

O'zbekiston Respublikasi
Oliy va o'rta maxsus ta'lim vazirligi
Andijon davlat universiteti
Fizika-matematika fakulteti

Яримўтказгичлар ва диэлектриклар физикаси фанидан

Маъруза матн

Тузувчи: проф. С. Зайноббидинов

2016

I.I. Яримўтказгичлар

Яримўтказгичлар-модданинг ажойиб тури бўлиб, улар ўзига хос хоссалари билан бошқалардан яққол ажралиб туради. Умуман олганда, электрик ўтказувчанлигига қараб моддалар учта катта синфга: ўтказгичларга (электрик ўтказувчанлиги 10^6 Сим/м дан катта), яримўтказгичларга (электрик ўтказувчанлиги $10^{-8} \div 10^6$ Сим/м оралиғида) ва диэлектрикларга (электрик ўтказувчанлиги 10^{-8} Сим/м дан кичик) бўлинади. Яримўтказгичларнинг электрик ўтказувчанлиги жуда кенг ораликда ётиши юқоридаги маълумотлардан кўриниб турибди.

Шу билан бирга яримўтказгичларнинг ўзига хос муҳим хусусиятларидан бири электрик ўтказувчанлигининг улардаги киришмаларнинг тури ва концентрациясига ниҳоятда сезгирлигидир. Масалан, тоза яримўтказгичга $10^{-7} \div 10^{-10}$ % миқдорда киришма киритиш билан унинг электрик ўтказувчанлигини кескин ўзгартириш мумкин. Шу билан бирга яримўтказгичларнинг яна бир муҳим хусусияти - улар электрик ўтказувчанлигининг температурага ўта сезгирлигидир. Бундай боғланишни куйидагича ифодалаш мумкин:

$$\sigma = B \cdot \exp(-W_a / kT)$$

бу ерда, σ -берилган T -температурадаги электрик ўтказувчанлик, B -ўзгармас доимий, W_a -заряд ташувчиларнинг фаолланиш энергияси, k -Больцман доимийси, T -мутлақ температура. Чунончи, яримўтказгичнинг температураси 1°C га ўзгарганда унинг электрик ўтказувчанлиги 5-6% га ўзгариши мумкин. Жуда кўплаб яримўтказгичларга ва улар асосида ясалган асбобларга ёруғлик, ионловчи нурлар ва шу кабиларнинг таъсирлари ҳам электрик ўтказувчанликнинг кескин ўзгаришига олиб келади. Бунга турли яримўтказгич детекторларни, ёруғлик диодларини, ёруғлик резисторларини ва қатор бошқа асбобларни ҳам мисол қилиб кўрсатиш мумкин. Шуни эслатиб ўтиш жоизки, яримўтказувчанлик хоссаси фақат қаттиқ жисмларгагина хос бўлмай, суяқ ҳолатдаги органик бирикмалардан иборат шишасимон, аморф тузилишга эга бўлган яримўтказгичлар ҳам шундай хоссаларга эгадирлар. Улар ўзларининг бир қатор маълум камчиликлари туфайли ҳозирча техникада кенг татбиқ қилинганича йўқ. Қат-тиқ жисмлардан яримўтказгич хоссасига эга бўлган моддалар қаторига жуда кўп турли моддалар, масалан, кремний, германий, бор, олмос, фосфор, олтингугурт, селен, теллур, кўпчилик табиий минераллар ва қатор бирикмалар: $GaAs$, GaP , $InSb$, SiC , ZnS , $CdTe$, $GaSb$ ва ҳоказолар киради. Бу яримўтказгичлар ўзларининг хилма-хил хоссалари билан бир-бирларидан анча фарқ қиладилар. Шунинг учун ҳам турли мақсадлар учун турли яримўтказгичлар қўлланилади.

Бирок, ҳозирги замон техникасида асосан бир неча хил яримўтказгичлар кенг ишлатилмоқда. Буларнинг ичида энг олдинги ўринларда кремний (*Si*), германий (*Ge*), галлий маргимуши (*GaAs*) туради. Айниқса кремний ҳозирги замон микроэлектроникасида ўзининг кўп хоссалари билан мураккаб технологик талабларга жавоб берганлиги сабабли асосий материал ўрнини эгаллаб турибди.

Электрон техникасида ишлатиладиган кўпчилик яримўтказгич материаллар кристалл тузилшга эга. Яримўтказгичнинг кристалл тузилиши нақадар мукамаллиги, унда турли нуқсонларнинг бор ёки йўқлиги ва уларнинг миқдори яримўтказгичнинг асосий хоссаларини белгилаб берувчи омилдир. Шу боисдан, қисқа бўлса ҳам асосий яримўтказгич моддалар - кремний ва германийнинг кристалл тузилиши ва унинг асосий хусусиятлари ҳақида тўхталиб ўтамиз.

КРЕМНИЙ КРИСТАЛИНИ ТЕКШИРИШНИНГ МЕТАЛЛОГРАФИК УСУЛИ.

Яримўтказгичларнинг кристалл тузилиши

Ҳозирги вақтда эпитаксиал (бир кристаллнинг иккинчи кристалл устида бирор йўналиш бўйича ўсиши) усулда қатлам ўсишини текширишнинг бир неча усуллари мавжуд. Улардан бири металлографик (ёки кимёвий едириш) усулидир. Усулнинг мазмуни кристалл сирти ёки пардага кимёвий едирувчининг таъсирини ўрганишдан иборат. Едирувчи текширилаётган сиртга танловчанлик билан таъсир қилади деб ҳисобланади. Бузилган қисм едирувчининг катта таъсири остида бўлади ва бунинг натижасида барча сиртга хос бўлган едириш кўринишлари олинади. Едирилиш шакллариининг кўринишига қараб материал тузилиши аниқланади.

Металлографик усул билан бевосита шуғулланишдан олдин яримўтказгичларнинг кристалл тузилиши ва едириш механизми билан танишиб чиқиш керак.

К р и с т а л л - бу атомларнинг фазода даврий жойлашишидир; яъни атомлар кристалларда барча йўналишлар бўйича тартибли жойлашган бўлади.

Кристалл панжарали жисмлар қуйидаги хусусиятларга: симметриклик, бир жинслилик ва анизотропликка эга. Симметриклик - кристаллнинг ташқи кўринишда, уларнинг тузилишида, кристалда кечаётган физикавий ҳодисаларда ва уларнинг ташқи муҳит билан таъсирлашишида намоён бўлади.

Бир жинслилик - кристаллнинг иккита бир хил кўринишда йўналтирилган қисмида бир хил хусусиятга эга бўлишда намоён бўлади.

Анизотроплик - кристалл ичидаги ҳар қандай нуқталарда, параллел ва симметрик йўналишларда вектор хусусиятларнинг бир хил бўлишидир. Шунинг учун кристалл материаллардан фойдаланишнинг турли ҳолларида сиртнинг кристаллографик йўналиши кўрсатилади. Кетма-кет сиртларни беришда Миллер индексларидан (111), (100), (110) фойдаланилади.

Олмоссимон тузилишли кристалларда (111) текислик бирлик юзага энг кўп жойлашган атомлар зичлигига эга бўлади ва атомлар тўпламининг энг зич текислиги дейилади. Жумладан, кристалларни кимёвий едиришда ҳам жараённинг тарқалиши кристаллографик йўналишлар бўйича турлича бўлади.

Кристаллни эритмага туширилганда, унинг сиртининг бузилиши барча нуқталарда бир вақтда бошланади. Едириш кучсиз едирувчида узоқ вақт давом этса, кристалл четларида едирилиш шакллари деган ном олган турли

кўринишдаги тўғри шакллар пайдо бўлади ва улар турли кристаллографик текисликларда турлича бўлади.

Элементар ячейкаси куб шаклида бўлган Si кристалли учун кристаллографик текисликлар (111), (100), (110) да едирилишдан ҳосил бўлган шаклларнинг кўриниши 1-расмда кўрсатилган.

Турли кристаллографик текисликлар бўйича ҳар хил тезликлар билан борадиган едириш жараёнлари учун фойдаланиладиган едирувчи эритмалар танланма едирувчилар дейилади. Уларнинг таркибини танлаш бўйича ягона илмий тушунтирилган мезон йўқ ва у эмпирик хусусиятга эга.

1-жадвалда кремний (Si) учун баъзи танланма едирувчилар таркиби келтирилган. Едириш ҳолати мўлжал йўналишининг аниқлигига кучли таъсир кўрсатади. 2-жадвалда Si қуймаларини кристаллографик ўрганиш учун фойдаланиладиган едирувчи эритмалар таркиби келтирилган.

Едириш шакллариининг ўлчамларига қараб кристалл йўналиши, у ёки бу симметрия атомларининг мавжудлиги, шунингдек, унинг монокрис-таллиги ҳақида мулоҳаза қилса бўлади. Si га ишлов берилганда кислотали эритмалар таркибидаги баъзи бир нодир металллар кристалл сиртларига микрокристалл кўринишда ўтириб қолиш хусусиятига эга. Бундай едирувчиларни декорирланган (бўёвчи) дейилади. Ўтириб қолган атомлардан тозаланиш кўшимча мураккаб едирувчилар ёрдамида амалга оширилади.

Барча табиий ва сунъий монокристаллар, яъни реал кристаллар идеал кристаллардан даврийлигининг қаердадир бузилиши билан, яъни нуқсонлари мавжудлиги билан фарқ қилади.

Кристалларда мавжуд нуқсонлар ўлчамларига қараб қуйидаги турларга бўлинадилар:

1. Нуқтавий нуқсонлар.
2. Чизигий нуқсонлар.
3. Сиртий нуқсонлар.
4. Тузилиш нуқсонлари.

Тебраниш натижасида атомларнинг мувозанатдан чиқиши ва кристалл панжаранинг даврийлигининг бузилиши нуқсоннинг ҳосил бўлиши дейилади. Кристаллга кириб қолган ёт атомлар кристалл панжара тугунларида (ўринбосар киришмалар) ёки тугунлар оралиғида жойлашади. Асосий атом ўрнига ёт атом келиб ўтирса, уни ўринбосар киришма дейилади. Тугунлар орасида жойлашганларини суқулма киришма дейилади.

Нуқтавий нуқсонлар, бу - вакансиялардир. Кристалл панжарасининг бўш тугунлари - вакансиялар дейилади. Вакансиялар ҳосил бўлишининг икки механизми мавжуд:

1. Френкель бўйича
2. Шоттки бўйича.

Френкель бўйича вакансиялар ҳосил бўлишида тугундан кетган атом тугунлар орасида жойлашади. Бундай вакансиялар етарлича кенг тугунлар оралиғига эга бўлган (масалан, ишқорий металлларда) кристалларда пайдо бўлиши мумкин.

1-Жадвал.

Едирувчининг таркиби	Едирувчининг ҳолати	Пластинанинг йўналиши
КРЕМНИЙ		
Дэш едирувчиси (концентрланган ишқорлар) $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{CH}_3\text{COOH}$ 3:1:10	293 К, 4...16 соат	(111), (110), (100)
Сиртл - Адлер едирувчиси 33%ли $\text{CrO}_3:\text{HF}$ 1:(1...2) 10%ли $\text{CrO}_3:\text{HF}$ 1:2	Камида 15 минут 5...10 мин	(111), (110) (100)
Секко едирувчиси 4,4%ли $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7:\text{HF}$ 1:2	298...303 К 5...20 мин	(111), (110) (100)

2-Жадвал.

Материал	Йўналиш текислиги	ТАРКИБ		Едирилиш вақти, минут	Температура °C
		Ташкил этувчилар концен-трацияси	Ҳажмий қисми		
Si	(100)	50% ли	NaOH	12	65
	(110)	эритма	NaOH	12	65
	(111)	50% ли	KOH	3,5	қайнаш
		эритма 50% ли эритма			

Яримўтказгичларда, хусусан кремнийда, Шоттки бўйича вакансияларнинг ҳосил бўлиш эҳтимоли кўпроқдир. Бунда панжарадаги ўз тугунларидан кетган атомлар қандайдир нуқсонлар марказларига боради.

Нуқсонлар марказлари ролини кристаллдаги дислокациялар, кристалларнинг сирти ва бошқа тур чизиғий ва ҳажмий нуқсонлар ўйнаши мумкин.

Чизиғий нуқсонлар, бу - дислокациялардир. Улар кристаллда бирор чизик бўйлаб, унинг мунтазам тузилишининг бузилишидир. Дислокациялар кристаллни ўстириш жараёнида ҳосил бўлади. Ўстириш жараёнида механикавий кучланиш юзага келади, натижада дислокация вужудга келади.

Биз танишадиган ёки бошқача айтганда, тадқиқланадиган кремний кристали муайян шароит учун чекли ўлчамга эга бўлади. Бунинг учун биз кристаллни маълум бир мақсад ва вазифа талабларидан келиб чиққан ҳолда бўлакларга механик усуллар ёрдамида кесамиз. Натижада кремнийда сиртий нуқсонлар пайдо бўлади. Кристалл кесилгандан сўнг сиртдаги атомларнинг айримлари ионлашган, айримлари нейтрал ҳолатда бўлади. Бизга яхши маълум, ҳар қандай ионлашган атом ушбу ҳолда узоқ туролмайди, яъни $10^{-3} \div 10^{-4}$ сек. вақт ўтгач атрофдаги атмосфера – муҳит билан ўзаро таъсирлашиб, сиртда маълум ўлчамли қатлам ҳосил бўлади ва у электр жиҳатдан бетарафлашади.

Тузилиш нуқсонларига: асосий атомларнинг киришмавий атом билан алмашиши, панжара тугунларида атомларнинг бўлмаслиги (вакансиялар); киришмавий атомларнинг тугунларда ва тугунлараро жойлашиб қолиши; шунингдек дислокациялар киради. Дислокациялар кристалларни ўстириш жараёнларида, пластик деформация, юқори температуралар градиентлари таъсирида ва шу каби ҳолларда вужудга келади. Улар чизиғий ва чегаравий дислокацияларга ажратилади.

Амалиётда кристаллардаги дислокацияларни тадқиқ этишда рентгенографик, металлографик ва декорираш усулларидадан фойдаланилади. Уларнинг ичида энг қулайи металлографик усулдир.

ЯРИМЎТКАЗГИЧ МАТЕРИАЛ КРЕМНИЙГА КИМЁВИЙ ИШЛОВ БЕРИШ

Яримўтказгич асбоблар ишлаб чиқаришда кимёвий жараёнлар-дан технологик босқичларнинг ҳамма қисмларида фойдаланилади. Кимёвий ва электркимёвий ишлов бериш жараёнларини тўрт босқичда кўриш мумкин:

1. Сиртни тозалаш ва турғунлаштириш.
2. Сиртга сайқал бериш.
3. Яримўтказгич материал ёки *p-n* ўтишнинг сифатини текшириш.
4. Яримўтказгич сиртини турғунлаштирувчи, ҳимоя қилувчи ва у билан туташувчи модда билан қоплаш.

Кўпгина кимёвий жараёнларда яримўтказгич сиртини тозалаш билан боғлиқ унинг ички бошқа нуқсонларини аниқлашда, материал сиртидаги қатламни олиб ташлашда кимёвий едириш жараёнининг ҳиссаси катта. Сиртдаги моддалар билан таъсирлашиш табиатига кўра кимёвий едириш бир қанча босқичлардан ташкил топган эриш таъсирлашувидан иборатдир:

1. Едирувчи ионларни эритма ҳажмидан яримўтказгич сиртига чиқарилади.

2. Яримўтказгич сиртида едирувчи молекулаларнинг сўрилиши юз беради.

3. Яримўтказгич сирти ва едирувчи билан сўрилган молекулаларнинг ўзаро таъсири.

4. Яримўтказгич сирти билан таъсирлашув маҳсулотининг десорбцияси.

5. Эритма ҳажмидаги таъсирлашув маҳсулотларини яримўтказгич сиртидан олиб ташлаш.

Едириш натижасида сирт силлиқ бўлиши керак. Кимёвий едириш усуллари 5 хил бўлади:

1. **Изотроп едириш** - монокристалнинг ҳамма йўналишлари бўйича бир хил едириш тезлиги билан яримўтказгичнинг эриш сиртидаги бузилган қатламни олиб ташлаш ва сиртга сайқал беришдан иборат.

2. **Анизотроп едириш** - монокристалнинг турли ҳар хил йўналишларида турлича тезлик билан яримўтказгичнинг эриши; ҳажмий ва сиртий тузилишли нуксонларни металлографик ва оптик текшириш учун қўлланилади.

3. **Танланма едириш** - сиртнинг ҳар хил соҳасида турлича тезлик билан, шунингдек тагликнинг кристаллографик йўналишида (ёки танлаб олинган едирувчиларда қатламларни ҳар хил кимёвий таркибда турлича едириш тезлиги билан) яримўтказгичларнинг эриши; таглик кристалл тузилишларининг мос тушмаслиги (дислокациялар, жойлашган нуксонлар, доначалар чегараси ва бошқалар)ни ва нуксонларни кўрсатиб беради.

4. **Локал едириш** - тагликнинг фақат берилган ва қатъий белгиланган соҳасидан материални олиб ташлаш; таглик сиртида берилган рельефда ва аниқ шаклда кристалл олишни таъминлайди; керакли тузилиш расмини чизишга ёрдам беради. Бундай кимёвий едирувчилар учун изотроп ва анизотроп едирувчилардан фойдаланилади.

5. **Қатламли едириш** - ион имплантациясидан сўнг яримўтказгич сиртида бир хил кетма-кетликдаги юпка қатламлар олинади, яримўтказгичга легирланган киришмалар диффузияси ўрганилади; эпитаксиал қатламлар ва тагликнинг кристалл тузилиши ҳажмий ва сиртий нуксонларни ўрганиш учун қўлланилади. Бу усулда 0,1 мкм/мин дан кичик едириш тезлигига эга сайқал берувчи едиргич-лардан фойдаланилади.

Едириш тезлигини диффузиявий текшириб туриш имконига эга бўлган едирувчилар сайқал берувчи деб аталади, жараённинг ўзи эса интегралли деб аталади. Едирувчининг глицерин, полиспирт қўшимчаларини қўшиш ҳисобига ёпишқоқлиги ортиши билан унинг сайқаллаш хусусияти яхшиланади.

Яримўтказгичларни едириш механизми материалнинг турига, едирувчининг таркибига боғлиқ ҳолда иккита: электрик ва кимёвий механизмларга ажратилади. Едириш жараёни кимёвий кинетика қонунларига

бўйсунди. Яримўтказгич сиртидаги зарядли ҳолатлар бунда ҳеч қандай роль ўйнамайди.

ЯРИМЎТКАЗГИЧ МАТЕРИАЛЛАРДА ОМИК КОНТАКТНИ ҲОСИЛ ҚИЛИШ. ОМИК КОНТАКТ ҲАҚИДА АСОСИЙ ТУШУНЧАЛАР

Омик контакт деганда ноасосий заряд ташувчиларнинг инжекцияси содир бўлмайдиган, чизиғий вольт-ампер тавсифномага эга яримўтказгич ва металл контакти тушунилади. Ҳар бир яримўтказгич асбоб ёки интеграл микротузилма уларнинг ташкил этувчилари ва ташқи занжир орасидаги боғланишни амалга ошириш учун омик контакт билан таъминланади.

Планар асбобларда диэлектрик қатлам сиртига ёйилган одатдаги контактлар тайёрланади (1-расм). Ёйилган контактларнинг қўлланиши фаол соҳалар ўлчамини етарлича камайтиришга имкон беради ва ташқи муҳит таъсирини камайтиради.

Яримўтказгич билан металлнинг зич контактида ҳосил бўлган электрик тўсиқ металл ва яримўтказгичдан электронларнинг чиқиш ишлари фарқлари φ_m ва $\varphi_{я.у.}$ билан аниқланади.

Шоттки моделига асосан агар $\varphi_m < \varphi_{я.у.}$ (n -тур яримўтказгич учун) ва $\varphi_m > \varphi_{я.у.}$ (p -тур яримўтказгич учун) шартлари бажарилса металл-яримўтказгич туташуви омик туташув бўлади.

Металл ва яримўтказгичнинг сирт олди соҳаси орасида φ_δ потенциал тўсиқ мавжуд (2-расм) эканлиги энергетик диаграммадан кўриниб турибди. Яримўтказгичларнинг бу соҳаси кўп легирланган тўсиқ яқинидаги камбағаллашган юпка қатлам бўлиб, тўсиқ шаффофдир ва контакт орқали ток ўтказиш учун жуда кичик кучланиш тушуви етарли (туннеланиш ҳодисаси). Бу ҳолда контакт қаршилиги камаяди ва унинг инжекция хусусияти заифлашади (яримўтказгичлар контакт олди соҳаси легирланганлигининг юқори даражаси ноасосий заряд ташувчилар яшаш вақтини камайтиради, бу эса инжекция таъсирини заифлаштиради). Контакт орқали ўтаётган I_n токнинг катта қисми электронлар ҳаракатидан, инжекциявий ташкил этувчи I_p эса коваклар ҳаракатидан юзага келади, токнинг бу ташкил этувчиларининг ўзаро муносабати қуйидаги кўринишда ифодаланади:

$$I_p / I_n \approx e^{(\varphi - \varphi_\delta) / kT}$$

бу ерда: φ_δ - потенциал тўсиқ; φ - контакт потенциаллар айирмаси; k - Больцман доимийси; T - ҳона температураси.

Контакт сифатини яхшилаш учун потенциал тўсиқни камайтириш зарур эканлиги ушбу келтирилган муносабатдан келиб чиқмоқда. Контактларни ҳосил қилинишига қараб улар турлича электрик ва механик хусусиятларга эгадир. Контактларга қуйидаги талаблар қўйилади:

1. Контакт тўғрилаш хусусиятига ёки унинг қаршилиги электрик ток йўналишига боғлиқ бўлмаслиги керак.

2. Чизигий вольт-ампер тавсифномага эга бўлиши керак.

3. Юқори иссиқлик ўтказувчанликка эга бўлиши керак.

4. Яримўтказгич материалга ва оксидга яхши адгезияланишига ҳамда ноасосий заряд ташувчиларнинг инъекция қилмаслигига эришиш керак.

5. Контакт материалынинг температура бўйича чизигий кенгайиш коэффициентининг яримўтказгич материалыникига яқин бўлишига эришиши керак.

6. Контакт материалынинг атомлари яримўтказгич материалга чуқур кирмаслигига эришиш керак.

Ушбу талаблардан бирортаси бажарилмаса ҳам асбобнинг тавсифномаси ёмонлашади. Агар омик контакт чизигий вольт-ампер тавсифномага эга бўлмаса, у ҳолда асбобнинг вольт-ампер тавсифномаси ҳам бузилади. Кўрсатилган талабларнинг ҳаммасини қондириш амалий жиҳатдан иложи йўқ қайд қилиш жоиздир.

Амалда омик контактдаги қаршиликнинг катталиги ҳажмий заряд атрофида потенциал тўсиқ ва у билан боғлиқ ёпувчи қатламнинг ҳосил бўлиши билан боғлиқдир. Контакт қаршилигини ва инъекцияни камайтиришнинг анча самарали ва тез-тез қўлланиладиган усулларида бири контактдаги солиштира қаршиликнинг яримўтказгичнинг асосий ҳажмидаги солиштира қаршилигидан кўп марта кичик бўлган яримўтказгич соҳасини ҳосил қилишдир. Омик контактни *p-n* ўтишдан мумкин бўлган энг катта масофага узоқлаштириш омик контактда юз берувчи инъекцияни камайтиради.

ЯРИМЎТКАЗГИЧ КРЕМНИЙГА ТЕРМИК ИШЛОВ БЕРИШ

Кремнийга иссиқлик таъсир эттирилганида қандай ўзгаришлар юз беришини аниқлаш лозим, чунки жуда қисқа вақт ичида ва жуда сезиларсиз иссиқликнинг таъсир этиши ҳам кремнийнинг электрофизик хусусиятларини ўзгартириб юбориши мумкин. Кремнийнинг электрофизик хусусиятлари иссиқлик таъсир эттирилганда унинг тақиқланган соҳасида термомарказларнинг ҳосил бўлиши сабабли ўзгаради. Бундай марказларнинг асоси ва манбаи кремнийнинг сирти ҳамда кристалнинг ҳажми бўлиши мумкин.

Кремний сиртига иссиқлик таъсир этганида кимёвий элементлар киришмаларининг диффузияланиш даражаси ортади ва натижада киришмалар кристалл ҳажми томон ҳаракатланиб, унинг электрофизик кўрсаткичларини ўзгартириб юборади.

Шундай ўзгаришлар юзага келган қатлам кейинги термик ишлов беришларда дислокациялар марказига айланиб қолади: бўш ўринлар - вакансиялар, нуқсонлар ёки уларнинг комплекслари ҳосил бўлиши мумкин. Термик ишловнинг таъсири кремнийнинг сиртига ҳам, ички ҳажмига ҳам мўлжалланган бўлади. Бу икки термик ишлов таъсирлар натижаси бир-

биридан температуранинг таъсир этиш вақти, даражаси, таъсир ва совитиш тезлиги билан фарқ қилади. Тез совитилишда (тоблашда) термик ишлов вақтида ҳосил бўлган иссиқлик марказлари сақланиб қолади. Бу марказларни “тобланган” деб аталади. Термик ишлов бериш температурасидан паст температураларда қиздириш иссиқлик марказларини сезиларли камайишига олиб келади. Бу ҳодиса термик ишлов бериш температурасида қиздириб, сўнгра секин совитиш натижасида ҳам юз бериш мумкин.

Агар жисмдаги бошланғич ҳолатда мавжуд бўлган тенг сонли заряд ташувчилар концентрациясидан киритилган иссиқлик марказларининг концентрацияси катта ёки уларга тенг бўлса, у ҳолда бу марказлар заряд ташувчилар концентрациясига кучли таъсир кўрсатади.

Асосий ҳиссани концентрацияси катта бўлган марказлар қўшади. Паст температурали термик ишловда ($200-300^{\circ}\text{C}$) заряд ташувчилар концентрациясининг ўзгариши кремний ҳажмида электр жиҳатдан фаол «кремний-кислород» комплексларини ҳосил қилади, улар кремнийнинг тақиқланган соҳасида *Au*, *Fe*, *Cr* киришмаларининг кремний ҳажмида бир неча саёз ва чуқур, ҳар хил табиатли, донор ва акцептор марказларининг ҳосил бўлишига олиб келади.

Киритилган иссиқлик марказларини, агар улар *Fe* атомлари билан боғлиқ бўлса, $100-200^{\circ}\text{C}$ температуралар оралиғида, агар *Cr* атомлари билан боғлиқ бўлса, 800°C да қиздириш натижасида камайитириш мумкин, яъни қиздириш ёрдамида киришмаларни электр жиҳатидан фаол ҳолатдан нофаол ҳолатга ўтказиш амалга оширилади. Кремний ҳажмида ҳосил бўлган иссиқлик марказлари саёз ва чуқур донор, акцептор сатҳларини ҳосил қилади. Текширилаётган марказларнинг тури ва кўрсаткичлари термик ишлов бергандан сўнгги тоблаш тезлигига боғлиқ.

Агар совитиш тезлиги 10^4 $^{\circ}\text{C}/\text{сек.}$ бўлса, у ҳолда тобланган донор сатҳлар кузатилади. Киритилган иссиқлик марказларининг концентрацияси киришмаларнинг концентрацияси ортиши билан ортиб боради. Шунинг билан бирга, улар хона температурасида турғун эмасдир.

Секин тоблаш давомида (10^2 $^{\circ}\text{C}/\text{сек.}$) турғун бўлмаган марказлар парчаланади ва бошқа донор марказлар ҳосил бўлади.

Бу марказларнинг концентрацияси термик ишлов температураси ортиши билан экспоненциал ортиб боради ва у жисмнинг бошланғич ҳолатидаги акцептор киришмасининг концентрациясига боғлиқ эмас (1-расм). Улар хона температурасида турғун ва 400°C дан юқори температураларда қиздирилганда ўзгаради. Бошланғич концентрацияси ҳар хил: *n*- ва *p*- тур кремнийлардан фойдаланиб, термик ишловдан сўнг (совитиш тезлиги 10^4 $^{\circ}\text{C}/\text{сек.}$) махсус йўл билан қиздирсак, тобланган сатҳ: саёз донор сатҳ ва қўшма марказлар спектрларини кўриш мумкин.

Киритилган марказларнинг тури ва концентрацияси бошланғич кремнийдаги донор ва акцепторлар концентрацияларига боғлиқ эмас. Саёз сатҳларнинг концентрацияси термик ишлов температурасига боғлиқ ҳолда мураккаб хусусиятга эга ва 1100°C температурада энг юқори концентрацияга эришади. Чуқур қўшма марказлар учун концентрациянинг температурага

боғлиқлиги маълум эмас. Саёз марказ хона температурасидаёқ нотурғундир, чуқур марказларнинг концентрацияси эса 600°C дан юқори температурада қиздириш натижасида камаяди. Тобланиш марказлари тақиқланган соҳанинг $E_c = (0,38 \div 0,48)$ эВ ва $E_v = (0,37 \div 0,45)$ эВ оралиғида жойлашгандир.

Киририлган марказларнинг концентрацияси кремнийдаги легирловчи киришма ҳосил қилувчи бошланғич саёз сатҳнинг концентрациясига боғлиқ. 300°C да қисқа вақт қиздириш марказлар концентрациясини бир неча ўн марта камайишига олиб келади. Саёз сатҳли термик марказлар ички нуқсонларнинг ёки дивакансияларнинг (қўшвакансияларнинг) ҳосил бўлиши билан боғлиқдир.

Термик ишлов натижасида кремнийдаги заряд ташувчиларнинг яшаш вақтининг ўзгариши тақиқланган соҳада рекомбинация марказлари бўлган донор ва акцептор сатҳлар спектрларининг ҳосил бўлишига олиб келади. Бу сатҳлар асосий ва ноасосий заряд ташувчиларнинг тутилув кесими юзасининг асимметриклиги сабабли юзага келади. Ушбу марказларнинг киритилиши ноасосий заряд ташувчиларнинг яшаш вақти τ_n ни камайитиришга қаратилган. Бундан ташқари, концентрацияга боғлиқ ҳолда рекомбинация марказлари, тутилув кесими юзалари нисбати ёки асосий ва ноасосий заряд ташувчилар, тенг сонли ва тенг сонли бўлмаган заряд ташувчилар концентрацияси, асосий заряд ташувчиларнинг яшаш вақти камайиши мумкин, баъзи ҳолларда эса бошланғич қийматдан ортиб кетиши ($\tau_0 > \tau_n$) мумкин. Паст температурали термик ишлов бериш натижасида ($400 \div 800^{\circ}\text{C}$) яшаш вақтининг ўзгариши ноасосий заряд ташувчиларнинг яшаш вақтининг камайишига олиб келади, термик ишловнинг температураси қанчалик юқори бўлса, яшаш вақти шунча камаяди. Ушбу ҳолат тобланган марказлар концентрациясининг ортиши билан боғлиқдир.

Ноасосий заряд ташувчиларнинг яшаш вақтининг камайиши тоблаш температураси ва тезлигига кучли боғлиқ. Юқори температурали термик ишловда яшаш вақтининг ўзгариши ($800 \div 1250^{\circ}\text{C}$) киришманинг сиртдан ҳажмга диффузияси билан боғлиқдир. Совитиш тезлиги юқори бўлмаганида ноасосий заряд ташувчиларнинг яшаш вақтининг камайиши энг катта қийматга эришади. Секин совитиш айрим киришмавий атомларнинг қайта тақсимланишига олиб келади. Бу эса рекомбинация марказлари концентрациясининг ўзгаришига олиб келади.

Ноасосий заряд ташувчиларнинг яшаш вақтини ошириш, яъни термик ишловнинг таъсирини камайитириш ўртача температурада узок вақт қиздириш орқали эришилади.

Термик тобланишда ҳосил бўлган нуқсонлар (ТНН) ни ўрганиш кремнийнинг ($\rho \sim 0,35$ дан 10^3 Ом см. ва ундаги кислород концентрацияси $10^{16} \div 10^{18}$ см $^{-3}$) бошланғич кўрсаткичлари билан боғлангандир, бунда ТНН жисмнинг бошланғич солиштира қаршилигини оширади, яъни заряд ташувчилар концентрациясини камайтиради, ўтказувчанлик турини эса ўзгартирмайди ва тақиқланган соҳага чуқур донор сатҳ $E_n = 0,40$ эВ ни киритади. Қайси кремнийда бошланғич киришма концентрацияси катта

бўлса, ўша кремнийда $N_{\text{тн}}$ катта бўлади. Масалан, ТТН мавжуд бўлган кремнийни хона температурасига яқин температурада қиздирилади.

Бунда кремнийда кислород концентрацияси қанчалик кам ва тоблаш тезлиги катта бўлса, ТТН нинг иссиқликка чидамлилиги шунча кам бўлади. Юқори температурага кўтариш ($500\div 1400^{\circ}\text{C}$) ва катта тезликда совиш ($v_3\approx 10^4$ $^{\circ}\text{C}/\text{сек.}$) кремнийда р-п конверсиясининг кузатилишига имкон беради.

Юқори солиштирма қаршиликли кремний намунасининг конверсияси ($\rho_0\sim 10^3\div 10^4$ Ом·см.) $700\div 1400^{\circ}\text{C}$ ораликда, агар паст солиштирма қаршиликли ($10\leq\rho_0\leq 200$ Ом·см.) бўлса, 850°C яқинида юз беради.

Конверсия юз берган кремнийда термик нуқсонларни икки босқичда қиздириб камайтирилади: паст температурали ($50\div 100^{\circ}\text{C}$) ва юқори температурали ($400\div 500^{\circ}\text{C}$). Қиздиришнинг фаолланиш энергияси 1-босқичда 0,75 эВ га ва 2-босқичда 1,19 эВ га тенг.