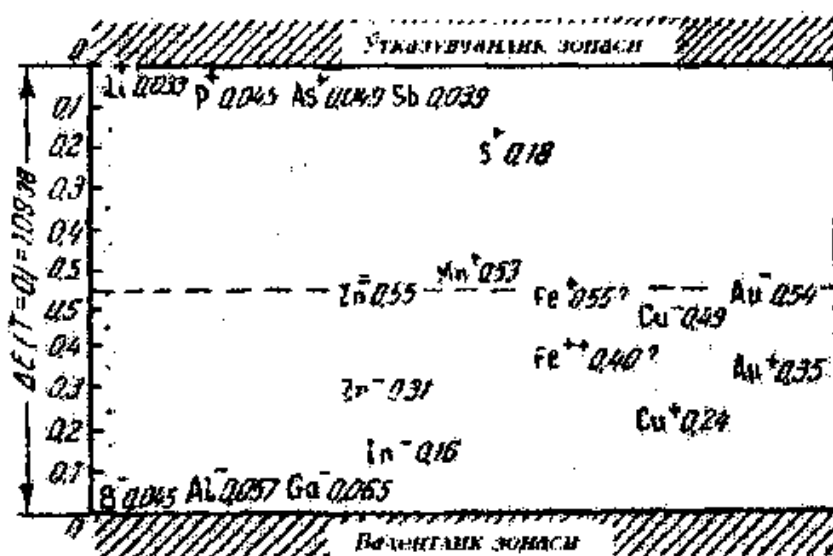
Агар яримўтказгичга ҳам донор киришма, ҳам акцептор киришма киритилса, донор сатҳдаги электронлар акцептор сатҳларга ўтади. Бундай яримўтказгичларни *компенсирланган яримўтказгичлар* дейилади. Компенсирланиш саёз ва чуқур сатҳлар мавжуд бўлганида ҳам содир бўлади.

Агар киришма атомлар зичлиги етарлича катта бўлса, қўшни киришма атомлар электронлари ўзаро таъсирлашади, киришма ҳосил қиладиган сатҳлар парчаланиб, электронлар (коваклар) энергиясининг киришмавий зонасини вужудга келтиради.

Киришмавий энергия зоналари ўтказувчанлик ёки валент зонаси билан тутшиб кетиши мумкин. Бу ҳол кучли легирланган яримўтказгичларга хосдир.

Яримўтказгичдаги киришмаларнинг кўпчилиги тақиқланган зонанинг ўрта қисмида, ўтказувчанлик ва валент зоналардан узокда электронлар учун энергия сатҳлари ҳосил қилади. Бу сатҳларни чуқур сатҳлар дейилади деб айтгандик. Чуқур сатҳлар ё донорлик, ё акцепторлик хоссаларига эга бўлади. Баъзи киришмалар бир неча чуқур сатҳлар ҳосил қила олади. Уларнинг баъзилари донор бўлса, баъзилари акцептор бўлади (амфотер киришмалар). Масалан, кремнийга бир неча ўн элемент атомлари киритилиб, уларнинг электрофизик хоссалари батафсил ўрганилган(20-расм), улардан баъзилари: олтин (Au), кумуш (Ag), никель (Ni), темир (Fe), кобальт (Co), олтингугурт (S), кўрғошин (Pb), платина (Pt), палладий (Pd).

Чуқур сатҳлар яримўтказгичларда электронларнинг ҳолатлараро ўтишлари билан боғлиқ жуда кўп ва хилма-хил жараёнларда муҳим ўрин тутади. Чуқур ва саёз сатҳлар ҳосил қиладиган киришмаларнинг ўзаро



20-расм. Кремнийда киришмаларнинг энергетик сатҳлари.

муносабати масалалари, киришмаларнинг нуқсонлар билан ўзаро таъсири муаммолари фан ва техникада долзарб муаммолар ҳисобланади.

Назорат қилинмайдиган кислород, азот, углерод ва бошқа киришмалар ва уларнинг нуқсонлар билан бирикмалари ҳам кремнийда чуқур сатҳлар пайдо қилади. Масалан, кремнийда кислород билан вакансия бирлашуви $O+V$ (ёки А-марказ) электрон учун тақиқланган зонада $E_c-0,16$ эВ чуқур сатҳ ҳосил қилади. Чуқур сатҳларнинг электрон ва ковакни ушлаб олиш кесимларини ҳам билиш керак.

Чуқур сатҳлар оптик ва фотоэлектрик ҳодисаларда муҳим вазифаларни бажаради. Ҳозир чуқур сатҳларни аниқлашнинг бир неча усуллари бор.

2.2. Донор ва акцептор киришмалар

Кремнийда энг фаол киришмалар элементлар даврий тизимининг III ва V гуруҳ элементларидир. Бу элементлар ўринбосар қаттиқ эритма ҳосил қилиб, донор ёки акцептор сифатида ишлайди, кремний ўтказувчанлиги катталиги ва турини ўзгартира олади.

Кремнийда кўпинча акцептор элементлар донор элементлардан кўра анча тез диффузияланади, аммо бор(акцептор) ва фосфор (донор) бир хил тезликда диффузияланади. Бор (B) ва фосфор (P) ларнинг кремнийда диффузияланиши батафсил ўрганилган (21-расм).

Диффузия коэффицентларининг температурага боғланиши

$$D_{P,B \rightarrow Si} = 10,5 \exp\left(\frac{-8500}{RT}\right) \text{ см}^2/\text{с} \quad ()$$

ифода билан тавсифланади.

Чуқур сатҳ ҳосил киладиган киришмалардан бири мис (Cu)дир. Унинг кремнийдаги диффузия тезлиги ҳаддан ташқари катта. Масалан, 800° ва 1100° C оралиғида миснинг диффузия коэффиценти $4 \cdot 10^{-7}$ дан то $4 \cdot 10^{-6}$ см²/с гача ўзгаради, унинг ифодаси:

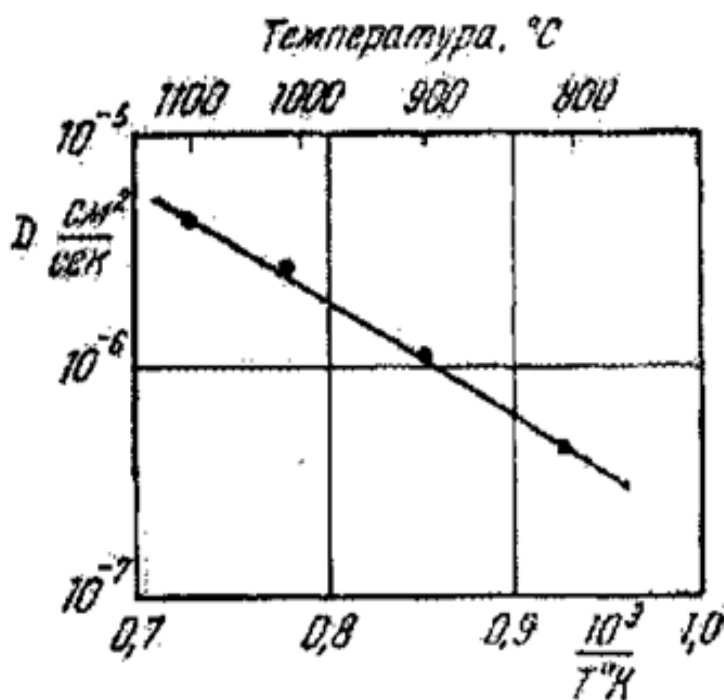
$$D_{Cu \rightarrow Si} = 4 \cdot 10^{-2} \exp\left(\frac{-230000}{RT}\right) \text{ см}^2/\text{с}$$

Мис ва литийдан ташқари яна кумуш, олтин, рух ва темир ҳам катта диффузия тезлигига эга, улар ўз электрик хоссалари бўйича кремнийда акцепторлар бўлади.

Доимий электрик майдон диффузия жараёнига таъсир кўрсатиши мумкин.

Тажрибалар тасдиқлашича, 1200°C дан юқорида кремнийдаги олтин киришмаси анодга томон кўчади, 1200°C дан пастда эса катодга томон кўчади.

Кумуш $1280\text{--}1350^{\circ}\text{C}$ оралиғида катод йўналишида кўчади. Олтин ва кумуш юқори температураларда мусбат ионлар сифатида кристалл панжарасининг тугунлари оралиғи бўйлаб кўчишини кутиш керак. Аммо олтиннинг юқори температурада анодга томон силжиши (бу манфий ионга хос силжиш) ғалати туюлади. Бу кичик температура оралиғида олтиннинг мусбат иони манфий ионга айланади деб ўйлаш қийин. Бу ерда бошқа бир ҳодиса юз бераётган бўлиши керак.



21-расм. Кремнийда бор (В) ва фосфор (Р) диффузияси

2.3. Киришма атомларининг кристал панжарадаги ҳолатлари

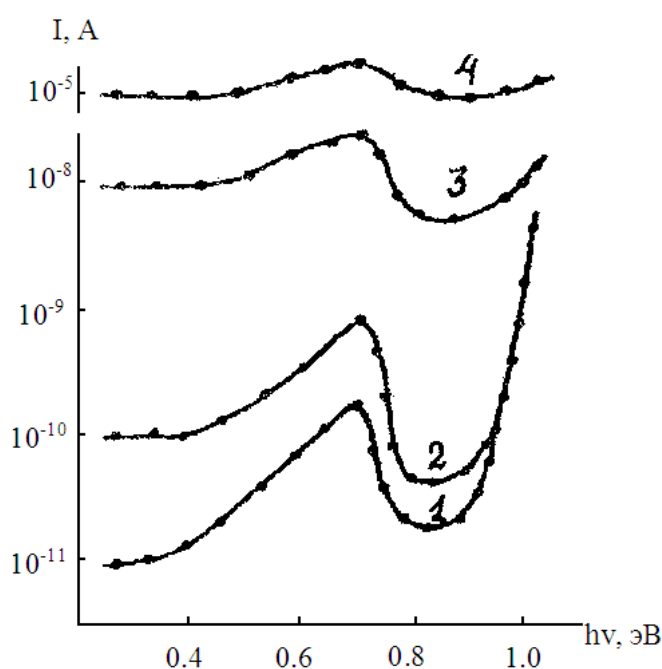
Маълумки, киришмавий марказларинг энергетик ҳолатлари киришма атомларининг электрон конфигурациясига ва уларнинг яримўтказгич кристал панжарасидаги ўрнига боғлиқ. Яримўтказгичларда чуқур энергетик сатҳлар ҳосил қилувчи кўплаб киришмаларнинг хусусиятларини ўрганиш натижасида, улар ичида ўтувчи гуруҳ металлари (Mn, Ni, Fe, V, Cr в.б.) алоҳида ўрин тутиши маълум бўлди [1]. Ўтувчи гуруҳ элементларининг асосий хусусиятларидан бири бу уларнинг тугалланмаган 3d-қобиғи ҳисобланади.

Бу гуруҳ элементлари томонидан ҳосил қилинадиган марказларнинг парамагнит хусусиятлари, ушбу марказларни ўрганишда ЭПР усулини қўллашга, уларнинг электр фаоллик кўрсатиш хусусияти эса чуқур сатҳларни тадқиқ қилишда сиғим усуллари кенг қўллашга имкон беради. Кремнийдаги чуқур сатҳли киришмалар орасида энг кўп ўрганилган киришмалардан бири бу Ni [2]. Радиоактив ва ностационар сиғим спектроскопия усуллари орқали, бу модда атомлари кремнийда 3d ўтувчи гуруҳ металлари ичида энг юқори эрувчанлик ($7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) ва диффузия коэффициентига ($10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$) эга эканлиги аниқланди. Маълум бўлишича, Si га киритилган Ni $E_c - 0.41 \text{ эВ}$ ва $E_v + 0.2 \text{ эВ}$ энергетик сатҳлар ҳосил қилади ва атомларининг умумий сони тугунларда жойлашган электр фаол атомлари сонидан $\sim 10^3$ мартадан кўпроқ ортиқ.

Никель киришмавий марказларининг ҳосил бўлиш самарадорлиги диффузия температурасига ва диффузиядан сўнг намуналарнинг совутиш тезлигига боғлиқ экани кўрсатилди.

Кремний монокристаллига никельнинг киритилиши фотосезгирликни орттиришига олиб келиши аниқланди. Si<Ni> нинг фотоэлектрик

хусусиятларини ўрганиш натижасида маълум бўлишича, бундай намуналарда $h\nu > 0.40$ эВ қийматларда сезиларли фототок ҳосил бўла бошлайди. $h\nu$ нинг қиймати ортиб бориши билан фототок 10-15 марта ортади, $h\nu > 0.7 \div 0.75$ эВ оралиқда унинг пасайиши кузатилади, $h\nu = 0.85 \div 0.9$ эВ дан бошлаб I_ϕ яна ортади. Қоронғидаги Si<Ni> намуналарида фототокнинг сезиларли ортиши $h\nu \sim 0.20-0.22$ эВ дан бошланади, токнинг кейинги кучли ўсиш соҳаси $h\nu > 0.40$ эВ дан бошланади (22-расм).



22-расм. n-Si<Ni> намуналарида фототокнинг тушаётган ёруғлик спектрига боғлиқлиги

Шундай қилиб олинган натижалар, киришмавий сатхларнинг термик активация энергияси оптик активация энергияси билан устма-уст тушишини кўрсатиб турибди, бу эса [1-2] ишлар натижаларининг яна бир тасдиғи сифатида хизмат қилиши мумкин.

Бир катор ишларда кремнийда марганец чуқур сатхларининг ҳосил бўлиш кинетикаси кузатилган. [3] да кўрсатилишича марганец кремний

тақиқланган соҳасида иккита чуқур энергетик сатҳ, $E_c-0.50$ эВ ва $E_v+0.38$ эВ, ҳосил қилиши кўрсатилган. Кейинги термик ишлов (250°C) да $E_c-0.50$ эВ ли сатҳ йўқолиб унинг ўрнига бошқа $E_c-0.39$ эВ ли донор сатҳ ҳосил бўлади. Хона хароратида сақланиши натижасида $E_c-0.39$ эВ ва $E_v+0.38$ эВ сатҳлар концентрацияси синхрон равишда камайиб боради. Сақлаш муддатининг ортиши билан $E_c-0.50$ эВ сатҳ қайта тикланади.

[4] ишда мавжуд парамагнит марказларни марганец сатҳлари билан боғлаш мақсадида намуналарни ЭПР ва DLTS усули ёрдамида ўрганилган. Саёз сатҳли киришманинг тури ва концентрациясига боғлиқ равишда Si да Mn га тегишли турли чуқур сатҳлар ва ЭПР спектрлари кузатилган. Марганец билан диффузия усулида легирланган n-Si да, DLTS ўлчовлари воситасида, максимумлари турли температураларга ($T_m = 68\text{ K}, 125\text{ K}, 188\text{ K}$ ва 245 K) мос келувчи тўртта чўққи кузатилган. Аниқланишича кузатилаётган чўққиларга ионланиш энергиялари $E_c-0.13$ (I), 0.20 (II), 0.42 (III), 0.54 (IV) эВ бўлган энергетик сатҳлар мос келади. Юқоридаги ишлар муаллифлари томонидан аниқланишича кузатилаётган чуқур сатҳлар концентрациялари, айниқса I, II, IV сатҳларининг, диффузия температурасига ва диффузиядан кейинги совутиш тезлигига боғлиқлиги кўрсатилган.

Юқорида тилга олинган чуқур энергетик сатҳлар (ЧЭС), диффузиядан сўнг кескин совитилган n-Si<Mn> намуналарида кузатилган. Секин совитилган намуналарда эса фақат ионланиш энергиялари $E_c-0.20$ ва $E_c-0.54$ эВ бўлган ЧЭС лар кузатилган. Аниқланишича, n-Si<Mn> да ЧЭС ларнинг ҳосил бўлиш самарадорлиги кўп жихатдан Si таркибидаги технологик киришмалар (O, C, Fe в.б.) концентрациясига боғлиқ [7]. Кремний монокристалларида кислород атомлари концентрациясининг ортиши ва углероднинг камайиши билан $E_c-0.42$ ва $E_c-0.54$ эВ энергияли сатҳларда ютилиш интенсивлигининг ортиши кузатилади. n-Si<Mn> билан бир хил

термик ишловдан ўтган назорат (Mn киритилмаган) намуналарида [5-7] ишларда $E_c-0.20$ ва $E_c-0.47$ эВ энергияли сатхлар кузатилган. Таъкидлаш лозимки, $E_c-0.20$ эВ энергияли сатх билан боғлиқ бўлган чўққи, $n\text{-Si}<\text{Mn}>$ намуналаридагидан фарқли температуралар оралиғида ётади ва электронларни тутиб олиш кўндаланг кесими юзаси билан фарқланади.

$n\text{-Si}<\text{Mn}>$ намуналарида ЭПР спектрлари 1.5-20 К оралиқда ўлчанганда P^0 сатхлардан термик кўзғалишлар деярли содир бўлмайди, эркин ток ташувчилар концентрацияси жуда кичиклиги сабабли намуналар қаршичилиги ортиб кетади. Кескин совитилган $n\text{-Si}<\text{Mn}>$ намуналари ЭПР спектрларида Mn^- , Mn^0 парамагнит марказлар ва $(\text{Mn}^0)_4$ кўринишидаги комплекслар кузатилган. Mn^- парамагнит марказининг ЭПР спектри 3.6.a расмда келтирилган. Келтирилган спектр параметрлари: $g = 2.0104 \pm 0.001$, $A = 76.0 \pm 0.2$ Hz. бўлиб, Людвиг ва Вудберилар [4] томонидан олинган шу каби спектрлар қийматлари билан мос тушади. Mn^0 парамагнит марказининг ЭПР спектри (2-расм) параметрлари $g = 3.362 \pm 0.003$, $A = 58.0 \pm 0.2$ Hz. $(\text{Mn}^0)_4$ парамагнит марказининг ЭПР спектри параметрлари ҳам [6] ишлар натижалари билан мос келади. [4] ишлар муаллифлари томонидан, Mn^- ва Mn^0 марказлари концентрациялари нисбати ρ га боғлиқ эканлиги аниқланган. Шундай қилиб, $\rho \sim 0.3\text{-}4$ ом·см бўлган Si намуналарида фақат Mn^- марказлар кузатилади ёки уларнинг концентрацияси Mn^0 га қараганда жуда катта бўлади, $\rho = 5$ ом·см бўлганда эса Mn^- ва Mn^0 (Mn^0 нинг концентрацияси биринчиникига қараганда кўпроқ) билан бир қаторда $(\text{Mn}^0)_4$ комплекслар ҳам кузатилади. Агарда $\rho \sim 65\text{-}110$ ом·см бўлса, ЭПР спектрларида фақат Mn^0 ва $(\text{Mn}^0)_4$ марказлар кузатилади, айтиб ўтиш лозимки бундай намуналарда $(\text{Mn}^0)_4$ комплекслари концентрацияси $\rho = 5$ ом·см ли намуналардагидегига нисбатан юқорироқ бўлади.

Mn^- , Mn^0 ва $(\text{Mn}^0)_4$ ларга тегишли энергетик сатхларни [4, 5] ишлар

муаллифлари ЭПР ва DLTS спектрларини солиштириш орқали аниқлашган. Ўлчашлар ва таҳлиллар шуни кўрсатдики I, II ва IV ЧЭС лар концентрациялари DLTS спектридаги Mn^- , Mn^0 ва $(Mn^0)_4$ марказлар концентрациялари билан мос тушади. Шундай қилиб, $E_C - 0.13$ эВ ва $E_C - 0.42$ эВ энергияли сатхлар алохида турувчи Mn^- ва Mn^0 атомлари билан, $E_C - 0.54$ эВ энергияли сатх эса тўртта атомдан иборат марганец кластерига тегишли экани маълум бўлди. Ушбу хулосалар, ЧЭС лар ва Si даги Mn киришмавий марказларига 300 K ва 423-573 K ҳароратлардаги термик ишлов тасирини ўрганиш натижалари билан ҳам тасдиқланган.

Маълум бўлишича, n-Si<Mn> намуналарининг узок муддат хона ҳароратида сақланиши Mn^- ва Mn^0 марказларининг йўқолиб кетиши билан бир вақтда $E_C - 0.13$ эВ ва $E_C - 0.42$ эВ сатхларнинг концентрациясининг пасайишига ва боғланган ҳолда турган фосфор атомларининг ажралиши туфайли ионлашган фосфор концентрациясининг ортишига олиб келар экан. Бу муддат ичида $(Mn^0)_4$ марказларининг ЭПР чизиқлари интенсивлиги ва $E_C - 0.54$ эВ энергияли сатхлар концентрацияси деярли ўзгармайди.

Шунингдек p-Si<Mn> намуналаридаги Mn нинг ЧЭС лари параметрлари ҳам аниқланган. ФЕ спектрларининг таҳлили шуни кўрсатдики p-Si<Mn> нинг тақиқланган зонасининг юқори қисмида иккита энергетик сатх ~ 0.41 эВ ва ~ 0.50 эВ кузатилган. Айнан шу намуналарнинг DLTS спектрларини ўрганилиши натижасида $E_V + 0.50$ эВ сатх топилган. p-Si<Mn> диодларга заряд ташувчилар инъекциялангандан кейинги DLTS спектрларининг таҳлили шуни кўрсатдики уларда айнан n-Si<Mn> даги каби ($E_C - 0.20$ эВ, $E_C - 0.42$ эВ ва $E_C - 0.54$ эВ) учта ЧЭС ҳосил бўлади.

Бироқ, диффузиядан сўнг бир хил тезликда совутилган n-Si<Mn> намуналаридан фарқли равишда p-Si<Mn> намуналарида $E_C - 0.42$ эВ энергияли сатх концентрацияси $E_C - 0.20$ эВ ва $E_C - 0.54$ эВ энергияли

сатхлар концентрациясидан анча кичик.

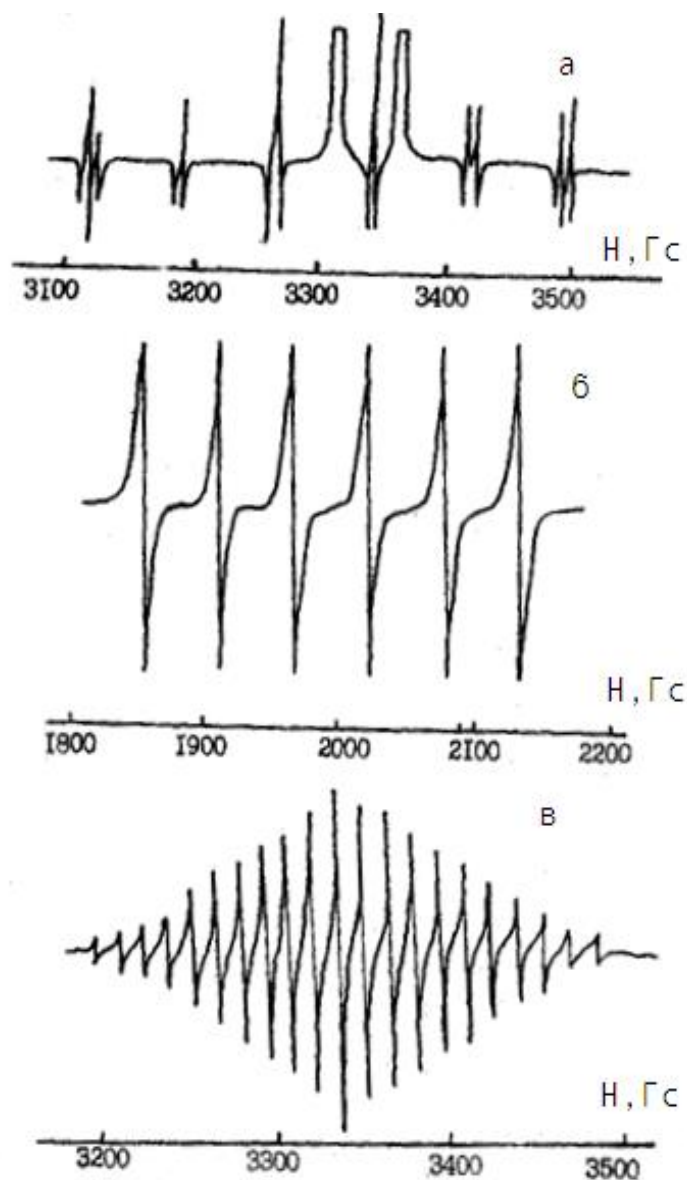
Шуни таъкидлаб ўтиш лозимки, $E_C + 0.54$ эВ энергияли сатх ностабил бўлиб, 300 К температурада узок муддат сақланмайди. Бу сатхни фақат диффузиядан сўнг жуда қисқа вақт давомида кузатиш мумкин. Хона хароратида бир hafta сақланганидан сўнг бу сатх кузатилмайди.

Маълумки Mn нинг диффузия усулида киритилиши p-Si нинг компенсирланишига олиб келади. Бундай намуналарда Mn энергетик сатхлари параметрлари, ток ташувчилар концентрациясининг температурага боғланиши $n(T)$ ни ўрганиш орқали аниқланган. Ушбу ҳолатни ва бунда ҳосил бўлувчи киришмавий сатхларни тадқиқ этиш мақсадида [9] ишда КДБ-10 маркали кремнийга юқори температурали диффузия усулида Mn киритилган. Диффузия шароитлари шундай танланганки Si<Mn> ўта компенсирланган ва юқори қаршиликли $\rho \sim 2 \cdot 10^5$ ом·см бўлиб қолган. Диффузиядан сўнг бу намуналарда 0.53 ± 0.03 эВ энергияли ЧЭС аниқланган.

Ўта компенсирланган n-Si<Mn> намуналарида 19 компоненти, СТС константаси $13.1 \cdot 10^{-4}$ см⁻¹ ва $g = 2.0005 \pm 0.005$ бўлган DLTS спектри кузатилган. Ушбу спектр, аввалроқ кузатилган ва 4 атомли (Mn⁰)₄ кластерларига тегишли ЭПР спектрларига ўхшаш. Баъзи кучсизроқ компенсирланган n-Si<Mn> намуналарида Mn-V донор-акцептор жуфтига тегишли ЭПР спектрлари топилган.

Ўта компенсирланган n-Si<Mn> намуналарини хусусий ёки оқ ёруғли билан, шунингдек $h\nu \sim 0.52$ эВ ва <0.5 эВ энергияли фотонлар билан ёритилиши, намуналарнинг электр ўтказувчанлигини сезиларли даражада ортириб юбориши аниқланган. Намуналарни турли энергияли ёруғлик квантлари билан ($h\nu \sim 0.5$ эВ дан ташқари) ёритилиши (Mn⁰)₄ га тегишли ЭПР сигналлари интенсивлигининг ортишига олиб келади. Бироқ Mn-V га

тегишли спектрда хеч қандай ўзгаришлар юз бермайди. ЭПР сигналларининг 0.52 ва 0.55 эВ энергияли фотонлар билан ёритилишда кучайиши ҳақиқатдан ҳам ионланиш энергияси E_c — 0.54 эВ бўлган сатх $(Mn^0)_4$ кластерлари га тегишли эканини тасдиқлайди.



23-расм. $n\text{-Si}\langle Mn \rangle$ даги Mn^+ (а), Mn^0 (б) ва $(Mn^0)_4$ (в) марказларининг ЭПР спектрлари. $T = 4.2\text{ К}$

Қисқача хулоса

Киришма атомлари кремний кристалига киритилгандан сўнг ташқи электрон конфигурацияси, ион радиуси, электроманфийлиги ва бошқа бир қатор электрофизик параметрларига боғлиқ ҳолда, кристал панжара тугунларида ёки тугунлараро жойлашиши мумкин. Тугунларга жойлашган атомлар электр фаол ҳолатга ўтади ва кремний тақиқланган зонасида, ўтказувчанлик зонаси тубига ва валент зонасининг юқори қисмига нисбатан узоқ ёки яқин жойлашганлигига қараб чуқур ёки саёз, киритилган киришма атомларининг сиртки электрон қобиғининг тузилишига қараб донор ёки акцептор сатҳлар ҳосил қилади.

Тугунлараро жойлашган атомлар оддий шароитда электр нофаол ҳолатларда бўладилар. Тугунлараро атомлар концентрацияси ортиб кетганда киришма атомлари баъзан киришмавий атом – кристал панжара нуқсони ёки киришмавий атом – технологик киришма типдаги нанокластерлар ёки микробирикмалар ҳосил қилишлари мумкин.

Радиоактив ва ностационар сизим спектроскопия усуллари орқали, Ni атомлари 3d ўтувчи гуруҳ металлари (Mn, Ni, Fe, V, Cr в. б.) ичида энг юқори эрувчанлик ($7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) ва диффузия коэффициентига ($10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$) эга эканлиги аниқланди. Кремнийга киритилган никель атомлари $E_c - 0.41 \text{ эВ}$ ва $E_v + 0.2 \text{ эВ}$ энергетик сатҳлар ҳосил қилади ва атомларининг умумий сони тугунларда жойлашган электр фаол атомлари сонидан $\sim 10^3$ марта ортиқ. Демак киритилган атомларнинг асосий қисми тугунлараро нофаол ҳолатларда бўладилар.

Кремнийда марганец чуқур сатҳлари ҳосил бўлиш кинетикаси кузатилган. Маълум бўлишича, кремний тақиқланаган соҳасида иккита чуқур энергетик сатҳ, $E_c - 0,50 \text{ эВ}$ ва $E_v + 0,38 \text{ эВ}$, ҳосил қилиши кўрсатилган.

Кейинги термик ишлов (250°C) да E_c - 0,50 эВ ли сатҳ йўқолиб унинг ўрнига бошқа E_c - 0,39 эВ ли донор сатҳ ҳосил бўлади. Хона ҳароратида сақланиши натижасида E_c - 0,39 эВ ва $E_v + 0,38$ эВ сатҳлар концентрацияси синхрон равишда камайиб боради. Сақланиш муддатининг ортиши билан E_c - 0,50 эВ сатҳ қайта тикланади. Юқорида келтирилган энергетик сатҳлар марганецнинг тугунлардаги ва тугунлараро Mn^- , Mn^0 ва $(\text{Mn}^0)_4$ кўринишидаги ҳолатларига тегишли эканлиги аниқланган.

III БОБ. КРИСТАЛЛАРДА КИРИШМА АТОМЛАРИНИНГ БИРИКМАЛАРИ

3.1. Кристал панжарада киришма атомлари микробирикмаларининг пайдо бўлиш механизмлари, уларнинг таркиби ва тузилиши ва ўлчамлари

Маълум бўлишича Чохральский усули билан ўстирилган монокристалл кремнийга, юқори температурада ишлов бериш натижасида SiO_2 кўринишидаги кислород преципитатлари (КП) ҳосил бўлади. $700\div 900^\circ\text{C}$ оралиғида асосан дисксимон шаклдаги КП лар ҳосил бўлиши аниқланди. Кейинги текширувлар натижасида, бу каби дисксимон КП лар кўплаб майдароқ ($\sim 20\text{\AA}$) ўлчамли SiO_2 преципитатларидан иборатлиги аниқланди.

Ўта тўйинган кислород қаттиқ эритмасининг дислокациясиз Si даги парчаланиш кинетикасини ўрганиш шуни кўрсатдики,

$650\div 1100^\circ\text{C}$ оралиғида, $(\text{O})_n$ комплекслари янги фаза ҳосил бўлиш марказлари вазифасини бажаради. Айтиб ўтиш лозимки, киришма атомларининг тузилмалари кристалл панжарада механик кучланиш юзага келишига сабаб бўлади.

Баъзи ишларда кўтсатилишича, термик ишлов пайтида кислород атомлари O_n гуруҳларга йиғилади, янги атомларнинг тобора йиғилиб бориши натижасида янги фаза шаклланади.

Маълумки, асосий легирловчи киришмаларнинг (B, P ва As) Si даги эрувчанлиги бир- бирдан кескин фарқ қилади. Текширишларда кремний фосфиди шаклидаги фосфор преципитатлари аниқланган. Фосфор микробирикмаларининг мавжудлигининг далили сифатида шуни айтиш мумкинки диффузион қатламдаги электр фаол фосфор микдори унинг умумий микдоридан анча кичик. Электрон микросураётлардан маълум бўлишича кремний фосфид микробирикмалари игнасимон шаклга эга.

Бор микробирикмалари ҳосил бўлиши учун, кремнийдаги бор миқдори ўта юқори бўлиши кераклиги аниқланди. Бор киритилиши натижасида ҳосил бўлувчи микробирикмаларнинг аксарияти пластинасимон шаклга эга бўлган ромбоэдриқ структурали SiB_x таркибга эга.

Б. И. Болтакс ва бошқа бир қатор олимлар томонидан Mn , Fe , Ni , Cu ва Co каби моддалар микробирикмаларининг кремний электрофизик хусусиятларига таъсири кенг ўрганилган.

Маълум бўлишича Mn атомлари Si да Mn^{+} ионларидан иборат кластерлар ҳосил қилади. Алоҳида ионлар концентрацияси кластерлар концентрациясидан юқори бўлганда уларнинг(кластерларнинг) таъсири сезилмайди. Тажрибаларда тўртта Mn^{+} ионидан иборат Mn_4 кластерларининг ҳосил бўлиши ва бу кластерлар кремний таъқиқланган соҳасида $E_s=0,52$ эВ энергияли сатх бериши аниқланган.

Бошқа ишларда аниқланишича, кремнийда никель ва гадолинийнинг жуда оз қисми (0,1 % гача) электр фаол ҳолатда бўлишлиги, киришма атомларининг қолган қисми преципитатлар ва комплекслар шаклида бўлишлиги аниқланган. Si ни бу киришмалар билан легирланганда, кристаллдаги хусусий нуқсонлар ва бошқа киришмалар билан ўзаро таъсирлашиш учун қулай шароит юзага келади. Бундай ўзаро таъсирлар натижасида киришма-киришма (К-К), киришма-нуқсон (К-Н), нуқсон-нуқсон (Н-Н) каби турли комплекслар ҳосил бўлади. Бундан ташқари кўп атомли киришмавий марказлар ҳосил бўлиши ҳам мумкин.

Ташқи гидростатик босим(ТГБ)нинг $\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle$ электрофизик хусусиятларига таъсирини ўрганиш жараёнида, маълум бўлдики, ташқи босим P $\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle$ таркибидаги преципитатларнинг парчаланишига олиб келади. $E_d = p v_d$ тенглик парчаланиш шarti ҳисобланиб, E_d ва v_d мос равишда преципитат ҳосил бўлиш энергияси ва ҳажми. $\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle$ ва $\text{Si}\langle\text{Gd}\rangle$ да преципитатларнинг барик тўсиғи аниқланган, кремнийли Шотки

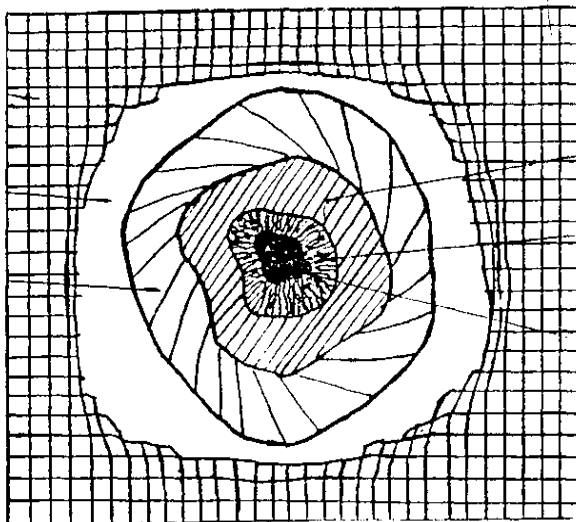
барьерларида ва МДЯ-тузилмаларда эса турли табиатга эга бўлган “сиртий преципитатлар” аниқланган. Рентген-дифракцион ва электрон – микроскопик текширишлар ёрдамида $\text{Si}<\text{Ni}>$ таркибидаги преципитатларнинг кўп қатламли, асосан Si_mNi_n силцидлардан иборат эканлиги аниқланди. Қуйида ушбу текширишлар натижалари асосида тузилган преципитат модели келтирилган (24-расм).

450⁰С да Si ва $\text{Si}<\text{Ni}>$ даги термодонорлар ҳосил бўлиш кинетикаси ўрганилган. Тажрибаларда аниқланишича Ni термодонорлар ҳосил бўлиш тезлигини камайтиради ва уларнинг максимал концентрациясининг қийматини анча пасайтиради. Термодонорларнинг йўқлигини никель ва кислород атомларининг ўзаро таъсири билан тушунтириш мумкин. Термик ишлов жараёнида никель атомлари кислород атомлари билан таъсирлашиб, уларни термодонорлар ҳосил бўлиш жараёнидан четлаштиради.

Рентген –топография ва инфрақизил микроскопия усуллари билан таркибида Mn, Ni бўлган кислород-кремний комплексларининг ҳосил бўлиш жараёни тадқиқ этилганда, мураккаб комплекслар ҳосил бўлиш жараёнига таъсир кўрсатувчи қуйидаги асосий омиллар аниқланди:

- а) кремнийдаги кислород концентрацияси;
- б) кейинги паст температурали ишлов;
- в) кейинги юқори температурали ишлов;
- г) киришмалар диффузиядан кейинги совутиш тезлиги.

Кислород атомлари ва унинг комплекслари Ni ва Mn атомларининг преципитатланиш маркази вазифасини бажариши мумкинлиги таъкидланмоқда. Кислород концентрацияси юқори бўлган кремнийга Mn ва Ni нинг киритилиши марганец ва никель бинар оксидлари шаклидаги комплексларининг концентрациясини ошишига ва янада мураккаб микробирикмаларнинг юзага келишига олиб келиши мумкинлиги аниқланди.



24-расм. Si монокристалдаги Ni преципитати модели.

Нанобирикмаларнинг структураси

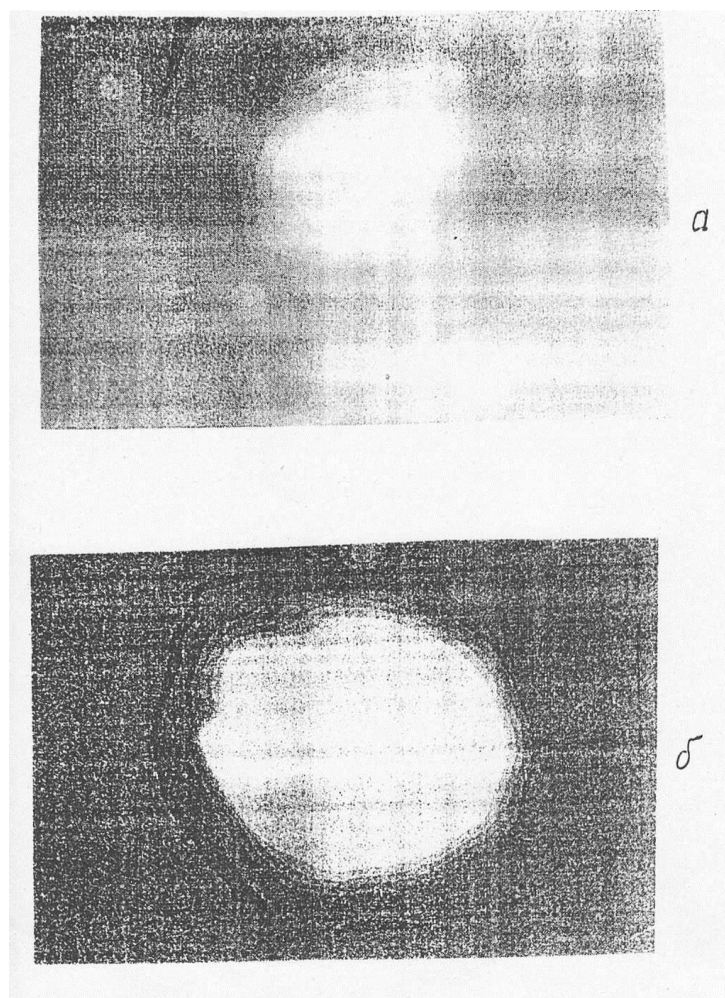
Никель микробирикмалари структурасини ўрганиш натижасида маълум бўлдики, киришмавий преципитатлар бир неча силицид қатламларидан иборат бўлиб, унинг марказида никель концентрацияси четки қатламларидагига қараганда кескин фарқ қилади яъни преципитат марказида никель миқдори ўта катта. Олинган натижаларга асосланиб шуни айтиш мумкинки, киришма атомлари концентрацияси преципитат марказидан унинг четига томон пасайиб боради. Марказда Ni атомлари, кейинги қатламда Ni_2Si , кейингисида NiSi , кейингисида NiSi_2 в.х. Ушбу қатламларнинг ҳар бири ўзининг ички кучланишига эга. Ички кучланишни ташқи таъсирлар билан компенсирлаш (темик ишлов (ТИ), босим, радиацион нурланиш) преципитатнинг парчаланишига олиб келади.

Никель микробирикмаларининг структураси ва кимёвий таркибини ўрганиш натижасида шу нарса маълум бўлдики, преципитат ўз шакли ва ўлчамларига қараб турлича тузилишга эга бўлади. Яна шуни таъкидлаб ўтиш

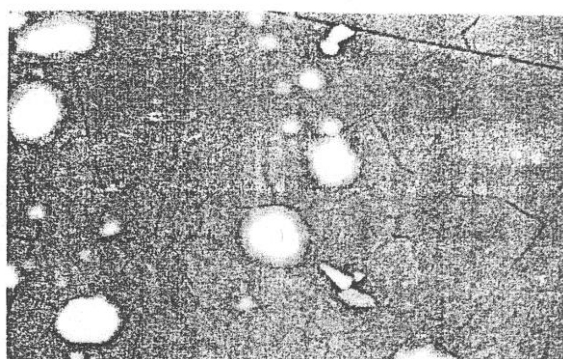
лозимки, преципитатлар ўз шаклига қараб турлича кимёвий таркибга эга бўлади. Термодинамик мувозанат ҳолатидаги преципитатлар асосан сферик шаклга эга ва нисбатан йирикроқ ўлчамларга эга (~ 6 мкм). Лекин уларнинг структуралари бир хилда эмас (25-расм). 25а, расмдан кўриниб турибдики ҳар-бир силицид қатламининг қалинлиги l деярли бир хил. Бундай тузилиш шу каби тузилишга эга бўлган йирик ўлчамли преципитатлар учун хосдир. Бундан ташқари бошқачароқ тузилишга эга бўлган преципитатлар ҳам кузатилади, уларнинг марказий қисми жуда йирик бўлиб, четки қатламлари жуда юпқа (25-б расм). Уларнинг четки қатламлари жуда юпқа бўлишига қарамай (0,2-0,4 мкм), олинган сураътларда улар ўртасидаги чегаралар яққол кўриниб туради. Бу эса, ҳар-бир силицид қатламининг ички кучланиши бошқалариникидан фарқ қилишини яна бир-бор тасдиқлайди.

Йирик преципитатлардан фарқли ўлароқ, майдароқ преципитатлар хилма-хил структурага эга. Маълумки кремний монокристалларидаги майда преципитатларнинг асосий қисми термодинамик номувозанатий ҳолатларда бўлади. Бундай микробирикмаларнинг сиртида, преципитат-монокристалл чегарасида ёрқин соҳа кузатилади. Бу эса бу ораликда бўшлиқ борлигини билдиради. Сферик шаклга эга бўлган, майда преципитатлар асосан бир хил тузилишга эга (26-расм). Игнасимон ва дисксимон шаклдаги майда преципитатлар асосан бир турдаги преципитатдан иборат бўлиб, кўп қатламли тузилишга эга эмас.

Ўлчамлари ~ 2 мкм гача бўлган сферик преципитатларнинг структурасини ўрганилганда, уларнинг бир қисми кўп қатламли яъни икки – уч силицид қатламли структурага эга эканлиги маълум бўлди.



25 - расм. Ni нинг ҳар хил структурали Si даги тасвири.



26-расм. Ni преципитатининг кремнийга диффузиялангандан кейинги –
20000 марта катталаштирилган тасвири

Микробирикмаларнинг кимёвий таркиби.

Кремний монокристалларидаги никель преципитатларининг кимёвий таркибини ўрганиш натижасида маълум бўлдики, преципитатнинг ўлчамлари ва шаклига қараб уларнинг кимёвий таркиби бир-биридан фарқланади. Кўп қатламли йирик преципитатларда (~6 мкм), никельнинг улуши унинг марказида 75-80 % гача етади. Преципитат марказидан унинг четларига томон никельнинг улуши камайиб боради ва энг четки қатламида унинг улуши 15-20 % гача тушади. Преципитат марказида кремнийнинг улуши энг оз 20-25 % бўлади, унинг четки қатламларига томон кремнийнинг улуши ортиб боради. Преципитат ҳажмида асосий киришма Ni ва Si атомларидан ташқари бошқарилмайдиган технологик киришма Fe ва Cu атомлари ҳам мавжуд. Диаметри $d=6$ мкм бўлган, марказий қисмдан ва учта силицид қатламидан иборат преципитат ҳажмидаги Si, Ni ва Fe нинг тақсимоти 27-расмда келтирилган.

Таъкидлаш лозимки, технологик киришмалар орасида Fe нинг концентрацияси бошқаларига қараганда анча юқори. 27-расмдан кўриниб турибдики Fe атомлари бутун преципитат ҳажми бўйлаб тақсимланган. Кўриш мумкинки темир атомларининг тақсимланишида маълум қонуният мавжуд. Преципитат марказида темир атомлари концентрацияси N_{Fe} -максимал қийматига эришади (0,50,7 %) ва преципитат сиртига томон камайиб боради. Бундан Ni ва Fe тақсимотида муайян ўхшашлик мавжудлиги келиб чиқади.

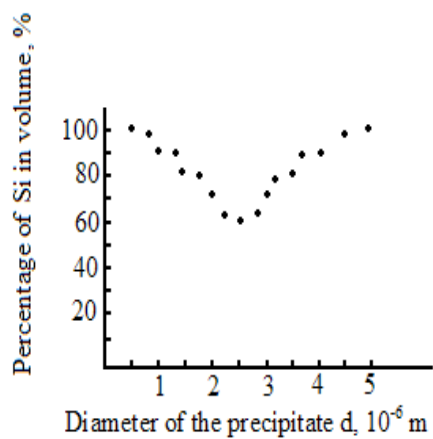
Икки-уч силицид қатламдан иборат, кичик ўлчамли (2мкм) преципитатларнинг кимёвий таркиби бироз бошқачароқ. Бундай преципитатлар марказида никельнинг улуши 30-35 % фоизни ташкил этади ва преципитат сиртига томон унинг миқдори пасайиб боради. Преципитат таркибидаги Si тақсимотида тескари қонуният кузатилади, марказда унинг

улуши 6570 % гача, сиртга томон эса ортиб боради. Бундай преципитатларда технологик киришмалар хусусан Fe нинг тақсимои худди асосий киришма атомлари тақсимои каби кўринишда бўлади. Марказда унинг миқдори 0,20,3 % ни ташкил этади. 22-расмда бундай преципитат ҳажмидаги Si, Ni ва Fe тақсимои келтирилган. Ўлчамлари 0,52 мкм оралиқда бўлган игнасимон, линзасимон ва сферик шаклга ва бир хил структурага эга бўлган преципитатларда киришма атомлари бутун ҳажм бўйлаб деярли бир текисда тақсимланган ва уларнинг улуши ~25 % ни ташкил қилади, асосий атомлар улуши эса ~75 % ни ташкил қилади. Теннологик киришмалар бу каби преципитатларда ҳам мавжуд бўлиб, Fe нинг улуши ~0,2 % ни ташкил этади.

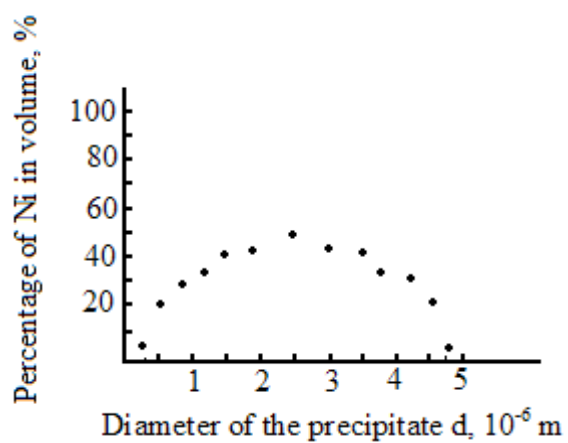
Юқорида айтилганлардан хулоса қилиб айтадиган бўлсак, Ni_mSi_n силицидларида m ва n нинг турли қийматлари мавжуд. Масалан Ni_3Si , Ni_2Si , $NiSi$, $NiSi_2$ ва бошқалар. Шундай қилиб преципитатлар ўлчамлари ва шаклига кура турлича кимёвий таркибга эга бўлиши мумкин.

3-жадвал

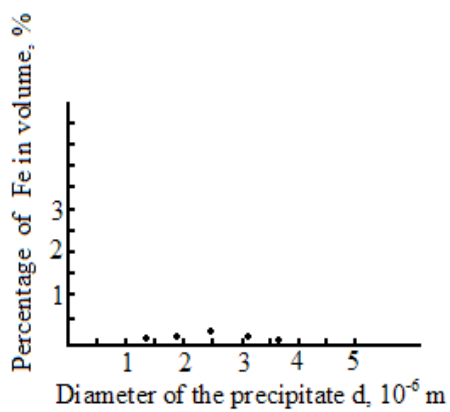
Силицид тури	Кристал панжара структураси	Кристал панжара доимийси 10^{-10} м			Зичлиги $г/см^3$
$NiSi_2$	Кубик	5.406			4.828
$NiSi$	Кубик	4.446			5.92
Ni_2Si	Орторомбик	5.00	3.73	7.04	7.405
Ni_3Si	Кубик	3.5040			7.857
Si	Кубик	5.43072			2.3283



a)



b)



v)

27-расм. Микробирикма ҳажмида асосий ва киришмавий атомлар тақсимот графиклари

b) микробирикма ҳажмида Ni тақсимои; v) микробирикма ҳажмида Fe тақсимои.

3.2. Киришмавий атомлар микробирикмаларнинг кремний электрофизик хусусиятларига таъсири

Кристал панжара нуқсонлари, улар билан ва ўзаро таъсирлашаётган киришмавий атомларнинг яримўтказгич ҳажмидаги кўчиш ходисаларига таъсирини ўрганишдан иборат. Маълумки яримўтказгич кристаллида, кристал панжара даврийлигини бузувчи, нуқсонлар кўчиш ходисаларига катта таъсир ўтказади. Хусусан, заряд ташувчилар ҳаракатчанлиги ва яшаш вақти ўзгаради.

Маълумки, 3d грух элементларидан Ni шу гурухнинг бошқа элементларига қараганда Si да юқори эрувчанликка ($5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) ва диффузия коэффицентига ($10^5 \div 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$) эга. Бироқ, шунга қарамай киритилган атомларнинг жуда оз қисми (0,1%) кристал панжара тугунларида жойлашиб, электр фаол холда бўлади. Киришмавий никель атомларининг асосий қисми (99,9 %), тугунлараро жойлашади ёки кристалдаги бошқа нуқсонлар билан микробирикмалар ҳосил қилади.

Кристал панжарадаги киришмавий атомлар микробирикмалари термодинамик мувозанатий ва номувозанатий ҳолатларда бўлишлари мумкин. Термодинамик мувозанат ҳолатда бўлган микробирикмалар шуниси билан фарқлики, улар атрофида деформация кучланиши бўлмайди ва кристал билан микробирикма чегарасида бўшлиқ ҳосил бўлиши кузатилмайди. Бундай микробирикмалар ўлчамлари 20 — 30 мкм ни ташкил этади ва улар асосан сферик шаклга эга. Термодинамик номувозанатий ҳолатдаги микробирикмалар атрофида кучли деформацияловчи кучланиш майдони юзага келади ва оқибатда микробирикма — асосий кристал чегарасида бўшлиқ кузатилади. Номувозанатий микробирикмаларнинг ўлчамлари 1 — 1,5 мкм дан ошмайди ва сферик шаклга эга.

Ҳар томонлама гидростатик босимнинг n — Si<Ni> намуналари солиштирма қаршилиги ρ га таъсирини ўрганиш натижасида шу нарса маълум бўлдики, компенсирланиш даражасига боғлиқ равишда, $0 \div 6 \cdot 10^8$ Па оралиқдаги босимда ва хона хароратида ($T = 300$ K) ρ/ρ_0 нисбат ортади (ρ_0 - намуналарнинг босим бўлмагандаги солиштирма қаршилиги), ташқи босим олинниши билан намуналарнинг бошланғич хусусиятлари тикланади. Ташқи босим қийматининг ортиши билан, намуналарда қолдиқ эффектлар кузатила бошлайди. Ташқи босимнинг кенгроқ диапазонларида ($P = 0 \div 13 \cdot 10^8$ Па) намуналарнинг солиштирма қаршилиги ортиши ва тўйиниши кузатилади. Бу ҳолларнинг ўзига хослиги шундан иборатки, $P > 6 \cdot 10^8$ Па дан катта қийматларида кечадиган ўзгаришлар қайтмасдир. Ташқи босим олингандан сўнг солиштирма қаршилиқ ρ нинг олдинги қиймати тикланмайди ва бу ўзгариш $10 \div 15$ % ни ташкил этиши мумкин.

Бу каби қолдиқли тензо эффект қуйидагича тушунтирилиши мумкин. Ҳар томонлама гидростатик босим таъсирида никель атомлари сатҳларининг ионланиш энергияси камайиб кетади. Бунинг сабаби киришмавий сатҳларининг, ўтказувчанлик зонаси туби E_c нинг, валент зонаси юқори қисми E_v ва ферми сатҳларининг силжишидир. Силжишлар натижасида ўтказувчанлик зонасидаги электронлар концентрацияси ортади, бу эса солиштирма қаршилиқнинг камайишига олиб келади.

Таркибида никель микробирикмалари бўлган кремний намуналарида, тензо эффектнинг ташқи босимга боғланишини ўрганиш шуни кўрсатдики, бу боғланиш номонотон табиатга эга. Солиштирма қаршилиқ, босим $0 \div 4 \cdot 10^8$ Па оралиғида камаяди. Босимнинг кейинги ортиши ($60 \cdot 10^8$ Па гача) ρ нинг сезиларли ортишига олиб келиши маълум бўлди.

GEOL микроанализатори ёрдамида ўтказилган текширишлар шуни кўрсатдики Ni билан легтрланган Si намуналарида номувозанатий

микробирикмаларнинг хосил бўлиши асосан диффузиядан кейинги совутиш тезлигига боғлиқ эканини кўрсатди. Диффузиядан кейинги совутиш тезлиги

~400 град/сек бўлган n — $\text{Si}<\text{Ni}>$ намуналарида термодинамик номувозанатий ҳолатдаги микробирикмалар микдори секинроқ совутилганларига нисбатан кўпроқ эканлиги аниқланган. Совутиш тезлиги $v < 200$ град/сек бўлган намуналарда номувозанатий микробирикмалар мавжуд бўлиш эҳтимоли жуда кам. Бундан қуйидагича хулоса қилиш мумкин. Совутиш жараёнида термодинамик номувозанатий ҳолатдаги микробирикмалар парчаланиб кетади, совутиш жараёни қанча узоқ давом этса (секин кечса), шунча кўп микробирикма парчаланади.

Бундан ташқари, олдинги бобларда айтиб ўтилганидек, Si даги Ni микробирикмалари турли шаклларга (сферик, игнасимон, дисксимон ва линзасимон) эга бўлиши мумкин. Ташқи босимга энг чидамли микробирикмалар сферик шаклдагиларидир. Дисксимон микробирикмалар нисбатан паст босимларда ҳам парчаланиб кетиши мумкин.

Ташқи босимнинг киришмавий микробирикмаларга таъсирини батафсилроқ ўрганиш мақсадида [Тургунов дис.] турли тезликлар билан совутилган, $\rho = 10^3 \div 10^5$ Ом·см бўлган $n\text{-Si}<\text{Ni}>$ намуналарининг микроанализи ўтказилган. Совутиш тезлиги $v > 200$ град/сек бўлган намуналарда асосан номувозанатий микробирикмалар кузатилган, совутиш тезлигининг $v < 20$ град/сек қийматларида асосан термодинамик мувозанатий ҳолатдаги микробирикмалар хосил бўлиши кузатилган.

Сўнгра намуналар $P = 0 \div 12 \cdot 10^8$ Па, ташқи босим остига қўйилган. Шундан сўнг намуналар қайтадан микроанализатор ёрдамида текширилган. Аниқланишича, ташқи босимнинг бошланғич қийматлари ($P = 4 \cdot 10^8$ Па)да,

$\rho = 10^3$ Ом·см ли $n\text{-Si}<\text{Ni}>$ намуналарининг ρ ларида сезиларли ўзгаришлар

кузатилмаган. Ташқи босимнинг ортиб бориши билан ($P > 10^9$ Па) намуналарнинг солиштирма қаршилиги ортиб боради ва $P = 10^9$ Па да $\rho = 4 \cdot 10^3$ Ом·см гача етади. Намуналар ρ сининг бундай ўзгариши юқори босимларда ($P > 4 \cdot 10^8$ Па) киришмавий атомлар микробирикмалари парчаланади ва улардан ажралган никель атомлари кристал панжара тугунларига жойлашиб, материал компенсация даражасини оширади. Натижада ρ нинг ортиши кузатилади. Бундан ташқари $\rho = f(P)$ боғланишнинг қайтмас табиати ҳам киришмавий атомлар микробирикмаларининг парчаланиши билан тушунтирилади.

Ўтказилган тажрибаларда диффузиядан кейинги совутиш тезлиги $v < 20$ град/сек бўлган намуналарда, ташқи босимнинг $0 \div 6 \cdot 10^8$ Па қийматларида ρ нинг ортиши кузатилмайди. Ташқи босим ортиб бориши билан ρ мунтазам камайиб боради. Бу ҳолда оддий тензоэффект кузатилади яъни кремний тақиқланган соҳасидаги киришмавий сатхларининг силжиши оқибатида, қўшимча электронлар генерацияси юз беради.

Шундай қилиб, ташқи босимларда ρ нинг ортиши асосан термодинамик номувозанатий ҳолатдаги, дисксимон ва игнасимон микробирикмаларнинг парчаланиши ҳисобига амалга ошади. Секин совутилган намуналарда эса бундай ҳодисалар кузатилмайди. Уларда оддий тензоэффект ҳодисаси кузатилади. Келтирилганлардан хулоса қилиб шуни айтиш мумкинки киришмавий атомлар микробирикмалари яримўтказгич материалнинг ташқи таъсирларга (хусусан ташқи босим ва температуравий ишловларга) чидамлилигини оширади ва бир қатор функционал имкониятларини кенгайтиради.

Қисқача хулосалар

Диффузион усул билан киришмалар киритилганда киришма атомларининг асосий қисми (99.9 %) электронейтрал ҳолатда микробирикмалар ва мураккаб комплекслар ҳолатида бўлиши аниқланди. Киришма атомлари преципитатлари турли ўлчамларга ($0,5 \div 6$ мкм) ва шаклларга (линзасимон, дисксимон, игнасимон, сферик в.б.).

Ni нинг Si монокристалларидаги микробирикмалари турли структурага эга, яъни йирик преципитатлар ($3 \div 6$ мкм) бир неча қатлам Ni_mSi_n типдаги силицидлардан иборат, майдалари эса ($0,5 \div 1$ мкм) асосан бир турдаги Ni силицидидан иборат экани маълум бўлди.

Ni атомлари концентрациясининг максимал киймати преципитатнинг (~ 6 мкм) марказида ~ 75 %ни ташкил этади ва унинг сиртига томон камайиб боради ($\sim 25\%$). Майда преципитатлар таркибида ($\sim 0,5 \div 1$ мкм), никель атомлари улуши ~ 30 % ни ташкил этади.

Преципитат ҳажмида асосий киришма атомларидан ташқари технологик киришма атомлари, масалан Fe атомлари мавжудлиги аниқланди. Технологик киришмалар преципитат таркибида асосий киришма атомлари каби қонуният билан жойлашганлиги аниқланди. Преципитат марказида (~ 6 мкм) тамир атомлари улуши $\sim 0,7$ % ни, майдаларида эса $\sim 0,2$ % ни ташкил этади.

Умумий хулосалар

1. Реал кристалларда, панжара даврийлигини бузувчи нуқсонлар мавжуд. Нуқсонлар келиб чиқишига кўра хусусий ёки киришмавий, ўлчамларига кўра эса нуқтавий, чизигий ва ҳажмий бўлиши мумкин.

Кремний таркибида асосий киришма атомларидан ташқари бошқариб бўлмайдиган ёки технологик киришмалар мавжуд. Кислород ва углерод кремнийдаги энг кўп миқдорли технологик киришмадир ва у асосан SiO_2 кўринишидаги майда бирикмалар шаклида боғланган ҳолатда бўлади.

2. Тадқиқотлар натижасида маълум бўлдики, олинис усулига боғлиқ равишда Si даги кислород концентрацияси 10^{16} см^{-3} дан $1,8 \cdot 10^{-18} \text{ см}^{-3}$ гача бўлиши мумкин ва унинг температуравий боғланиши қуйидаги муносабат билан аниқланади

$$N_0 = 1,6 \cdot 10^{21} \exp(-0,94/kT).$$

Аниқланишича кислороднинг кремнийдаги диффузия коэффциенти 1300° C да $D_0 = 3 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2/\text{с}$ ва 450° C да $D_0 = 10^{-9} \text{ см}^2/\text{с}$.

3. Углерод – IV гуруҳ элементи бўлиб, кремний атомига ўхшаш s^2p^2 ташқи электрон қобикқа эга. Шу сабабли углерод атомлари кремний кристали панжарасида асосан тугунларда жойлашади. Углерод атомлари диффузия коэффциентининг температуравий боғланиши қуйидаги тенглама билан аниқланади

$$D = 0,33 \exp(-3/kT).$$

максимал эрувчанлиги $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ни ташкил этади. Углеродли кремний ютилиш спектрида, C – Si комплекси билан боғлиқ 16,6 мкм ли ва C – O комплекси билан боғлиқ 9 мкм ютилиш полосалари кузатилади.

4. Киришма атомлари кремнийда ташқи электрон конфигурацияси, ион радиуси, электроманфийлиги ва бошқа бир қатор электрофизик

параметрларига боғлиқ холда, кристал панжара тугунларида ёки тугунлараро жойлашиши мумкин. Атомларининг сиртки электрон қобиғининг тузилишига қараб донор ёки акцептор сатҳлар ҳосил қилади.

5. Тугунлараро жойлашган атомлар оддий шароитда электр нофаол ҳолатларда бўладилар. Тугунлараро атомлар концентрацияси ортиб кетганда улар киришмавий атом – кристал панжара нуқсони ёки киришмавий атом – технологик киришма типдаги нанокластерлар ёки микробирикмалар ҳосил қилишлари мумкин.

6. Кремнийда марганец чуқур сатҳлари ҳосил бўлиш кинетикаси кузатилган. Маълум бўлишича, кремний тақиқланаган соҳасида иккита чуқур энергетик сатҳ, $E_c - 0,50$ эВ ва $E_v + 0,38$ эВ, ҳосил қилиши кўрсатилган. Кейинги термик ишлов (250°C) да $E_c - 0,50$ эВ ли сатҳ йўқолиб унинг ўрнига бошқа $E_c - 0,39$ эВ ли донор сатҳ ҳосил бўлади. Хона ҳароратида сақланиши натижасида $E_c - 0,39$ эВ ва $E_v + 0,38$ эВ сатҳлар концентрацияси синхрон равишда камайиб боради. Сақланиш муддатининг ортиши билан $E_c - 0,50$ эВ сатҳ қайта тикланади. Юқорида келтирилган энергетик сатҳлар марганецнинг тугунлардаги ва тугунлараро Mn^- , Mn^0 ва $(\text{Mn}^0)_4$ кўринишидаги ҳолатларига тегишли эканлиги аниқланган.

7. Диффузион усул билан киришмалар киритилганда киришма атомларининг асосий қисми (99.9 %) электронейтрал ҳолатда микробирикмалар ва мураккаб комплекслар ҳолатида бўлиши аниқланди. Киришма атомлари преципитатлари турли ўлчамларга ($0,5 \div 6$ мкм) ва шаклларга (линзасимон, дисксимон, игнасимон, сферик в.б.) эга бўлади. Ni нинг Si монокристалларидаги микробирикмалари турли структурага эга, яъни йирик преципитатлар ($3 \div 6$ мкм) бир неча қатлам Ni_mSi_n типдаги силицидлардан иборат, майдалари эса ($0,5 \div 1$ мкм) асосан бир турдаги Ni силицидидан иборат экани маълум бўлди.

8. Преципитат ҳажмида асосий киришма атомларидан ташқари технологик киришма атомлари, масалан Fe атомлари мавжудлиги аниқланди. Технологик киришмалар преципитат таркибида асосий киришма атомлари каби қонуният билан жойлашганлиги аниқланди. Преципитат марказида (~ 6 нм) тамир атомлари улуши $\sim 0,7\%$ ни, майдаларида эса $\sim 0,2\%$ ни ташкил этади.

9. Кремний монокристалларида «тез» диффузияланувчи атомларнинг асосий қисми электронейтрал ҳолатларда – комплекслар, преципитатлар, нано- ва микробирикмалар ҳолатларида мавжуд бўлиши мумкин. Бундай система иссиқлик, юқори босим ва радиациялар таъсирида майдаланиб, қўшимча электроактив заррачалар ҳосил бўлади. Бундай жараёнлар кремний асосидаги электр асбоблар хухусиятларини ташқи кучлар таъсирида бошқариш имконини беради.

Фойдаланилган адабиётлар рўйхати

1. В. И. Болтакс. Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках. Ленинград, «Наука», 1972.
2. В. И. Фистуль, «Физика и химия твердого тела» (икки жилдли), Москва, «Металлургия», 1995 г.
3. Фистуль В. И. Атомы легирующих примесей в полупроводниках. М., Физматлит, 2004, 432 с.
4. Milnes A. G. Deep impurities in semiconductors. Wiley-Interscience, N.Y. (1973). [Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. М., Мир, 1977, 562 с.]
5. Фистуль В. И., Казакова В.М., Бобровников Ю.А., Рябцев А.В., Абдурахманов К. П., Зайнабидинов С. З., Камилов Т. С., Утамурадова Ш. Б. О состоянии примесных ионов марганца в кремнии // ФТП. 1982. Том 16, вып. 5, С. 939-942.
6. Зайнабидинов С.З., автореф. докт. дисс. С. Петербург, Политехнический институт, 1987.
7. Зайнабидинов С. З., Тургунов Н. А., Тураев А. Р. Структура и состав примесных преципитатов никеля в кремнии // Uzbek Journal of Physics. 2000. Vol 2(№2), PP.140-143.
8. Зайнабидинов С. З., Тургунов Н. А. Исследование структуры и состава преципитатов Ni в Si // Известия высших учебных заведений. Сер. Материалы электронной техники. 2001. № 1, С. 19-22.
9. Тешабоев А., Мусаев Э., Яримўтказгичлар ва яримўтказгичли асбоблар технологияси. (ўқув қўлланма), Тошкент, 2005, 392 б.
10. С. Зайнобиддинов. Физические основы образования глубоких уровней в кремнии. Тошкент, «ФАН», - 1984.

11. А.Тешабоев, С.Зайнобидинов, Ш.Эрматов. Қаттиқ жисмлар физикаси., Т.,“Молия”, 2001 й. 324 б.
- 12.S. P. Murarka. Silicides for VLSI applications. Bell Telephone Labaratories, New Jersey, 1983.[Мьюарка Ш. *Силициды для СБИС*. М., Мир, 1986, 176 с.]
- 13.С.З.Зайнабиддинов, Х.С.Далиев. Дефектообразование в кремнии. Тошкент. «Университет», 1993 й.
- 14.С.З.Зайнобиддинов, А.Тешабоев. Яримўтказгичлар физикаси. Тошкент, «Ўқитувчи», 1999 й.
- 15.М. Аз и з о в . Ярим ўтказгичлар физикаси. Тошкент, «Ўқитувчи», 1974 йил.
- 16.А.Тешабоев. Ярим ўтказгичлар физикасига кириш (Кристаллар. Электрон ҳолатлари спектри. Заряд ташувчилар статистикаси). Тошкент, ТошДУ нашриёти, 1985.
- 17.А.Тешабоев. Яримўтказгичлар физикасига кириш. (Яримўтказгичларда кинетик ҳодисалар.) Тошкент, ТошДУ нашриёти, 1986.
18. Ҳ. Акрамов, С.Зайнобиддинов, А.Тешабоев. Яримўтказгичларда фотоэлектрик ҳодисалар. Тошкент, «Ўзбекистон», 1994.
19. Тургунов Н., канд. дисс. Исследование примесных преципитатов никеля и их влияния на электрические свойства монокристаллов кремния. Андижан, 2001 г.
20. journals.ioffe.ru/ftp/1998/06/p712-713.pdf
21. http://ru.dipolestructures.com/wd_docs/56-rus.pdf
22. http://lib.isp.nsc.ru/16/Renew/pgs/Science/pdf/Pchelyakov_R_Si_Ge%20nanostructures.pdf