

539/07)

**ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ ОЛИЙ ВА ЎРТА
МАХСУС ТАЪЛИМ ВАЗИРЛИГИ**

А. ТЕШАБОВЕВ, С. ЗАЙНОВИДИНОВ, Э. А. МУСАЕВ

**ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ВА
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛИ АСБОБЛАР
ТЕХНОЛОГИЯСИ**

*Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлиги
олий ўқув юртлари талабалари учун ўқув қўлланма сифатида
тавсия этган*

2024085-

Тошкент — 2005

539 (075)

Т-45

Тешабоев А., Зайнобидинов С., Мусаев Э.А. Яримўтказгичлар ва ярим-ўтказгичли асбоблар технологияси: (Ўқув қўлланма). Т.: «ЎАЖБНТ» Маркази, 2005, 392 б.

Ўқув қўлланмада яримўтказгичлар ҳақида умумий маълумотлар, ярим-ўтказгичли моддалар олиш ва яримўтказгичли асбоблар тайёрлаш технологиялари баён қилинган. Бундан ташқари, мавзуларни чуқурроқ ўзлаштиришга ёрдам берувчи расмлар, жадваллар илова қилинган.

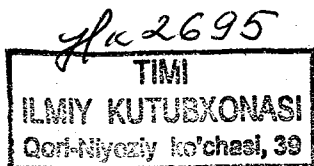
Қўлланма университетларнинг «Яримўтказгичлар ва диэлектриклар физикаси» ва техника олий ўқув юртларининг «Яримўтказгичли асбоблар» ва «Микроэлектроника» йўналишлари бўйича таълим олаётган бакалавр ва магистрлари учун мўлжалланган. Ундан аспирантлар ва илмий-техник ходимлар ҳам фойдаланишлари мумкин.

В учебном пособии изложены общие сведения о полупроводниках, технологии получения полупроводниковых материалов и изготовления полупроводниковых приборов. В приложении приведены рисунки, таблицы и необходимые справочные сведения, позволяющие более глубоко воспринимать изложенный материал.

Пособие предназначено для бакалавров и магистров, обучающихся по специальности «Физика полупроводников и диэлектриков» университетов и «Полупроводниковые приборы» и «Микроэлектроника» технических вузов. Может быть использовано аспирантами и научно-техническими работниками соответствующих специальностей.

General features of semi-conductor and the technology of obtaining semi-conductor materials the producing semi-conductor instruments are described in this text book. Pictures, tables and necessary inquiry information which permit to apprehend deeply the above mentioned materials. This text book is for bachelors and magisters, who are studying on specialty «Semi-conductor instruments» and «Microelectronics» at the technical institutes.

It can also be used by reserch workers and scientific and technical personals of corresponding specialties.



© «ЎАЖБНТ» Маркази, 2005

МУҚАДДИМА

Яримўтказгичлар физикаси ва яримўтказгичлар электроникаси ҳозирги замон кишилиқ жамияти ҳаётининг деярли ҳамма асосий соҳаларига кириб келган, фақат угина бажариши мумкин бўлган хилма-хил мураккаб илмий-техник вазифаларни адо этмоқда. Бу фан ва техника соҳаси бўйича ишлаётган илмий, муҳандис-техник ходимлар, ма-лакали ишчилар анча кўп. Ушбу йўналишда турли олий ўқув юртларида жуда кўп ёш мутахассислар тайёрланмоқда. Уларнинг аксарият кўпчилигини ўзбек тилида таълим олаётган ёшлар ташкил қилади. Шунинг учун олиб, кейинги йилларда яримўтказгичлар физикаси, яримўтказгичли асбоблар физикаси, яримўтказгичлар параметрларини ўлчаш усуллари ва бошқа ўқув фанлари бўйича ўзбек тилида ўқув қўлланмалари нашр қилинди, бу эса, шубҳасиз, мазкур фанларни ўзлаштиришда талабаларга катта ёрдам кўрсатганлигини айтиб ўтилган қўлланмаларнинг танловларда тақдирланиши ҳам тасдиқлаб турибди.

Биз, муаллифлар, яратилган ўқув адабиётлари тўплами яна бир ўқув қўлланма — “Яримўтказгичлар ва яримўтказгичли асбоблар технологияси” китоби билан тўлдирилса, мақсадга мувофиқ бўлар, деган ният билан ушбу қўлланмани ёздик.

Яримўтказгичларнинг ажойиб хоссалари намоён бўладиган сифатли моддалар олиш технологияси ҳозирги замон саноати тизимида катта ва муҳим ўрин тутади. Яримўтказгичлар ва улар билан бирга ишлатиладиган бошқа моддалар етарли даражада тоза бўлиши зарур. Бу мақсадда бир неча босқичли тоза моддалар саноати барпо қилинган, тузилиши мукамал бўлган кристаллар ўстириш усуллари ишлаб чиқилган. Шундай тоза, мукамал моддалар асосида турли хизматларни бажарадиган электрон асбоблар, қурилмалар, микросхемалар тайёрланади ва улар амалда жуда кенг миқёсда қўлланилади.

Юқорида айтилганлардан кўриниб турибдики, яримўтказгич моддалар хоссаларини тадқиқ этувчилар, улардан асбоблар тайёрлайдиган ва ишлатадиган мутахассислар қатъий талабларни қаноатлантирадиган яримўтказгич моддалар ва асбоблар ишлаб чиқариш технологияси асосларини билишлари керак.

Ўқув қўлланма уч қисмдан (яримўтказгичлар ҳақида умумий маълумот, яримўтказгичли моддалар олиш технологияси, яримўтказгичли асбоблар тайёрлаш технологияси) иборат бўлиб, бу жабҳаларнинг асосий тушунчалари, физик, кимёвий, физик-кимёвий жараёнлари, уларнинг қонуниятлари баён қилинган, кенг қўлланиладиган асосий технологик усулларнинг мундарижаси, уларнинг афзаллик ва камчиликлари етарлича батафсил таҳлил қилинган. Ҳар бир боб охирида назорат учун керакли саволлар келтирилган.

Ўқув қўлланма охирида ўқувчига тавсия қилинадиган адабиётлар рўйхати, моддаларнинг керакли физик ва кимёвий хоссаларини мужассамлантирган жадваллар жойланган.

Ушбу қўлланма яримўтказгичлар ва диэлектриклар физикаси бўйича бакалавриатура ва магистратурада таълим олаётган талабаларга мўлжалланган, аммо ўйлаймизки, малака оширишда ундан аспирантлар, илмий ходимлар, ёш ўқитувчилар ҳам фойдаланиши мумкин.

Қўлланманинг 1-7-бобларини проф. А. Тешабоев, 8-14-бобларини проф. С. Зайнобидинов, 15-21-бобларини доц. Э.А. Мусаев ёзган.

Муаллифлар ушбу қўлланмани тайёрлашда катта ёрдам берган Ш.Э. Мусаевга ўз миннатдорчиликларини билдирадилар.

Ўқув қўлланма камчиликлардан холи эмас. Ўз мулоҳазаларини билдирган мутахассисларга олдиндан ташаккур билдирамиз.

БИРИНЧИ ҚИСМ

ЯРИМУЎТКАЗГИЧЛАР ҲАҚИДА УМУМИЙ МАЪЛУМОТ

1-БОБ. ҚАТТИҚ ЖИСМЛАР ФИЗИКАСИНИНГ АСОСИЙ ТУШУНЧАЛАРИ

1.1. КИРИШ

Қаттиқ жисмларнинг жамият фаолиятида тутган ўрни ҳаммага маълум. Улар билан кундалик фаолиятимизда тўқнашиб турамыз, уларни қўллаймиз, улардан бевосита фойдаланамиз. Одамлар кўп замонлардан бери қаттиқ жисмлар тузилиши, уларнинг турли хоссаларини билишга қизиққан, олимлар шу соҳада узлуксиз равишда тадқиқот олиб борган, ишбилармон муҳандислар, ихтирочилар ҳар хил вазифаларни бажарадиган иш қуроллари, асбоблар, қурилмалар барпо қилишган. Классик физика таркибида қаттиқ жисмлар классик физикаси шаклланиб, бундай жисмларнинг механик, электрик, магнетик, иссиқлик хоссаларини ўрганиш соҳасида олиб борилган илмий тадқиқотлар натижасида бир қатор заминий муҳим қонуниятлар топилган эдики, бу асосда техника соҳасида катта тараққиёт амалга ошган эди.

Аммо, XX-асрнинг биринчи чорагида квантлар назариясининг майдонга келиши ва узил-кесил шаклланиши шу асрнинг 30-йиллари бошланишига қадар қаттиқ жисм квантик физикаси асослари ишлаб чиқирилишига олиб келди. Бу атом квантик физикасининг давомий ривожини бўлиб, қаттиқ жисмлар классик физикасининг қўлланиш чегараларини аниқлаб бердигина эмас, балки қаттиқ жисмлар ҳақида тасаввурларни муҳим даражада ислоҳот қилди, квантик физика заминида қаттиқ жисмларнинг барча хоссалари қайтадан кўриб чиқилди ва асосий қонуниятлар тизими аниқланди.

Хусусан, қаттиқ жисмлар тузилиши бўйича, электрик хоссалари ва ҳ.к. сифатлари бўйича турларга ажратилди, улар айрим ҳолда батафсил ўрганиб чиқилди.

Қаттиқ жисмларнинг муҳим хоссаларини тушуниш учун уларнинг тузилиши ҳақида муайян тасаввурга эга бўлиш зарур.

1.2. КРИСТАЛЛИК ВА АМОРФ ҚАТТИҚ ЖИСМЛАР

Қаттиқ жисмлар, албатта, жуда кўп атомлар (ионлар, молекулалар)дан ташкил топган бўлади. Қаттиқ жисмда атомларнинг жойлашиши тартибига қараб, улар кристалл ва аморф жисмлар гуруҳларига ажралади.

Кристалларда атомлар бутун жисм ҳажмида даврий равишда қатъий тартибда (узоқ тартибда) жойлашган бўлади. Аморф қаттиқ жисмларда атомлар бутун жисм ҳажмида қатъий тартибда жойлашган бўлмайди, аммо яқин қўшнилар жойлашишида муайян тартиб (яқин тартиб) бор.

Кристалл қаттиқ жисмларда қатъий критик нуқталар (суюлиш ва қотиш температураси) мавжуд, аморф жисмлар эса муайян температуралар оралиғида суюлиб ёки қотиб боради.

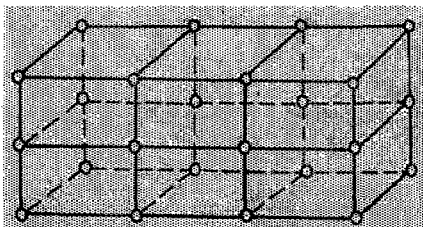
Ушбу қўлланмада биз асосан кристалларни ўстириш технологияси масалаларини баён қиламиз, шунинг учун кристалларнинг тузилиши ва унга тегишли тушунчалар билан қисқача танишиб чиқайлик.

Кристаллда учта бош йўналиш бўлади, улар учта вектор орқали ифодаланади. Кристаллда даврий жойлашган атомлар марказлари жойлашган нуқталарни **тугунлар** дейилади, тугунлар орасидаги ҳажмни **тугунлараро фазо** дейилади.

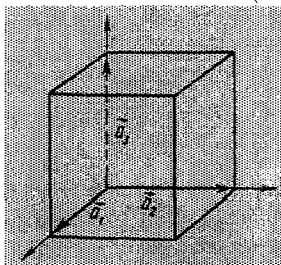
Агар, фикран, тугунларни тўғри чизиклар билан туташтирсак, кристаллнинг фазовий панжараси (I.1-расм) ҳосил бўлади.

Фазовий кристаллик панжаранинг энг кичик катагини **элементар ячейка (элементар катак)** дейилади у содда ҳолда уч бош йўналишда қўшни атомларни туташтирувчи $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$ векторлар асосига қурилган параллелепипед шаклида бўлади (I.2-расм).

Унинг ҳажми: $V_0 = \vec{a}_1 [\vec{a}_2, \vec{a}_3]$, $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$ векторларни **асосий, масштаб векторлар** ёки **трансляцион даврлар** дейилади.



1.1-расм. Кристалл панжараси.



1.2-расм. Элементар катак.

Умумий ҳолда (кубик элементар ячейкалардан бошқа ҳолда) $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$ векторлар қиймати тенг эмас, улар орасидаги бурчаклар (кубдагидек) 90° бўлмайди.

Энг содда геометрик панжаралар сони 14 та (Браве панжаралари), бошқа барча панжаралар шу соддаларининг муайян бирлашмаларидан ҳосил бўлади.

Кристаллар (аниқроғи, яхлит-монокристаллар) **анизотроп** хоссаларга эга. Аммо кўпчилик яхлит монокристаллчалардан ташкил топган поликристаллар **изотроп** хоссаларга эга бўлиши мумкин.

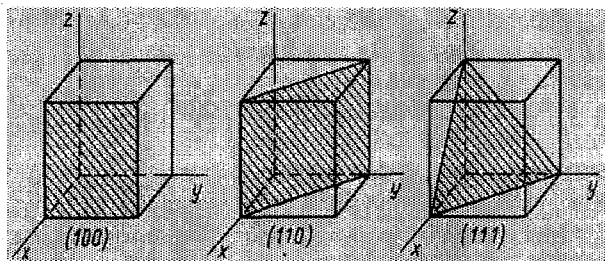
Ҳар қандай кристаллик панжарада тугунлар турли кристаллографик текисликларда жойлашган. Монокристалларнинг ташқи **ёқлари** кристаллографик текисликлар кесишишидан ҳосил бўлади.

1.3. МИЛЛЕР ИНДЕКСЛАРИ

Фазовий панжарадаги текисликлар ва йўналишларни нишонлаш учун **Миллер индекслари** деб аталган белгилар қўлланади. Улар қуйидагича аниқланади: кристаллдаги муайян текислик унинг учта бош ўқида, a_1, a_2, a_3 , бирликларда S_1a_1, S_2a_2, S_3a_3 кесмалар кесган бўлсин (1.3-расм). Шу кесма-

лар тескари қийматлари нисбати тузилади, яъни $\frac{1}{S_1} : \frac{1}{S_2} : \frac{1}{S_3}$

ва уни умумий махражга келтириб, умумий бўлувчига бўлиб, учта бир-бирига бўлинмайдиган сонлар нисбатини оламиз.



1.3-расм. Миллер индексларига доир.

Ана шу сонлар **кристаллографик текисликнинг Миллер индекслари** дейилади.

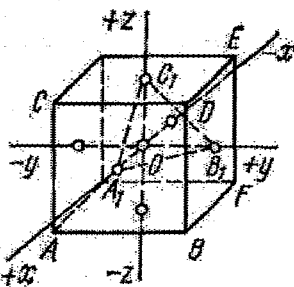
Кристаллдаги текислик (hkl) шаклда белгиланади, уларнинг (эквивалент текисликларнинг) оиласи $\{hkl\}$ кўринишда ифодаланади. Кубик элементар ячейка ёқлари (текисликлар) белгиланиши 1.4-расмда кўрсатилган.

Кристаллдаги йўналиш белгиларини аниқлаш учун уни кўрсатувчи $\vec{A}$ векторни учта бош ўққа проекциялари A_1, A_2, A_3 олинади, уларнинг умумий кўпайтирувчилари бўлса, қисқартириш қилинади, натижада

$$A_1:A_2:A_3 = u:v:w \quad (1.1)$$

учта u, v, w бир-бирига бўлинмас сонлар нисбатига келинади. Бу сонлар **кристаллографик йўналишнинг Миллер индекслари** дейилади.

Ўқувчи қаттиқ жисмлар физикасига бағишланган китоблардан кристалларнинг турлари, кристаллни ташкил этган зарралар орасидаги ўзаро таъсир кучлари ҳақидаги маълумотларни билиб олар деб ўйлаймиз ва ҳозирча шу қисқа ахборот билан кристаллографик белгилари. кристалларга тегишли зарурий қўшимча маълумот ҳам бериб борамиз.



1.4. ОЛМОС ВА СФАЛЕРИТ ТУЗИЛМАЛАРИ

Кремний (Si) ва германий (Ge) кристаллари олмос панжарасига эга бўлади, олмос панжараси эса, катта (фазовий) диагонали бўйича унинг $1/4$ қисми қадар бир-бирига нисбатан силжиган иккита содда, ёқлама марказланган кубик панжара йиғмасидан иборат.

Кўпчилик яримўтказгич бирикмалар (масалан, GaAs ва GaP) сфалерит тузилишига эга бўлади. Унинг олмос тузилишидан ягона фарқи шундаки, олмос панжараси иккита содда панжарадан тузилган, уларнинг тугунларига бир элемент атомлари жойлашган, сфалерит тузилишида эса уни ташкил этган икки содда панжарадан бирида бир элементнинг, иккинчисида бошқа элементнинг атомлари жойлашган бўлади. Тугунларда олмос панжарасида бир хил атомлар жойлашади, сфалерит панжарасида эса бир тугунларида бир хил атомлар, иккинчи тугунларида эса бошқа хил атомлар жойлашади.

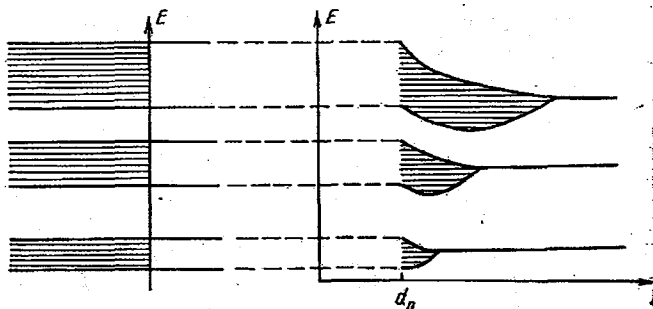
Атомларнинг бундай жойлашиши яримўтказгичларнинг кристалланиши, едирилиши жараёнларида бир қатор хусусиятларни келтириб чиқаради.

1.5. МЕТАЛЛАР. ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР. ДИЭЛЕКТРИКЛАР

Қаттиқ жисмлар квантик физикасида ҳал қилинадиган асосий масалалардан энг муҳими кристалларда заряд ташувчилар энергиялари спектрини аниқлашдир. Уни кристаллнинг даврий электрик майдонида ҳаракатланаётган электрон учун Шредингер тенгламасини ечиш йўли билан ҳал қилинади.

Турли даврий майдонлар учун мазкур тенгламани ечиш қуйидаги умумий хулосаларга олиб келади.

1. Якка атомдаги айрим рухсатланган сатҳлардан иборат электронлар энергиялари спектри ўрнига кристалл қаттиқ жисмда электроннинг энергиялари спектри рухсатланган ва тақиқланган энергия зоналарига ажралган бўлади. 1.5-расмда атомлар бир-бирига яқинлашиб кристалл ҳосил қилганида айрим энергия сатҳлари парчаланиб энергия зоналари пайдо бўлиши кўрсатилган.

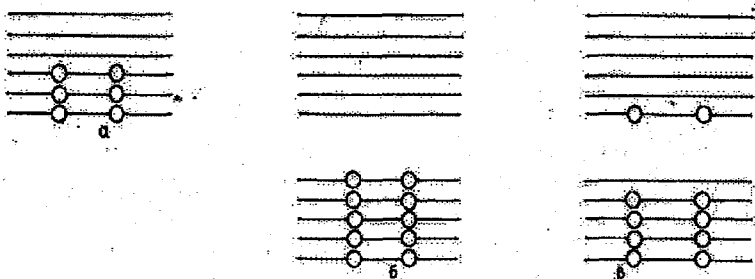


1.5-расм. Атомдаги энергия сатҳларидан кристаллда энергия зоналари пайдо бўлиши.

Рухсатланган энергиялар зонаси ичида электроннинг энергияси узлуксиз ўзгаради, деб ҳисобласа бўлади, чунки, ҳар бир зона ичида сатҳлар сони кристаллдаги жуда кўп атомлар сонига яқин (тахминан, 1 см^3 да 10^{22} атом бўлади). Баъзи ҳолларда зоналардан икkitаси бир-бири устига тушади.

2. Бир рухсатланган зонадан иккинчисига ўтиш учун улар орасидаги тақиқланган зонадан сакраб ўтиш зарур, бунинг учун пастки зонадаги электрон тақиқланган зона энергетик кенглигига тенг энергия олиши керак.

3. Қаттиқ жисмларнинг электрик ўтказувчанлик бўйича металллар, яримўтказгичлар ва диэлектрикларга ажралиши зоналарнинг электронлар билан тўлдирилишига боғлиқ. Зоналарнинг тўлдирилишининг уч ҳоли бўлиши (1.6-расм) мумкин. 1) тўла тўлдирилган зона — ундаги электронлар



1.6-расм. Энергия зоналарининг электронлар билан тўлдирилган ҳоллари.

боғланган электронлар бўлиб, ток ўтказишда қатнаша олмайди, ҳамма зоналари тўла тўлдирилган моддалар диэлектрик (изолятор) бўлади; 2) қисман (чала) тўлдирилган зона — бундай зонадаги электронларга электрик майдон таъсир этса (намунага кучланиш берилса), электронлар юқориги бўш сатҳларга чиқиб олиб, ўз тезлиги йўналишини ўзгартиради, бу эса зонадаги электронларнинг йўналган ҳаракатини (токни) пайдо қилади. Бундай зонали моддалар ўтказгич бўлади.

Металларда юқориги энергия зонаси ярмисигача тўлдирилган (ундаги электронлар сони атомлар сони чамасида), бундаги электронлар токда қатнаша олади, улар кўп миқдорда бўлганлиги учун металлларнинг ўтказувчанлиги катта бўлади. Унинг ифодаси:

$$\sigma = en\mu. \quad (1.2)$$

3) **Бўм-бўш зона**, албатта, электрик ўтказувчанликка ҳеч қанақа ҳисса қўшмайди.

4. Мутлақ ноль(ОК) температурада яримўтказгичларнинг бир неча зоналари электронлар билан тўла тўлдирилган бўлади, юқорироқдаги зона бўш бўлади. Демак, бунда яримўтказгич кристалли ток ўтказмайдиган изолятор бўлиши керак. Энг юқориги тўлдирилган энергия зонаси атомдаги валент сатҳдан ҳосил бўлгани учун уни **валент зона** дейилади. Ундан юқоридаги ОК да бутунлай тўлатилмаган зонани **ўтказувчанлик зонаси** дейилади. Аммо мутлақ нол (ОК) дан юқори ҳар қандай температурада валент зона юқори чегарасидаги электронларнинг бир қисми иссиқлик ҳаракати энергияси ҳисобига ўтказувчанлик зонасига ўтиб олади ва электрик майдон таъсирида токда қатнашадиган бўлади. Уларни **ўтказувчанлик электронлари** ёки эркин электронлар дейилади. Валент зонада электронлар ташлаб кетган ҳолатлар ўзини +е зарядли ва муайян m_p массали зарралар сифатида тутати. Уларни **коваклар** дейилади. Коваклар токда қатнаша оладиган ҳаракатчан зарралардир.

Яримўтказгичнинг ўтказувчанлиги:

$$\sigma = en_n + ep_p. \quad (1.3)$$

5. Яримўтказгичлар ва диэлектриклар орасидаги фарқ валент зона билан ўтказувчанлик зонаси орасидаги таққиқ-лан-

ган зона E_g кенглигига боғлиқ. Яримўтказгичларда тақрибан $E_g < 3эВ$ бўлса, диэлектрикларда $E_g > 3эВ$ бўлиб, диэлектрикнинг валент зонасидан юқориги зонага электронларнинг чиқиб олиш эҳтимоллиги жуда кам, бинобарин, ди-электрикларда ток ўтказишда қатнашадиган заряд ташувчилар деярли йўқ даражада оз бўлади. Диэлектрик-изолятор.

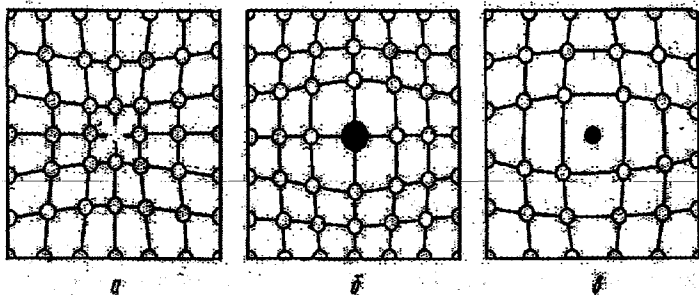
6. Энергия зоналари назарияси металллар ва яримўтказгичларнинг электрик хоссалари фарқларини куйидагича тушунтиради: 1) металлларда ўтказувчанлик электронлари (эркин электронлар) атомлар сони тартибида, бинобарин, $\approx 10^{22} \text{см}^{-3}$ зичликка эга. Тоза яримўтказгичларда бундай электронлар зичлиги (масалан, тоза кремнийда $300\text{Кда } n \approx 10^{10} \text{см}^{-3}$) металлдагига нисбатан миллиардларча марта кам, бинобарин, яримўтказгичларнинг ўтказувчанлиги шу тартибда кичик бўлади; 2) маълумки, температура ошган сайин металлнинг қаршилиги ортиб боради. Бунинг сабаби бу ҳолда атомлар тебранишлари кучайиб, ўтказувчанлик электронлари ҳаракатига қаршилиги ортиб боради, яъни уларнинг ток йўналишида ҳаракатчанлиги μ камаяди, аммо ўтказувчанлик электронлари зичлиги ўзгармас қолади. [(1.2) ифодага қ.] Яримўтказгичларда температура ортиб борганда валент зонадан ўтказувчанлик зонасига ўтиб олган электронлар сони, бинобарин, валент зонада ҳаракатчан коваклар сони ҳам тез ортиб боради, уларнинг ҳаракатчанлиги нисбатан кам ўзгаради. Оқибатда температуранинг ортиши яримўтказгичлар ўтказувчанлиги тез ортишига сабаб бўлади.

Юқорида баён қилинган мулоҳазалар идеал кристаллга тегишли эди. Аммо ҳақиқий кристалларда тузилиш ва таркибнинг идеал ҳолдан четланишидан иборат нуқсонлар мавжуд бўлади.

1.6. КРИСТАЛЛИК ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАРДА НУҚСОНЛАР

Ҳақиқий кристалларда тузилиш ва таркибга оид нуқсонларнинг мавжуд бўлиши электронлар энергия спектрининг зонавий тузилишида ўзгаришлар пайдо бўлишига сабабчи бўлади. Нуқсонлар асосий атомлар зичлигидан анча кам ва анча кичик ҳажмни эгаллайди, бинобарин, кристаллнинг умумий тузилиши ва механик хоссалари сақланиб қолади.

Агар кристаллдаги нуқсонлар миқдори кичик бўлса, бу ҳолда улар бир-биридан анча узоқда жойлашган ва бир-бири билан таъсирлашмайдиган бўлади. Бундай нуқсонларни **маҳаллий** (локаланган) **нуқсонлар** дейилади. Нуқсон яқинида электрон (ковак) учун маҳаллий ҳолат пайдо бўлади. Маҳаллий нуқсонлар ҳолида бундай ҳолатлар бир хил бўлади. Нуқсон яқинидаги маҳаллий ҳолатларда турган электронлар электрик ўтказувчанликда қатнашмайди. Демак, нуқсонларнинг электронлар учун ҳосил қилган маҳаллий энергия сатҳлари яримўтказгич кристаллининг таққиланган зонасида жойлашган бўлиши керак. Нуқсонлар кристалларни ўстириш жараёнида иштирок қилади ва уларнинг хоссаларига таъсир кўрсатади.



1.7-расм. Кристалл панжарасининг айрим жойларда бузилиши: *a*-панжара тугунидан атом кетиб қолган; *б*-асосий атом ўрнини киришма атоми эгаллаган; *е*-киришма атом тугунлар орасида жойлашган.

Геометрик нуқтаи назардан нуқсонлар нуқтавий, чизиг'ий, ясси, ҳажмий ва сиртйй нуқсонлар гуруҳларига ажратилади.

Нуқтавий нуқсонларга геометрик ўлчамлари атом ўлчамлари тартибида бўлган кристалл панжараси нуқсонлари, жумладан, атомлар ташлаб кетган панжара тугунлари **вакансиялар** (буш ўринлар) ва тугунлар орасига жойлашиб олган атомлар, кристалл сиртига ёпишиб олган (адсорбцияланган) ёт атомлар, алоҳида жойлашган ва 2-4 атомдан ташкил топган бирикмалар мисол бўла олади. Киришмалар атомлари ҳам шу тур нуқсонлардандир.

Термодинамик мувозанат шароитида ҳамма вақт кристаллда вакансиялар мавжуд бўлади. Атом ўз тугунидан кетиб

тугунлар орасига жойлашиб олган ҳолда вакансия билан тугунлар орасидаги атом жуфти вужудга келади. Уни **Френкель нуқсони** ёки **Френкель жуфти** дейилади. Атомлар панжара тугунларини ташлаб кетгач, кристалл сиртига чиқиб олиши ва янги қатлам ташкил қилиши мумкин. Бу ҳолда панжаранинг бўш қолган тугуни (вакансия) **Шоттки нуқсони** дейилади. Ионлардан ташкил топган кристалларда анион ва катион вакансиялари тенг миқдорда ҳосил бўлади. Уларни ҳам Шоттки нуқсонлари дейилади.

Вакансияларнинг пайдо бўлиши температурага, уларнинг ҳосил бўлиши энергиясига боғлиқ бўлади.

Агар тугунларда турган атомлар зичлиги N , Шоттки нуқсони(вакансия) ҳосил бўлиши энергияси E_v бўлса, у ҳолда бундай нуқсонлар зичлиги

$$n_v = N \exp(-E_v / kT) \quad (1.4)$$

бўлади.

Френкель жуфтлари зичлиги эса

$$n_f = \sqrt{NN'} \exp(-E_f / 2kT) \quad (1.5)$$

бўлади, бунда, N — бирлик ҳажмдаги тугунлар сони, N' — тугунлараро имконий вазиятлар сони, E_f — Френкель жуфти ҳосил бўлиш энергияси.

Шоттки нуқсонлари (вакансиялар) ковалент боғланиш-ли кристалларда(масалан, германий ва кремний кристалларида) кўпроқ учрайди. Улар зичлигининг температурага кучли боғланганлиги (1.1) ифодадан кўриниб турибди. Паст (жумладан, хонадаги) температураларда вакансиялар зичлиги кам, аммо температура ортиши билан у тез орта боради. $E_v = 1.3 \text{ эВ}$, $N = 10^{22} \text{ см}^{-3}$ бўлган ҳолда вакансиялар зичлиги ушбу жадвалда келтирилган.

1.1-жадвал

Т. К	100	300	500	700	900	1100
$N_v, \text{ см}^{-3}$	$2 \cdot 10^{-32}$	$2 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{17}$

Жадвалдан юқори температураларда вакансиялар зичлиги анча кўп бўлиши яққол кўринади. Кристаллнинг темпера-

тураси пасайтирилса, вакансиялар зичлиги камайиб кетиши керак. Шу сабабдан, агар кристалл тез совитилса (бу жараённи “чиниктириш” дейилади), вакансиялар зичлиги ўша юқори температурадагидек қолади. Шу сабабдан, мазкур зичлик кристаллга берилган олдинги термо ишловга ҳам боғлиқ бўлади. Аммо, кристаллни юқори температурада муайян вақт давомида қиздириб турилса (“қуйдириш”), вакансиялар ҳажм-дан сиртга диффузияланиб кетади. Нуқтавий нуқсонларнинг, жумладан, вакансияларнинг ҳосил бўлиши босимга ҳам боғлиқ. Унча катта бўлмаган босимлар соҳасида

$$N_v = N \exp[(-E_v + p v) k T] \quad (1.6)$$

ифодадан фойдаланиш мумкин, бунда p -босим, v -битта вакансия ҳосил бўлишида кристалл ҳажмининг ўзгариши.

Кристалл ҳажмида вакансияларнинг уюмлари (тўпламлари) ҳосил бўлиши ва улар ўз навбатида бошқа нуқсонларнинг, масалан, чизигий нуқсонларнинг пайдо бўлишига олиб келиши мумкин. Вакансиялар бошқа нуқсонлар билан, масалан, киришмалар билан бирлашиши мумкин. Кремний ва германий монокристалларида вакансия-кислород бирикмаси (А-марказ) бошқа вакансиялар ёки киришмалар ўтириб оладиган марказлар вазифасини ўтайди. Бундай нуқтавий нуқсонлар ўлчами 60-80 нм.

$A^{III} V^V$ бирикмали яримўтказгичлар каби мураккаб яримўтказгичларда у ё бу таркибловчи атомларнинг баъзи тугунларда йўқ бўлишидан вакансиялар ҳосил бўлади.

Вакансиялар ҳақида юқорида келтирилган маълумот билан чекланамиз ва ўқувчига бу ҳақда батафсил маълумот учун рўйхати келтирилган адабиётни тавсия қиламиз [7].

Нуқтавий нуқсонлар асосан мувозанатий нуқсонлар гуруҳига киради. Кристалл билан иссиқлик мувозанатида бўлмаган номувозанатий нуқсонлар ҳам мавжуд бўлади.

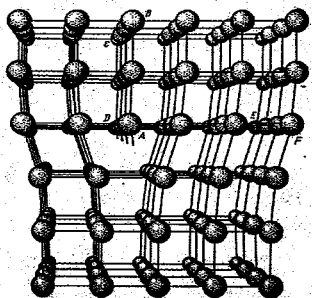
Дислокациялар деб номланган чизигий нуқсонлар энг муҳим номувозанатий нуқсонлардир. Бу нуқсонларнинг ўлчамлари икки йўналишда жуда кичик, аммо учинчи йўналишда ҳар қанча узун бўлиши мумкин.

Дислокацияларнинг икки асосий тури мавжуд. Биринчи тури — **чегаравий дислокациялар** кристалл панжарасида қўшимча ADCB вертикал атомлар яримтекислиги-

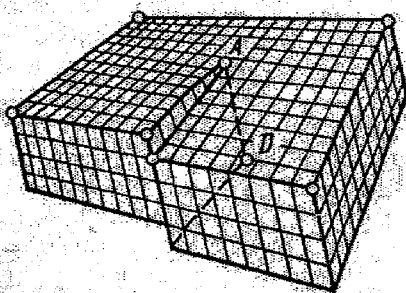
нинг вужудга келиши оқибатида ҳосил бўлади (1.8-расм). ADEF текислик устида атомлар вертикал қаторлари сони биттага ортиқ бўлади. ADEF ни **сирпаниш текислиги** дейилади. Ярим текисликнинг пастки чегараси AD **дислокация чизигини** ташкил қилади.

Агар чегаравий дислокациянинг бир учи маҳкамланган бўлса, унинг ҳаракатланиши оқибатида мураккаб шаклдаги чизигий нуқсонлар, масалан, ярим ҳалқа шаклли дислокация сиртмоғи вужудга келади. Улар дислокациясиз кремний ва германий монокристалларида кўпинча учраб туради, уларнинг ўлчами 10 нм гача бўлиб, монокристалларнинг дислокациясиз ўсишини бузувчи дислокациялар пайдо бўлиши ва кўпайишига сабаб бўлади.

Иккинчи турдаги дислокациялар — **винтсимон дислокациялардир**. Улар панжаранинг бир қисмининг иккинчисига нисбатан бир давр қадар силжиши оқибатида ҳосил бўлади.



1.8-расм. Кристаллдаги чегаравий дислокация тасвири.



1.9-расм. Кристаллдаги винтсимон дислокация тасвири.

Бу ҳолда панжара бузилиши шундан иборатки, винтсимон дислокация AD ўқи яқинида атомлар қаторлари эгилади ва пастки атомлар қаторига тенглашади, яъни улар спираль ёки винт бўйича жойлашади. Кристалларда чегаравий ва винтсимон дислокациялар бир вақтда мавжуд бўлиши мумкин, улар дислокацияларнинг аралаш шаклларини ҳосил қила олади.

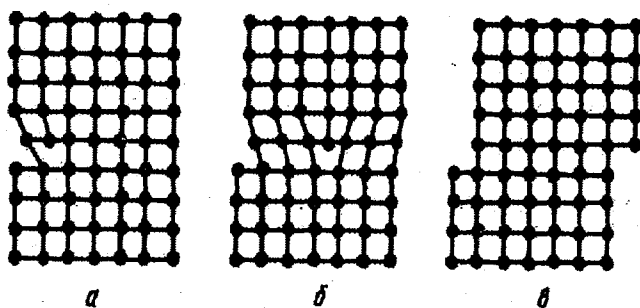
Дислокациялар дастлаб хамиртуруш кристаллдан ўсиб чиқади. Сўнгра, унинг ўсишига механик ва термик кучланишлар, зичлик градиентлари, вакансиялар тўпланиши ва ёт киришмалар таъсир қилади.

Асосий ўрин тутадиган термик кучланишлар кристаллнинг **пластик деформациясини** пайдо қилади.

Монокристаллар юқори температураларда бундай деформацияга дучор бўлиши осон. Масалан, кремний кристалли 800° С дан юқорида осон буралиши ва эгилиши мумкин.

Кристаллнинг пластик деформацияланиш жараёни атомлар текисликларининг бир-бирига нисбатан силжиши ёки сирпаниши йўли билан боради.

Агар кристаллда дислокациялар бўлмаса, бу жараён юз бериши учун атомлар қаторларини бир-бирига нисбатан силжитишга анча энергия керак бўлади. Дислокациялар бўлган ҳолда эса силжиш энг бўш жойда-дислокация соҳасида осонроқ содир бўлади. Бунда ортиқча атомлар ярим текислиги кўшни текисликни узиб ўша жойга ўрнашади. Оқибатда дислокация ўз сирпаниш текислигида чапдан ўнгга **«эстафета бўйича»** кўчади (1.10-расм).



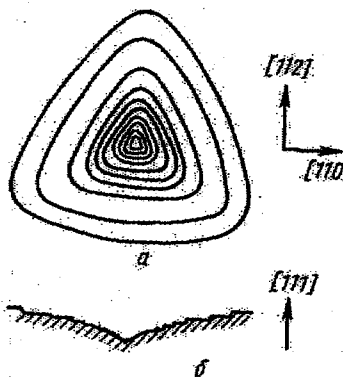
1.10-расм. Чегаравий дислокация кўчиш оқибатида кристаллнинг пластик деформацияланиши.

Дислокация кристалл сиртига чиқиб, поғона ҳосил қилади. Бундай пластик деформацияда масса кўчмайди.

Дислокациялар температура градиенти таъсирида пастрок температурали соҳа томон кўчиши мумкин. Турли ишорали икки дислокация учрашганда улар бир-бирини йўқ қилади. Демак, дислокация ҳаракатланиши оқибатида ё кристалл сиртига чиқади, ё бошқа дислокацияда тўхтайдди.

Сирпаниш текислигида кўчишдан ташқари яна дислокациялар тик йўналишда, яъни ўзининг яримтекислигида ҳара-

кат қилиши мумкин. Бу диффузион ҳаракат бўлиб, у кристаллнинг турли температурали қисмларида дислокациялар зичлиги ҳар хил бўлиши оқибатида ҳосил бўлади.



1.11-расм. (111) текисликда едириш чуқурлари тасвири: а-текислик сиртида кўриниши; б-кесимда кўриниши.

Киришма атомлари дислокацияларга тортилади, улар атрофида киришмалар уюмини (киришма атмосферасини) ташкил қилади. Юқори температурада киришма атмосфера-си ҳажм бўйича сўрилади, паст температурада эса яна ҳосил бўлади. Бу ҳодиса кристалл ҳажмида киришмаларнинг (жумладан, легирловчи киришмаларнинг ҳам) нотекис тақсимланишига сабаб бўлиши мумкин.

Дислокациялар яримўт-казгичларда заряд ташувчиларнинг ҳаракатчанлиги яшаш вақти ва бошқа катталикларига анча таъ-

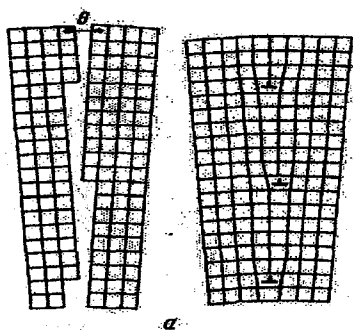
сир қилади. Дислокациялар ташқи таъсирга сушт қаршилиқ кўрсатади. Шунинг учун едириш, диффузия, кристалл муртаклари ҳосил бўлиши ва ҳ.к. жараёнлари кристалл сиртига дислокациялар чиққан жойларда тезроқ боради.

Дислокациялар нисбий миқдорини аниқлаш учун яримўтказгич сирти кимёвий едирилади. Дислокациялар чиққан жойлар бошқа жойларга нисбатан кучлироқ емирилиб, едириш чуқурлари вужудга келади (1.11-расм).

Едирилган сиртни микроскоп орқали кузатиб ҳисоблаш яримўтказгичдаги N_{1d} дислокациялар зичлигини аниқлаш имконини беради. N_d ни 1 см^2 сирт юзига тўғри келган едириш чуқурлари сони сифатида ифодаланади.

Кристалларда сиртий нуқсонлар. Улар жумласига кичик бурчакли чегаралар, доналар ва эгизаклар чегаралари, фазалараро чегаралар ва кристаллнинг ўз сирти киради.

Кичик бурчакли чегаралар йўналиши кам фарқ қиладиган кристалларнинг икки бўлаги блоки орасида ҳосил бўлади (1.12-расм). Бунинг оқибатида бундай блоклар орасида чегаравий дислокациялар вужудга келади. Блоклар орасидаги

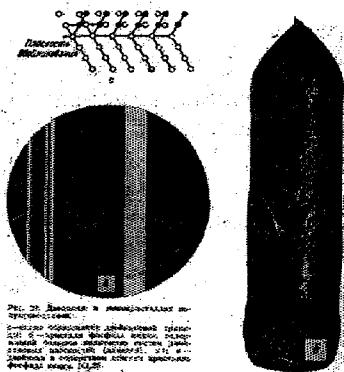


1.12-расм. Яримўтказгич кристалларида кичик бурчакли чегаралар.

бурчак қанча катта бўлса, чегарада дислокация-лар шунча кўп жойлашади. Блоклар йўналишлари фарқи жуда катта бўлганда кичик бурчакли чегаралар доналар орасида оддий чегараларнинг ўзи бўлиб қолади.

Поликристаллик қуймада доналар чегаралари бир неча кристаллик муртақларнинг бир вақтда катталашиб бориши оқибатида ҳосил бўлади. Кўпинча кристалларнинг ўсаётган доналари тур-

ли кристаллографик йўналишларга эга бўлади. Аммо агар тегишган кристалл доналари муайян йўналганликка эга бўлса, улар орасидаги чегарани **эгизак чегараси** дейилади. Масалан, **эгизак кристалл**-да (1.13-расм) унинг бир қисми иккинчи қисмининг кўзгусимон акси бўлади, акс-ланиш текислигини эгизакланиш текислиги дейилади. Эгизак кристалл бир тўғри чизик (эгизакланиш ўқи) атрофида унинг бир қисмини айлантириш натижасида ҳосил бўлиши мумкин. Эгизаклар кристаллар ўсишида, шунингдек, механик, деформацион таъсир оқибатида вужудга келиши мумкин.

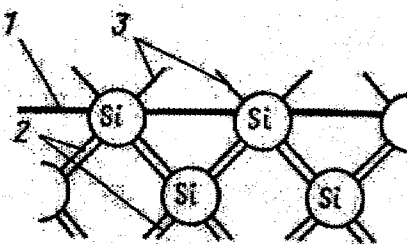


1.13-расм. Яримўтказгич монокристалларида эгизаклар.

Яримўтказгич кристалларнинг эгизакланиши жуда кўп тарқалган тузилиш нуқсонидир. Улар дислокациялар пайдо бўлиши сабабларидан вужудга келади, кўпинча дислокациялар уюмидан туғилиши мумкин. Эгизакларнинг пайдо бўлишига, шунингдек, кристалланиш фронтидаги киришмалар ёки бирлашмалар таркибловчилари уюмлари, ўсиш йўналишининг температуранинг ўқ бўйлаб градиентидан четлани-

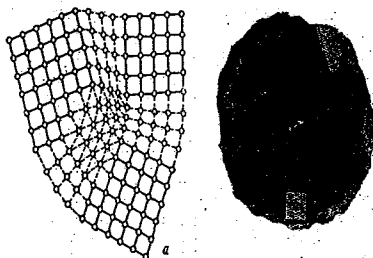
ши ва кристаллдаги механик кучланишлар сабаб бўлиши мумкин.

Кристалл сиртининг тузилиши унинг ҳажми тузилишидан фарқ қилади, чунки ташқи атомлар айрим боғланишлардан маҳрум (1.14-расм). Оқибатда кристалл сирти киришма ва газларни юқори ютиш қобилиятига эга. Кристалл сирти ҳолати яримўтказгичнинг баъзи электрик хоссаларига муҳим таъсир қилади.



1.14-расм. Кремний атомларининг кристалл сиртида ва унинг ҳажмида жойлашиши: 1-кристалл сирти; 2-ковалент кимёвий боғланишлар; 3-узилган кимёвий боғланишлар.

Кристалллардаги ҳажмий нуқсонларга ундаги бўшлиқлар (коваклар), иккинчи фаза кирмалари, кристалл асосий ҳажмига нисбатан бошқача йўналганликли ҳажмлар мансубдир. Улар кристаллнинг ўсиши жараёнида вужудга келади. ҳажмий нуқсонларнинг нозикроғидан бири дислокацияларнинг фазовий турлари бўлиб, улар мозаик тузилишни ҳосил қилади, кейингиларда кичик ҳажмли блоклар геометрик мунтазам тузилишга эга ва бир-бирига нисбатан йўналганлиги озроқ фарқли бўлади. Бундай блоклар (кристаллчалар) бирлашмаси мозаикани эслатади. Блоклар чегаралари бўйича одатда дислокациялар жойланган бўлади (1.15-расм).



1.15-расм. Яримўтказгичларнинг мозаик тузилиши: а-мозаик тузилиш чизмаси; б-InP кристалли кесимида мозаик тузилиш.

Хулоса шуки, барча номувозанатий нуқсонлар дислокациялар билан алоқадор. Энди қаттиқ жисмларда, хусусан, яримўтказгичларда мавжуд бўладиган ҳажмий нуқсонларнинг макроскопик турлари ҳақида қисқача тўхталамиз. Уларга жисмнинг бутун ҳажмини ё унинг айрим макроскопик қисмини эгаллаган нуқсонлар киради. Ҳажмдаги дарзлар ва коваклар, сиртдаги

тирналишлар ва ҳажмда тўпланган киришма уюмлари ана шундай нуқсонлардир. Макронуқсонлар микронуқсонларнинг бирлашиши натижасида ҳосил бўлиши равшан. Яримўтказгичларни ўстиришда макрокучланишлар вужудга келишига температуранинг жисм ҳажмида бирдай бўлмаслиги катта ҳисса қўшади. Бу кучланишларни **термоэластик кучланишлар дейилади**. Яримўтказгичда уни тайёрлаш ёки унга термоишлов беришдаги температура тақсимотини иссиқлик ўтказувчанлик тенгламасини ечиб топилади (k -сол. иссиқлик ўтказувчанлик коэффициент, c -жисмнинг сол.иссиқлик сифими, ρ -намуна зичлиги).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{c\rho} \Delta T. \quad (1.7)$$

Температуранинг кескин ўзгариши иссиқлик зарба-си кристаллда кенгайиш-қисилиш эластик тўлқинлари ҳосил қилади. Агар температура тебраниб турса, бу ҳолда даврий «исиш-совиш» жараёни юз бериб туради, бу эса нуқсонлар жамгарилишига олиб келади(модданинг «чарчаши» ҳодисаси юз беради).

Техникада кўп қатламли қаттиқ жисм тузилмалари муҳим ўрин тутади. Бу ҳолларда тағлик ва унга ўтказилган қатлам панжаралари доимийлари фарқи, иссиқликдан кенгайиш коэффициентларининг тафовути макрокучланишлар (макронуқсонлар) манбаи бўлади.

Дарзлар дислокацияларнинг кристалл ичида кўчиши жараёнида тормозланиши натижаси сифатида қаралади. Дарзнинг кенглиги уни ҳосил қилишда қатнашган дислокациялар миқдорига боғлиқ. Дислокациялар зичлиги n_d бўлса, дарзни $n_d \bar{b}$ Бюргерс векторли битта катта дислокация деб қараса ҳам бўлади. Дарз ҳосил бўлишининг яна бир эҳтимолий йўли турли ишорали дислокациялар тўпланган икки кесишувчи текисликнинг ўзаро таъсиридир.

Дарз пайдо бўлгандан кейин унинг тақдири қандай бўлади? Дарзнинг узунлигини L билан, ён чегарасидаги критик кучланишни σ орқали, Юнг модулини E орқали, бузиш солиштирма ишини γ орқали белгиласак, ҳисоблаш

$$\sigma = \sqrt{2E\gamma/\pi L} \quad (1.8)$$

ифодага олиб келади. Бу ифодадан намунани (буюмни) бузмайдиган дарзнинг L узунлигини аниқлаш мумкин.

Макроковаклар кристаллда атомлар эгаллаган ва атомлар ўлчамидан кўп марта катта ўлчамли жойлардир. Уларнинг бир томони сиртга чиққан бўлса, уларни очиқ коваклар, агар ковак кристалл ҳажмида тўла жойлашган бўлса, уларни ёпиқ коваклар дейилади.

Кристалларни ўстиришда коваклар бир қанча йўл билан ҳосил бўлади.

1. Коваклар ҳосил бўлишининг диффузион механизми мавжуд. Ковак кўп сонли вакансиялар йиғилиши натижаси сифатида қаралади. Жисм сиртининг эгриланган жойларида вакансиялар кўп тўпланади. Таҳлил кўрсатишича, қавариқ сирт устида вакансиялар камроқ, ботиқ жойда эса ортиқроқ бўлади. Демак, ковакнинг ташқи сиртида вакансиялар кам, ички сиртида ортиқча бўлади. Вакансиялар ковак ҳосил бўлаётган жойга диффузия йўли билан кўчиб боради.

2. Коваклар термоишлов жараёнида ҳосил бўлади. Термоишлов жараёнида намуналар деформацияланади ва шишади, уларда коваклар ҳосил бўлади, термоишлов кўп марта такрорланса, дарзлар пайдо бўлади.

Термоишлов сони ортиши билан коваклар миқдори ва ўлчами ортиб боради: коваклар намуна қесими бўйича нотекис тақсимланади. Аниқроғи, уларнинг миқдори марказдан четга томон бир текис камайиб боради, 2-3 мм қалинликдаги цилиндрик намунанинг гардишида коваклар бўлмайди.

3. Каттиқ жисмлар контакти (масалан, металл ва яримўтказгич контакти) соҳасида коваклар ҳосил бўлади. А ва В жисмлар контактини қарайлик. Қиздирилганда А жисм атомлари В жисмга, В жисмники А жисмга диффузияланади. Диффузия коэффицентлари тенг бўлмаганлиги учун контакт чегарасидан ўнг ва чап томонда диффузияланган атомлар миқдори тенг бўлмайди. Оқибатда, масалан, А жисмда эгалланмаган тугунлар (вакансиялар), В жисмда эса ортиқча атомлар бўлади. Демак, А кристаллда вакансиялар манбаи, В кристаллда ортиқча атомлар манбаи ишлаб туради. Чегаравий дислокациялар А томонда вакансияларни, В томонда ортиқча атомларни ютиб, қарама-қарши йўналишлар

ҳаракат қилади. А-кристаллда вакансиялар аста-секин кристаллдан сиртга чиқади, В кристаллда эса улар аста-секин пайдо бўлади. Демак, контакт соҳасида бўшлиқ ўсади (Френкель эффеки) ва атомлар текисликлари кўчиб ўтади (Киркендал эффеки).

4. Учувчан таркибловчили кристалларда коваклар бўлиши мумкин. Бу ҳолда учувчан таркибловчининг бугланиши ортиқча вакансиялар манбаи бўлади. Галлий арсениди GaAs кристаллида арсений As таркибловчи анча учувчандир. Бу қаттиқ жисм сиртидан бугланиб кетган атомлар ўрнида вакансиялар пайдо бўлади, уларни ичкаридан атомлар келиб тўлдиради. Улар ҳам яна бугланади, вакансиялар яна тўлдирилади ва ҳ.к. Натижада намуна ҳажми ортиқча миқдордаги вакансиялар билан тўйинади. Уларнинг баъзилари сиртга ва дислокацияларга кетади, лекин бир қисми йиғилиб коваклар ҳосил қилади.

Бошқа ҳажмий нуқсонлардан кристаллнинг мозаикалиги ва газ пуфакларини айтиб ўтамиз.

Ҳажмий нуқсонлар қаттиқ жисмлар физик хоссаларига муҳим таъсир кўрсатади. Хусусан, улар кристалларда диффузия жараёнларига, макронуқсонлар эластиклик модулларига муҳим таъсир кўрсатади. Масалан, ковакларнинг нисбий ҳажми $K \ll V_{\text{ков}} / (V_{\text{ков}} K V_c)$, бунда V_c -коваксиз қатлам ҳажми, $V_{\text{ков}}$ -коваклар ҳажми бўлсин. У ковакли ва коваксиз жисмлар силжиш модули (G^* ва G) ва ҳар тарафлама қисилиш модули мос равишда (H^* ва H) ифодаларига киради:

$$G/G^* = 1 - 5K(3HK/4G)/(9HK/8G), \quad (1.9)$$

$$\frac{1}{H^*} = \frac{1}{H(1-K)} + \frac{3}{4G} \frac{K}{1-K} \quad (1.10)$$

Бу ифодалар тажрибаларда тасдиқланган.

Кристалларда радиацион нуқсонлар. Кристаллни нейтронлар, протонлар, дейтронлар, зарралар, электронлар ва бошқа катта тезликдаги зарралар билан нурлантирганда нуқсонларнинг бир неча хили вужудга келади. Кристаллни γ -квантлар билан нурлантиришда вужудга келадиган фотоэлектронлар ва комптон-электронлар тузилиш нуқсонлари ҳосил қилиши мумкин. Радиацион нуқсонлар номувозанатий нуқсонлардир.

Юқори температурада кристалларни қиздириб туриш тез зарралар ҳосил қилган нуқсонлар диффузиясини тезлаштиради ва уларнинг тез рекомбинацияланишига олиб келади.

Кристалларда тез зарралар ўтаётганда, асосан, тез зарраларнинг атомлар ядролари билан эластик тўқнашиши, кристалл атомларидаги электронларнинг юқори сатҳга кўтарилиши ёки ионланиш, баъзи кристалл атомлари ядровий аврилиш оқибатида киришма атомига айланиши мумкин. Умуман, бу учала жараёнлар бир вақтда содир бўлиши мумкин.

Эластик тўқнашишлар икки ҳодисани вужудга келтиради: 1) кристаллда эластик тўлқинлар пайдо бўлади, уларнинг энергияси атомларнинг иссиқлик энергиясига айланади; 2) тузилиш нуқсонлари содир бўлади.

Эластик тўқнашишларда тез зарранинг тузилиш нуқсонлари ва панжара атомлари тебранишлари ҳосил қилишга сарфланган энергиялари нисбати зарранинг энергияси ва нурлантирилаётган кристалл хоссаларига боғлиқ.

Шуни таъкидлаш керакки, нурлантирилганда кристалларда ҳосил бўладиган нуқсонлар маҳаллий суюлиш оқибатида вужудга келиши мумкин. Шундай маҳаллий суюлиш жойларида 10^3 - 10^4 атомни ўз ичига олган нуқсонлар уюмлари ҳосил бўлади.

Назорат саволлари

1. Қаттиқ jismlar атомлар жойлашиши бўйича қандай турларга ажралади?
2. Миллер индекслари нималарни белгилайди?
3. Олмос ва сфалерит тузилишдаги кристаллар қандай бўлади?
4. Қаттиқ jisмда электронлар энергиялари зоналари қандай тузилган?
5. Зоналар тузилиши асосида металларни тавсифланг.
6. Зоналар тузилиши асосида яримўтказгичлар ва ди-электрикларни тавсифланг.
7. Яримўтказгичларда қандай нуқсонлар бўлади?
8. Дислокациялар тўғрисидаги маълумотларингиз қандай?
9. Кристаллда қандай ҳажмий нуқсонлар бўлиши мумкин?
10. Кучли нурланишлар таъсирида қандай нуқсонлар ҳосил бўлади?

2-БОБ. ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАРДА КИРИШМАЛАР

Кристалл панжарасидаги ёт атомлар (киришмалар) панжара нуқсонлари жумласига киради. Киришма атомлар кристаллнинг асосий атомларига нисбатан жуда оз миқдорда бўлишига қарамасдан, унинг электрофизик хоссаларига муҳим таъсир кўрсатади.

Киришмалар ўзининг тутган ўрни ва бажарадиган вазифаларига қараб бир неча турларга бўлинади.

2.1.ЎРИНБОСАР ВА СУҚИЛИШ ҚАТТИҚ ЭРИТМАЛАР

Киришма атомлар кристалл панжарасида тугунлардаги асосий атомлар ўрнига ўтириб олади (бундай киришмани **ўринбосар қаттиқ эритма** дейилади) ёки улар панжара тугунлари орасига жойлашади (бундай киришмани **суқилиш қаттиқ эритма** дейилади). Бу икки ҳолни геометрик ва электрокимёвий омиллар аниқлайди.

Ўринбосар киришмалар ҳосил бўлиши учун киришма атоми радиусининг асосий атом радиусидан фарқи 15% дан ошмаслиги, асосий ва киришма атомлар электрокимёвий жиҳатидан ўхшаш бўлиши зарур (кейинги шартнинг маъноси: мазкур икки хил атомларнинг валент қобилиятидаги электронлар сони тенг ёки ± 1 қадар фарқланиши керак).

Суқилиш киришмалар ҳосил бўлиши учун киришма атоми радиусининг асосий атом радиусига нисбати 0,59 дан кичик бўлиши зарур. Миқдорий шартлар тажриба йўли билан топилган. Ҳар бир киришма атом ўзи турган жой атрофида панжара даврийлигини бузади ва электрон(ковак) учун маҳаллий сатҳлар ҳосил қилади, бу сатҳлар киришмалар зичлиги унча катта бўлмаганда, тақиқланган зонада жойлашган бўлади. Кўп босқичли тозалашдан сўнг яримўтказгич моддада қолдиқ киришмалар турлари ва миқдорларини аниқлаб олиш муҳим, аммо энг муҳими-муайян мақсадни назарда тутиб тегишлича танланган бошқа элементлар атомларини исталган миқдорда ва маъқул усул билан яримўт-

казгичга киритишдир. Ана шу муаммо ҳал қилингандан сўнг, яримўтказгичлар электроникаси жуда тез ривожлана бошлаганлигини таъкидлаймиз.

Яримўтказгичларга киришмалар киритиш йўли билан уларнинг электрик ўтказувчанлигини ва бошқа хоссаларини ўзгартириш мумкин. Яримўтказгич монокристалини суюлмалардан ҳосил қилиш жараёнида суюлмага исталган бошқа моддалар атомлари киритилади. Бунда монокристалл ҳажмида киришмаларнинг текис тақсимланишини таъминлайдиган чоралар қўлланади.

Энди электроника саноатида кенг қўлланадиган усуллар тўғрисида қисқача маълумот берамиз.

2.2. ДИФФУЗИЯ УСУЛИ БИЛАН КИРИШМАЛАР КИРИТИШ

Яримўтказгичларда диффузия жараёнлари ҳақида кейин батафсилроқ тўхталамиз. Бу жойда мазкур усулнинг қисқача тавсифини келтираамиз, холос.

Бу усулда махсус идишларга (тигелларга) яримўтказгич кристали, у билан бирга киритиладиган модданинг тайинли миқдори ҳам жойланади, сўнг диффузия печида (кристаллнинг суюлиш температурасидан паст бўлган) юқори температурага қиздирилади, киришма модда буғланади ва унинг атомлари кристалл ичига диффузияланиб кира боради. Бу атомлар ё асосий атомлардан бўшаб қолган тугунларга ёки тугунлар орасига жойлашиб олади. Масалан, кремнийга фосфорни $\sim 1200^{\circ}\text{C}$ температурада диффузияланади, чунки кремнийнинг суюлиш температураси тахминан 1410°C бўлгани учун у ўзининг қаттиқ ҳолатини сақлайди, аммо атомлар иссиқлик ҳаракати кучайишидан вакансиялар кўпайиб кетади, фосфор ва кремний атомлари радиуслари бир-бирига яқин бўлгани учун фосфор атомлари кремний кристали тугунларига жойлашиб, ўринбосар киришма ҳосил қилади.

Диффузия жараёнида кристалл ичида киришма атомлар тақсимооти Фик қонунларидан келиб чиқадиган диффузия тенгламасини ечиш орқали аниқланади.

Агар $N(x,t)$ диффузияланувчи киришма атомлари зичлиги (x -о кристалл сирти текислигини белгилайди), D уларнинг диффузия коэффиценти бўлса, x йўланишда

$$\frac{dN}{dt} = D \frac{d^2 N}{dx^2} \quad (I.11)$$

диффузия тенгламасининг чексиз (доимий) манба ҳолидаги (кристалл сиртида киришма зичлиги N_0 деб олингандаги) ечими

$$N(x, t) = N_0 \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (I.12)$$

кўринишда бўлади.

Бу ҳолда кристалл сирти яқинида киришма билан тўйинган юпқа қатлам ҳосил бўлади. Бу қатламдаги киришма зичлиги имкони борича катта қилиб олинади. Бу босқични киришма **киритиш босқичи** дейилади. Сўнгра ташқаридан киришма киритиш бартараф қилиниб (манба узоқлаштирилиб), кристаллга кириб бўлган киришма юқори температурада қайта тақсимланишга дучор қилинади. Бу босқични **киришмани (кристалл ичига) ҳайдаш** дейилади. У чекли киришма манбаидан диффузияланиш ҳолига мос келади. Бу ҳолда (I.11)нинг ечими:

$$N(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left[-\frac{x^2}{2Dt}\right], \quad (I.13)$$

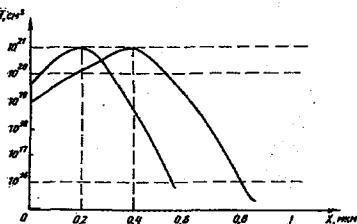
бунда, Q — легирлаш дозаси. Яримўтказгичли асбоблар саноатида планар технологияда худди шу икки босқичли диффузия усули қўлланади. Диффузия ҳодисалари 3-бобда батафсилроқ қаралади.

2.3. ИОНЛАР КИРИТИШ УСУЛИ

Кириртиладиган киришма атомлари даставвал ионлаштирилади, сўнгра бу ионларни катта (бир неча киловольт чама-сидаги) кучланишли электрик майдонда тезлаштирилади, шунда улар кристалл пластинасига кира оладиган бўлади, уларнинг тақсимооти 1.16-расмда келтирилган.

Бу усул ионлар токини ва нурлаш вақтини назорат қилиш орқали кириртилаётган киришмани аниқ ҳамда такрорланувчи миқдорда киритиш, ионларнинг кириш чуқурлигини тайинлаш ва бошқа бир қанча афзалликлар имконини беради.

Киришманинг ионлари яримўтказгич кристалли панжарасига кира бориб икки кўринишда ўз энергиясини йўқота боради. Биринчи ҳолда ион кристалл атомига урилиб, уни тугундан тугунлар орасига кўчириб, Френкель нуқсо-ни ҳосил қилиши, кўчирилган атом, агар иондан катта энергия олса, яна бошқа атомларни ўз тугунидан уриб чиқариши мумкин. Бу тўқна-шишлар ионнинг йўлида тузилиши бузилган соҳалар — кла-стерлар (ўлчами $(15-10) \cdot 10^{-7} \text{ см}$) вужудга келтиради. Ионлар оқими етарлича катта бўлганда кластерлар қўшилишиб, мак-роскопик аморф соҳалар ҳосил қилиши ҳам мумкин.



1.16-рasm. Кристаллга киритил-ган ионлар зичлиги тақсимо-ти.

Иккинчи ҳолда ионлар кристалл атомлари электронлари билан таъсирлашади ва ўз энергиясини атомларни ионлаш ёки ғалаёнлашга сарфлайди.

Ионларни киритиш жараёнини q зарядли ионнинг V куч-ланиш таъсирида олган $E=qV$ энергияси, ионларнинг атом-ларни ионлаш қарраси, $Q=It$ нурлаш дозаси (I —ионлар токи зичлиги, t — вақт) тавсифлайди.

Тезлаштирилган ионларни кристалларга киритиш турли нуқсонларни келтириб чиқариши мумкин. Боз устига бу нуқ-сонларнинг зичлиги катта бўлиб кетганда сиртий қатламда кристалл тузилишининг бузилиши (аморфланиш) содир бўли-ши мумкин. Кристаллни муайян вақт давомида қиздириб, сиртий нуқсонларни йўқ қилиш («қуйдириш») мумкин. Ма-салан, германийда $400-500^{\circ} \text{ C}$ да, кремнийда $600-700^{\circ} \text{ C}$ да аморфланган сиртий қатлам қайта кристалланади, киришма атомлари текис тақсимланади, фаоллашади.

2.4. ЭПИТАКСИЯ УСУЛИ

Юнонча «эпи»—устига, «таксис» —тартибли ўрнатиш (тах-лаш) демакдир. Эпитаксия ҳодисаси монокристалл таглик устида монокристалл модда қатламини маълум кристалло-график йўналишда ўстириш жараёнидир.

Эпитаксия жараёнининг автоэпитаксия (гомоэпитаксия), гетероэпитаксия, хемоэпитаксия, реоэпитаксия деб аталадиган турлари бор.

Автоэпитаксия таглик ва ўстириладиган қатлам айнан бир моддадан иборат ҳолдаги жараёндир.

Гетероэпитаксия таглик ва ўстириладиган қатлам турли моддалардан иборат ҳолдаги жараёндир.

Бу икки жараёнда таглик ва ўстириладиган қатлам моддалари кимёвий таъсирлашмайди.

Аммо хемоэпитаксияда янги кристалл фазаси қатлами тагликнинг унга келиб тушаётган модда билан кимёвий ўзаро таъсири эвазига ҳосил бўлади.

Реоэпитаксия жараёнида тагликнинг тузилиши ўсадиган кристалл фазаси тузилишидан фарқ қилади.

Агар ўтказилаётган модда тагликка бевосита етиб борадиган бўлса, **буни тўғри жараёнлар** дейилади. Акс ҳолда **нотўғри жараён** амалда бўлади.

Ўтказиладиган модданинг дастлабки агрегат (туб) ҳолати бўйича **эпитаксиал жараёнлар 4 турга ажратилади**.

Газ-транспорт (буғ фазали) эпитаксия ҳолида ўтказиладиган модда дастлаб газ (буғ) ҳолатида бўлади ва шу ҳолатда у тагликка етиб боради. Масалан, кремний таглик жойлашган соҳага силан SiCl_4 ни буғ ҳолида водород гази олиб келади. Шу соҳада силан парчаланади ва ундан Si ажралиб, тагликка ўтиради.

Суюқ фазадан эпитаксия қилиш ҳолида ўтказилаётган модда дастлаб суюқ ҳолатда бўлади.

Буғ-суюқлик-кристалл (таглик) тизимида эпитаксия қилиш ҳолида ўтказиладиган модда ўзининг дастлабки буғ (газ) ҳолатидан оралиқдаги суюқ ҳолатнинг юпқа пардаси орқали ўтиб, сўнг тагликка ўтиради.

Яна **қаттиқ фазадан эпитаксия** усули ҳам мавжуд. Масалан, монокристалл сиртида II тур фазавий ўтиш ҳисобига шишасимон модда кристалланиши мумкин.

Эпитаксия усулида бир вақтда киришмалар киритиб борилиши мумкин. Яримўтказгични легирлашда ионлар киритиш ва диффузия усуллари биргаликда қўллаш мумкин. Бу радиацион рағбатлантирилган диффузия ҳодисаси келиб чиқишига олиб келади.

2.5.ТРАНСМУТАЦИОН ЛЕГИРЛАШ УСУЛИ

Яримўтказгичлар кристалларини ядровий зарралар (нейтронлар, протонлар, γ -квантлар ва ҳ.к.) билан нурлантирганда ядровий реакциялар оқибатида асосий модда атомлари унда нурланишгача бўлмаган элементлар атомларига айланиши, булар эса керакли киришма атомлари бўлиши мумкин. Мана шу усулни трансмутацион легирлаш дейилади. Бу ҳодиса ўстирилган кристаллни бир текис легирлаш мақсадида ҳозирги вақтда кенг қўлланила бораётир. Энг қўп амалий қўлланишга эга бўлган йўл иссиқлик(секин) нейтронлари билан нурлаш усулидир.

Иссиқлик секин нейтронлар ҳосил қилган легирловчи киришманинг зичлиги

$$C = \Phi \delta C_{ac} \alpha \tau \quad (I.14)$$

ифода асосида ҳисобланади. Φ — иссиқлик нейтронлар оқими, δ — мазкур ядровий аврилиш реакциясининг изотоп эффектив кесими, C_{ac} — асосий модда атомлари зичлиги, τ — нурлаш вақти.

Иссиқлик нейтронлар билан нурлаб легирлаш мисоли кремнийнинг радиацион легирланишидир.

Табиий кремний уч барқарор изотопнинг аралашмасидир:

$$^{28}\text{Si}(92,28\%), ^{29}\text{Si}(4,67\%), \text{ ва } ^{30}\text{Si}(3,05\%).$$

Кремнийни секин нейтронлар билан нурлантирганда мазкур изотопларнинг ядролари нейтронларни ютади, γ -квантлар чиқариб, ^{20}Si , ^{30}Si , ^{31}Si изотопларга айланади.

^{31}Si изотоп барқарормас, у 2,6 соат ярим даврда емирилиб, фосфорнинг ^{31}P изотопига айланади.

(I.14) ифодадаги δ , C_{ac} , а катталиклар дастлабки моддага тегишли бўлгани учун ўзгармас, агар нейтронлар оқими Φ ни доимий деб ҳисобланса, бу ҳолда кремнийда ҳосил қилинган фосфорнинг зичлиги нурлаш вақтигагина боғлиқ, бу эса фосфор миқдорини етарлича аниқ назорат қилиш имконини беради. Кремний кристалли ўстирилгандан кейин унда фосфорни компенсацияловчи киришмалар(бор (В)) қолади. Бинобарин, солиштирма электрик қаршилиги

бир жинс бўлган кремний кристали олиш учун фосфорнинг зичлиги бор(В) нинг қолдиқ зичлигидан анча катта бўлиши зарур. Бу ҳолда кристалл қуймаси бўйлаб солиштирма қаршилиқ нобиржинслиги (тафовути) $\pm 3\%$ дан ортиқ эмаслигини тажриба тасдиқлайди. Бу аниқлик суюлмадан ўстирилган легирланган кремний ҳажми бўйича солиштирма қаршилиқ тақсимоти бир жинс-лиги даражасидан анча юқоридир.

Бу усулнинг камчилиги шундан иборатки, нурлантирилаётган кристалларда бир вақтда кристалл панжарасида радиацион нуқсонлар ҳосил бўлади. Бундан ташқари, ядро реакторида секин нейтронлардан бошқа яна тез нейтронлар, қувватдор-нурланиш ҳам бор бўлади. Оқибатда кремнийнинг электрофизик хоссалари сезиларли ўзгариши мумкин. Шунинг учун нурлашдан сўнг намуналарга термоишлов бериб, радиацион нуқсонларни куйдириб, кремнийнинг талаб қилинадиган хоссаларига эришиш зарур. Бу ишлов 800°C температурада 1 соат давомида амалга оширилиши маъқул ҳисобланади.

Бу усул нисбатан қимматроқ ва радиацион хавфсизлик чораларини кўриш заруриятини қўяди.

Кристалларни нейтронлар билан трансмутацион легирлаш яримўтказгичлар технологиясининг муҳим ва тез ривожланаётган соҳасидир.

Шу усулда легирланган кремнийнинг турли мақсадли асбоблар тайёрлашдаги бир йиллик сарфи 100 тоннадан ортиқ.

Ҳозир бу усул германийни галлий ва арсений билан, индий антимонидини қалайи билан, галлий арсенидини германий ва селен билан легирлашда қўлланилмоқда.

Баён қилинган киришма киритиш усуллариининг ҳар бири ўзининг афзалликлари ва камчиликларига эга. Амалий масалаларни ечишда бу жиҳатни албатта эътиборга олинади.

2.6. КИРИШМАЛАРНИНГ ЭНЕРГИЯ САТҲЛАРИ

Киришмалар ҳақидаги маълумотни уларнинг яримўтказгичлар кристалларида электронлар учун ҳосил қиладиган энергия сатҳлари тўғрисидаги қисқача ахборот билан якунлаймиз.

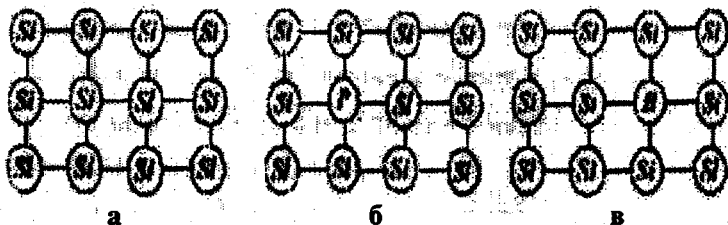
Кристалл панжарасига кириб олган киришмалар идеал кристалл панжараси қатъий даврийлигини бузувчи нуқ-

сонлардир 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 сатҳлари ярим-ўтказгичнинг тақиқланган зонасида жойлашган бўлади. Маҳаллий сатҳдаги электрон боғланган электрон бўлиб, уни эркин электронга айлантириш учун ёки валент зонадаги электронни маҳаллий сатҳга ўтказиш учун муайян энергия керак бўлади. Агар маҳаллий сатҳ ўтказувчанлик ёки валент зонасига яқин жойлашган бўлса, уни **саёз сатҳ дейилади**. Саёз сатҳдаги электронни фаоллаш энергияси (киришмани ионлаш энергияси) тақиқланган зона кенглиги E_g дан анча марта кичик бўлади.

Тақиқланган зонанинг ўрта қисмидаги маҳаллий сатҳлар **чуқур сатҳлар** деб аталади. Баъзи киришмалар саёз сатҳлар ҳосил қилса, баъзилари чуқур сатҳлар 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 электронни воситасида ковалент боғланган (I.17-а-расм). Агар шу панжарага 5 валентли элемент атоми (масалан, фосфор) киритилса, киришма атом кремний атоми ўрнига жойлашади (I.17-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 хонада тасвирланади (I.18-б-расм). Бу саёз сатҳ. Ўтказувчанлик хонасига 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 **п-тур яримўтказгич** дейилади. Агар кремнийга V элементлари (P, As, Sb) атомлари киритилса, кремний хона температурасида асосан электрон ўтказувчанликли (п-тур) яримўтказгич

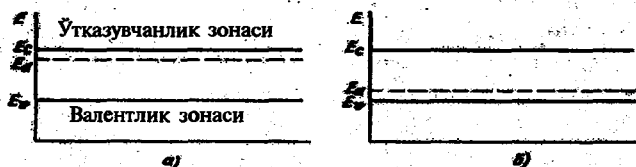
бўлади. Агар кремний (Si) кристаллига 3 валентли бор(B) атомлари киритилса, улар ҳам кремний атомлари ўрнига жойлашиб олади(1.17-в-расм).



1.17-расм. Кремний кристаллига киритилган киришмалар жойлаши-
ши: а-киришмасиз кремний кристали; б-фосфор киритилган кремний
кристали; в-бор (В) киритилган кремний кристали.

Бор (В) 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 (В) атоми кремний (Si) атомлари орасидаги боғланишдан (валент хонадан) тортиб олиши мумкин. Бунинг учун унча катта бўлмаган E_a энергия керак бўлади.

E_a ҳам хона температурасида кТ тартибидадир. Бу сатҳ ҳам тақикланган зонада. Аммо валент зона яқинида жойлаш-
ган (1.18-в-расм).



1.18-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 **компенсирилган яримўтказгичлар** дейилади. Компенсириланиш саёз ва чуқур сатҳлар мавжуд бўлганида ҳам содир бўлади.

Агар киришма атомлар зичлиги етарлича катта бўлса, кўшни 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 узоқда 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, улардан баъзилари: олтин (Au), кумуш (Ag), никель (Ni), темир (Fe), кобальт (Co), олтингургурт (S), қўрғош (Pb), платина (Pt), палладий (Pd).

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

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.

Назорат саволлари

1. Киришманинг аралашмадан фарқи нимадан иборат?
2. Киришмалар киритишнинг диффузия усулини тавсифланг.
3. Ионлар киритиш усули билан легирлаш қандай?
4. Эпитаксия усули билан легирлашни тавсифланг.
5. Трансмутацион легирлаш усулини тавсифланг.
6. Киришмалар электронлар учун қаерда ва қандай сатҳлар ҳосил қилади?
7. Кучсиз ва кучли легирланиш ҳолларини тавсифланг.

3-БОБ. ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАРДА ДИФФУЗИЯ ҲОДИСАЛАРИ

3.1. КИРИШ. ДИФФУЗИЯ ТЕНГЛАМАСИ

Биз юқорида яримўтказгичларга киришмалар киритишнинг диффузия усулини қисқача кўриб ўтдик. Умуман айтганда, диффузия-киришма атомлари ёки асосий модда атомларининг иссиқлик ҳаракати тақозо қилган кўчиш жараёни ҳар қандай агрегат(тўб) ҳолатдаги моддаларда кузатилади. Агар атомлар нотекис тақсимланган (зичлик градиенти) бўлса, зичликларни текислашга интилувчи диффузион оқим вужудга келади. Агар модда намунасида температура градиенти мавжуд бўлса ҳам диффузион оқим пайдо бўлади. Уни **термодиффузия** (Соре эффекти) дейилади.

Энг умумий ҳолда диффузион оқим кимёвий потенциал градиенти муҳиtida вужудга келади.

Бир ўлчовли (йўналишли) диффузия ҳолида J диффузион оқим N зичлик градиенти dN/dx га пропорционал бўлади:

$$J = -D \frac{dN}{dx}, \quad (I.15)$$

бунда, D — диффузия коэффициенти.

Иккинчи томондан бирлик ҳажмда вақт бўйича N зичлик ўзгариши J оқимнинг бирлик йўлда ўзгаришига тенг (узлуксизлик шарт):

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{dJ}{dx}. \quad (I.16)$$

Бу иккита тенгламадан

$$\frac{dN}{dt} = D \frac{d^2 N}{dx^2} \quad (I.17)$$

диффузия тенгламаси келиб чиқади. Д диффузия коэффициенти температурага, диффузияланаётган зарралар концентрациясига боғлиқ катталиқдир.

Бу тенгламанинг ечимлари Б.И.Болтаксининг «Диффузия в полупроводниках» (ГИЗ физмат., Москва, 1961) китобида батафсил қаралган. Биз бу ерда бу ечимларни айрим ҳоллар учун келтирамыз.

а) масалан, жисм чексиз бўлиб, унинг ичига диффузантининг дастлабки $t=0$ даги зичлиги N_0 бўлган чексиз юпқа қатламдан диффузия юз берса, бу ҳолда:

$$N(x, t) = \frac{Q}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right), \quad (I.18)$$

бунда, Q — катталиқ манбанинг кўндаланг кесими 1 см^2 юзига тўғри келган модда миқдори.

б) чекли $2h$ қалинликдаги қатламдан юз берадиган диффузия ҳолида:

$$N(x, t) = \frac{N_0}{2} \left(\operatorname{erf} \frac{h+x}{2\sqrt{Dt}} + \operatorname{erf} \frac{h-x}{2\sqrt{Dt}} \right). \quad (I.19)$$

в) агар жисм ичига диффузия яримчексиз фазодан юз берса, $N(x, 0) = N_0$ ($x < 0$):

$N(x, 0) = N_0$ ($x > 0$) бўлса, диффузия тенгламаси ечими:

$$N(x, t) = \frac{N_0}{2} \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right). \quad (I.20)$$

Мазкур китобда ярим чегараланган жисм учун диффузия тенгламасининг умумий ечими келтирилган:

$$N(x, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi Dt}} \int_0^\infty \left[N(\xi, 0) e^{-\frac{(\xi-x)^2}{4Dt}} + N_1(-\xi, 0) e^{-\frac{(x+\xi)^2}{4Dt}} \right] d\xi. \quad (I.21)$$

Бу ечим бир неча хусусий ҳолларда батафсил таҳлил қилинган ва соддалашган кўринишларга келтирилган. Булардан биз доимий манбадан диффузия ҳоли билан қаноатлансак, ечимнинг кўриниши

$$N(x, t) = N_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (I.22)$$

бўлади. Манба билан жисм чегараси $x=0$ текислик орқали модда оқими бу ҳолда

$$j(x, t) /_{x=0} = N_0 \sqrt{\frac{D}{\pi t}} \quad (I.23)$$

содда кўринишда бўлади. Жисм ичига t вақтда кирган модда миқдори:

$$Q = \int_0^t j(x, t) dt = \frac{N_0}{\sqrt{\pi}} 2\sqrt{Dt}. \quad (I.24)$$

3.2. СУҚИЛИШ ҚАТТИҚ ЭРИТМАЛАРИДА ДИФФУЗИЯ ҲОДИСАСИ

Бу ҳолда диффузия атомларнинг бир тугунлар оралиғидан иккинчисига кетма-кет ўтиб бориши кўринишида амалга ошади, бунда диффузияни зарраларнинг тартибсиз ҳаракати жараёни деб қаралиши мумкин. x ўқи йўналишида диффузияланувчи зарраларнинг зичлиги градиенти мавжуд деб фараз қилайлик. Ҳар бир элементар диффузия воқеаси x йўналишида x масофага зарраларнинг кетма-кет сакраши кўринишида юз бераётган бўлсин.

Ҳисоблаш бу ҳолда диффузия коэффиценти учун

$$D = \frac{(\Delta x)^2}{2\tau} \quad (I.25)$$

ифодага олиб келади. Аммо Δx кристалл панжараси d доимийсига пропорционал бўлиши равшан: $\Delta x \approx d$.

Бинобарин, энди

$$D = \alpha \frac{d^2}{\tau} \quad (I.26)$$

деб ёзса бўлади, бу ерда α -кристалл панжараси элементар катаги геометриясига боғлиқ кўпайтувчи. Масалан, ёқлама

ва ҳажмий марказлашган кубик панжаралар учун $\alpha = \frac{1}{12}$ ва

$\alpha = \frac{1}{24}$ қийматларни беради. t -атомларнинг бир тугунлар ора-

лигидан бошқасига ўтишининг ўртача вақти бўлиб, уни ҳисоблаб топилса, суқилма қаттиқ эритмаларда диффузия коэффицентини ҳисоблаб чиқариш мумкин. t ни ҳисоблаш анчагина мураккаб мулоҳазаларни талаб қилади, лекин уни ҳисоблаш йўли ишлаб чиқилган.¹

Элементар кристалларда ўз диффузия (ўз атомлари диффузияси) бир неча йўллар билан амалга ошиши мумкин. Кўпроқ ҳолларда атомларнинг вакансиялар бўйича кўчиши механизми амалга ошади, деган мулоҳаза бор.

3.3. ЎРИНБОСАР ҚАТТИҚ ЭРИТМАЛАРДА ДИФФУЗИЯ ҲОДИСАИ

Бу ҳолда ҳам диффузия механизми элементар кристаллардагидек бўлади ва эриган атомлар панжаранинг вакант тугунлари (вакансиялар) га сакраш йўли билан кристаллда кўчиб юриши мумкин. Агар эриган атом яқинида вакансия ҳосил бўлиши осонроқ бўлса, бу ҳолда диффузия атомлар ва вакансиялар бирлашмаси кўчиши йўли билан амалга ошиши мумкин. Ушбу гетеродиффузия жараёнига ўз диффузия йўлдош бўлади. Аммо вакансиялар ёт атомлар билан, эритувчи атомларига нисбатан, анча тез жой алмашинади, бинобарин, гетеродиффузия ўз диффузиядан устун келади.

Киркендал эффекти. Икки металл ёки икки қотишма ўзаро таъсири оқибатида ва уларнинг диффузия коэффицентлари турли бўлгани сабабли модданинг натижавий оқими вужудга келиши ва ажралиш чегарасининг кўчиши содир бўлади. Бу ҳодиса **Киркендал эффекти** дейилади. Бу эффект бир қатор қотишмаларда кузатилган Киркендал эффекти вужудга келишининг асосий шарти кўп таркибловчили тизимдаги айрим таркибловчилар диффузия коэффицентларининг ҳар хил

¹ Бу масала Б.И. Болтакс китобида баён қилинган.

бўлишлигидир. Диффузия вакансиялар ёки тугунлар оралиғи, ёнги кристалл доналари чегараси бўйлаб содир бўлганда, киркендал эффекти юз беради.

Реактив диффузия. Бир қатор ҳолларда диффузия жараёнлари диффузия соҳасида янги фазанинг—бошқа тузилишли ва ўзгача физик хоссали модда вужудга келишига сабаб бўлади. Янги фазанинг пайдо бўлишига бир қанча сабаблар бор. Мана улардан бири: асосий ва диффузияланувчи атомларда бир хил ҳолатлардаги валент электронларнинг бўлиши ва «яримўтказгичлик меъёрининг» бажарилишлиги оқибатида диффузия соҳасида $A^{III}B^V$, $A^{IV}B^{VI}$ ва ҳ.к. яримўтказгич бирикмалар пайдо бўлишига олиб келиши мумкин. Янги фазанинг вужудга келиши диффузия жараёнини секинлатишга олиб келади. Мана шу ҳодиса реактив диффузиядир.

3.4.КРЕМНИЙДА ДИФФУЗИЯ ҲОДИСАЛАРИ

Барча яримўтказгичларда диффузия ҳодисаларини баён қилиш имконияти ва зарурати бўлмаганлигидан электрониканинг асосий хом ашёси кремнийда юз берадиган диффузия ҳодисаларини қисқача баён қилиш билан чекланамиз.

3.4.1.КРЕМНИЙДА ДОНОР ВА АКЦЕПТОР КИРИШМАЛАР ДИФФУЗИЯСИ

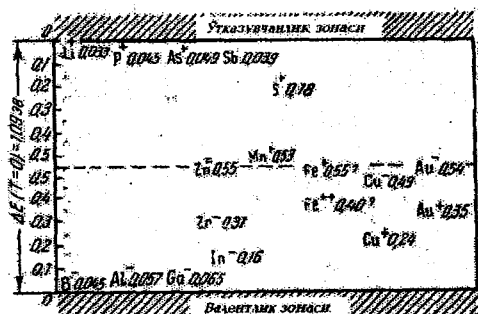
Кремнийда энг фаол киришмалар элементлар даврий тизимининг III ва V гуруҳ элементларидир. Бу элементлар ўринбосар қаттиқ эритма ҳосил қилиб, донор ёки акцептор сифатида ишлайди, кремний ўтказувчанлиги катталиги ва турини ўзгартира олади.

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 (I.20-расм).

Диффузия коэффициентларининг температурага боғланиши

$$D_{P,B \rightarrow Si} = 10,5 \exp\left(\frac{-8500}{RT}\right) \text{см}^2 / \text{с} \quad (\text{I.27})$$

ифода билан тавсифланади.

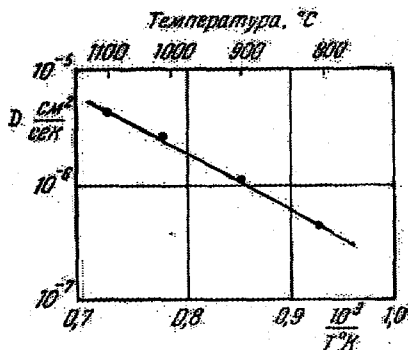


1.19-расм. Кремнийда киришмаларнинг энергетик сатҳлари.

Ўқувчи қизиқса, Б.И.Болтакс китобида бир қанча киришма элементларнинг кремнийдаги диффузияси ҳақидаги кенг маълумот билан танишиши мумкин.

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

$$D_{\text{Cu} \rightarrow \text{Si}} = 4 \cdot 10^{-2} \exp\left(-\frac{23000}{RT}\right) \text{см}^2 / \text{с}$$



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

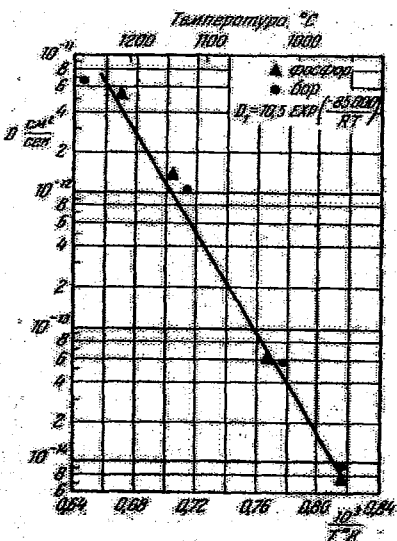
Мис ва литийдан ташқари яна қумуш, олтин, рух ва темир ҳам катта диффузия тезлигига эга, улар ўз электрик хоссалари бўйича кремнийда акцепторлар бўлади.

Доимий электрик майдон диффузия жараёнига таъсир кўрсатиши мумкин. 1.22-расмда кўрсатилган қурилмада анод ва катод орасига намуналар ўрнатилади.

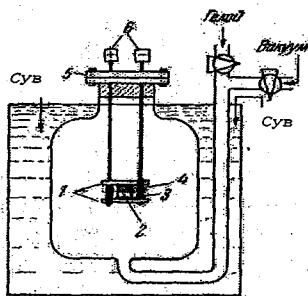
Таҳрибалар тасдиқлашча, 1200°С дан юқори-

да кремнийдаги олтин киришмаси анодга томон кўчади, 1200°C дан пастда эса катодга томон кўчади.

Кумуш 1280-1350°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.



1.21-расм. Кремнийда миснинг диффузияси.



1.22-расм. Яримўтказгичларда киришмалар электролитик кўчишини тадқиқлаш қурилмаси.

3.4.2. ГАЗЛАРНИНГ КРЕМНИЙГА КИРИШИ, ЭРИШИ ВА ДИФФУЗИЯСИ

Тажрибалар берган маълумотлар асосида кремнийдаги диффузия коэффиценти

$$D = 9,4 \cdot 10^{-3} \exp\left(-\frac{11000}{RT}\right) \text{см}^2/\text{с},$$

эрувчанлиги эса

$$S = 2,4 \cdot 10^{21} \exp\left(-\frac{43000}{RT}\right) \text{молек.см}^{-3} (P = 1 \text{атм})$$

ифодалар билан тавсифланиши мумкин.

Гелийнинг кремнийдаги диффузия коэффициенти ва эрувчанлиги қуйидагича:

$$D = 0,11 \exp\left(-\frac{29000}{RT}\right) \text{см}^2/\text{с},$$

$$S = 6,5 \cdot 10^{14} \exp\left(-\frac{11000}{RT}\right) \text{молек.см}^{-3} (P = 1 \text{атм})$$

Водород кремний панжарасида H_2 молекулалар кўринишида бўлади, балки у шу ердаги кислород билан боғланган.

Неон, аргон ва азотнинг кремнийга кириши кам 1200°C да у $5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ тартибида. Ушбу жадвалда германий ва кремний қуймаларида турли газлар зичлиги келтирилган:

3.1-жадвал

Киришма атом, см^3	H	O	C	N
Ge	$2,5 \cdot 10^{18}$	$3,6 \cdot 10^{18}$	$2,3 \cdot 10^{18}$	Йўқ
Si	$1,7 \cdot 10^{19}$	$1,5 \cdot 10^{19}$	$1 \cdot 10^{19}$	Йўқ

Кремнийда кўп миқдорда кислороднинг бўлиши бу кристаллнинг ёруғликнинг алоҳида ютиш тасмасини пайдо қилади, у кремнийда 9 мкм яқинида, германийда эса 11,6 мкм яқинида эди.

Кислороднинг кремнийдаги диффузияси ҳам ўрганилган. Кремнийни кислород атмосферасида қиздирилганда диффузион қатлам ҳосил бўлади. Унинг қалинлигини икки усул билан кремнийнинг едириш чуқурларини кузатиш ва ўша қатламнинг электрик хоссаларини тадқиқлаш усуллари билан аниқланган. Шу усуллар кремнийда кислород диффузия коэффициенти учун 1300°C да $D = 1,8 \cdot 10^{-10} \text{см}^2/\text{с}$ қиймат беради.

3.5. ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАРДА КИРИШМАЛАР ЭРУВЧАНЛИГИ

Қаттиқ жисмларда киришмалар диффузияси ва эрувчанлиги бир-бири билан чамбарчас боғланган. Бу икки ҳодиса киришма атомлари (ионлари) жойланадиган вакант (бўш) жойлар зичлигига ва киришма атомларнинг асосий модда атомлари билан боғланиш энергиясига боғлиқдир.

Яримўтказгичлар кристалларини олиш технологияси одатда юқори температурада (суялтириш ёки диффузион тўйинтириш йўли билан) муайян миқдорда киришма атомлар киритилган қаттиқ эритмалар пайдо қилиш билан боғлиқ бўлади. Кейинги совитишда ўта тўйинган қаттиқ эритмалар аста-секин парчаланиб, мувозанатий ҳолатга яқинлаша боради. Парчаланиш тезлиги ҳам диффузия тезлиги билан боғланган. Шунинг учун қаттиқ эритмалар парчаланиши муаммоси яримўтказгичлар технологиясининг муҳим масалаларидандир.

Яримўтказгичларда киришмалар эрувчанлиги ва ионланиши жараёнларини тавсифлаш учун физик кимёнинг таъсирлашувчи массалар қонуни ва қуйидаги икки муносабатидан фойдаланилади.

1.Эритма устидаги буғ босими нисбий пасайишини эритмада эриган модда нисбий зичлиги билан (моляр ҳиссаси билан) боғловчи муносабати:

$$\frac{P_0 - P}{P_0} = \frac{n}{N + n}, \quad (I.28)$$

бунда, n ва N — мос равишда, эриган модда ва эритувчининг моллари сони, P_0 — тоза модда (таркибловчи) буғи босими, P — эритмадаги эриган модда (таркибловчи) буғи босими. Бу муносабат **Рауль қонуни** дейилади.

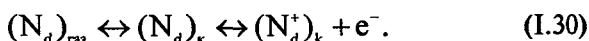
2.Ўзгармас температурада суюқликда газнинг x эрувчанлигини унинг, P босими билан боғловчи муносабат (**Генри қонуни**):

$$x = AP. \quad (I.29)$$

Бу қонунлардан фойдаланиш мисоли тариқасида яримўтказгичларда киришмалар эрувчанлигининг **электрוליтик моделини** қараймиз.

Газ (ташқи) фазадаги донор киришма билан муовзанатда турган n -тур яримўтказгични кўрамиз. Қуйидаги белгиларни киритамиз: N_d — яримўтказгичда донорлар зичлиги, n_d — донор сатҳларда электронлар зичлиги, n_c — ўтказувчанлик зонасида электронлар зичлиги, V_v — валент зонада коваклар зичлиги, E_d — донорларнинг ионланиш энергияси, E_F — кимёвий потенциал (Ферми) сатҳи. Электронлар ва коваклар эффектив массалари тенг деб оламиз.

Бу ҳолда эриш жараёни қуйидаги кимёвий реакция кўринишида ёзилади. N_d донор киришма қисман N_d^+ ионлар ва e^- электронларга парчаланади:



Бир вақтда электронлар валент зонадан ўтказувчанлик зонасига ўтади (**генерация**) ва тескари ўтиш (**рекомбинация**) юз бериб туради:



Ферми-Дирак статистикага асосан:

$$n_d = N_d / \left[1 + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{E_d - E_F}{kT}\right) \right]. \quad (I.32)$$

Генри қонунидан фойдалансак, уни ушбу ионланмаган донорларга (n_d) татбиқласак, донорлар босими учун

$$P_d = K_d^I n_d \quad (I.33)$$

ифода оламиз, бунда K_d^I — температурага боғлиқ доимий.

Хусусий ўтказувчанлик соҳасида ($E_F=0$):

$$P_d^0 = K_d^0 N_d \quad (I.34)$$

K_d ва K_d^I орасида боғланиш бор:

$$K_d^I = K_d \left(1 + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{E_d}{kT}\right) \right). \quad (I.35)$$

Бундан:

$$P_d = K_d \gamma_d N_d, \quad (I.36)$$

бунда

$$\gamma_{\alpha} = \left[1 + \frac{1}{2} \exp \frac{E_d}{kT} \right] / \left[1 + \frac{1}{2} \exp \left(\frac{E_d - E_F}{kT} \right) \right]. \quad (I.37)$$

донорларнинг «фаоллик коэффициенти».

Ковакли яримўтказгич учун ҳам шунга ўхшаш ифодалар олинади:

$$P_d = K_d \gamma_d N_d, \quad (I.38)$$

$$\gamma_d = \left[1 + \frac{1}{2} \exp \left(-\frac{E_d}{kT} \right) \right] / \left[1 + \frac{1}{2} \exp \left(-\frac{E_d - E_F}{kT} \right) \right]. \quad (I.39)$$

Киришма концентрацияси кам бўлганда, классик статистика

$$n_d = 2N_d \exp \left(-\frac{E_c - E_F}{kT} \right) \quad (I.40)$$

ва

$$v_s = 2N_s \exp \left(-\frac{E_c + E_F}{kT} \right) \quad (I.41)$$

ифодаларни беради.

n-тур яримўтказгич ҳолида таъсирлашувчи массалар қонуни

$$K_+ = \frac{[N_k^+][e^-]}{[N_k]} = \frac{(N_d - n_d)n_e}{n_d} \approx \frac{N_d n_e}{n_d} \quad (I.42)$$

кўринишни олади.

Зоналараро электронлар ўтиши учун мазкур қонун

$$[e^+][e^-] = K_0 \quad (I.43)$$

ёки

$$n_e v_s = K_0 = n_i^2 \quad (I.44)$$

кўринишни олади.

Юқоридаги ифодалардан мувозанатий K_+ ва K_0 доимийлар боғланиши келиб чиқади. Унча мураккаб бўлмаган ҳисоблашлардан яримўтказгичдаги донорлар зичлиги учун

$$N_d = K_d / \sqrt{K_d + n_i}, \quad (I.45)$$

акцепторлар зичлиги учун

$$N_a = K_a / \sqrt{K_a + n_i^2} \quad (I.46)$$

ифодаларни олинади, $K_d = K_+ n_d$ ва $K_a = K_+ n_a$ катталиклар фақат температура функциялари:

$$K_{d,a} \approx T^{3/2} \exp(B/T). \quad (I.47)$$

Олинган N_d ва N_a учун ифодалар, бинобарин, яримўтказгичда киришмалар эрувчанлигининг температурага боғланишини ифодалайди. Паст температуралар соҳасида $K_d > n_i^2$, шунинг учун $N_d \approx K_d^{1/2}$ ва эрувчанлик орта боради. Юқори температуралар соҳасида $n_i^2 > K_d$, демак, бу ҳолда эрувчанлик температура ошган сари камайиб боради. Бундай ретроград (орқага қайтадиган) эрувчанлик кўп ярим-ўтказгичларда кузатилади.

3.6. СЕГРЕГАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТИ

Қаттиқ фазадаги ва суюқ фазадаги киришмалар мувозанатий зичликлари нисбатини **сегрегация (тақсимот) коэффиценти** дейилади:

$$K_0 = \frac{N_k}{N_c}. \quad (I.48)$$

Умумий ҳолда мувозанатий сегрегация коэффиценти киришма атомлар табиати ва зичлигига ва уларнинг энг кўп эрувчанлигига боғлиқ. Айнимаган яримўтказгичларда K_0 фазалар диаграммасида солидус ва ликвидус чизиқлари нисбати сифатида аниқланади.

Термодинамик муносабатлардан сегрегация коэффиценти учун қуйидаги тенглама келтириб чиқарилган:

$$\lg K_0 = \frac{\Delta H^c - \Delta H^k}{RT} + \frac{\sigma - \Delta S^c}{R} + \ell g \gamma. \quad (I.49)$$

Бу ифодада ΔH^c — киришманинг суюлиш иссиқлиги, ΔS^c — киришма суюлиши энтропияси, ΔH^k — киришмавий кристаллдан кристалл-эритувчига атомларнинг ўтиш энергияси, σ — бу ўтишда юз берадиган энтропия ўзгариши, γ — «фаоллик коэффициенти».

Бу тенгламадан сегрегация коэффициенти нинг температурага боғланиши ҳам келиб чиқади. Унинг ечимини муайян шароит учун соддалаштирилса,

$$\ln K_0 = \frac{1}{T_c} T_c \ln K_c \quad (1.50)$$

ифода олинади ва у сегрегация коэффициенти нинг $\frac{1}{T}$ каби ўзгаришини ва $T \rightarrow \infty$ бўлганда $K_0 \rightarrow 1$ бўлишини кўрсатади (K_0 — тоза эритувчи суюлиши температурасидаги сегрегация коэффициенти, T_c , K_c — суюлмага тегишли катталиклар).

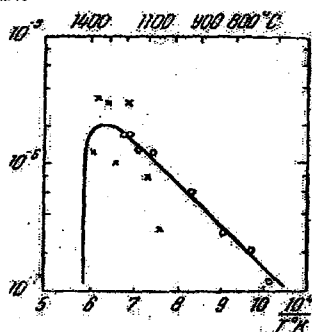
Кремнийда баъзи киришмаларнинг энг катта эрувчанлиги ва сегрегация коэффициенти қийматлари қуйидаги жадвалда келтирилган:

3.2-жадвал

Элемент	Тетраэдр-рик-ковалиент радиус, A^0	Максимум соҳада эрувчанлик	Сегрегация коэф-ти	Элемент	Тетраэдр-рик-ковалиент радиус, A^0	Максимум соҳада эрувчанлик	Сегрегация коэф-ти
Li	-	$7 \cdot 10^{19}$	$1 \cdot 10^{-2}$	P	1,10		0,35
Au	1,50	$1 \cdot 10^{17}$	$3 \cdot 10^5$	As	1,18		0,3
Cu	1,35	$3 \cdot 10^{18}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	Sb	1,36		0,4
B	0,88	-	0,9	Fe		$5 \cdot 10^{16}$	$8 \cdot 10^{-6}$
Al	1,26	$1,7 \cdot 10^{20}$	-				
Ga	1,58		$1 \cdot 10^{-2}$				

Эрувчанликнинг ретроград характерини тасдиқлайдиган тажриба маълумотларидан бири кремнийда алюминийнинг эрувчанлиги графигидир (1.23-расм). Баъзи маълумотларга кўра, кремнийда олтиннинг, кумушнинг, миснинг, литийнинг, алюминийнинг, рухнинг эрувчанлиги ҳам ретроград характерга эга.

ат. %



1.23-рasm. Кремнийда алюминийнинг эрувчанлиги.

1.24-рasmдан кўринишича, баъзи тадқиқотларга кўра, Au нинг Si да эрувчанлиги 1000° C даги $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ дан 1250° C да $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ гача ортади, аммо 1380° C да 2 мартадан ортиқ камаяди. Кумуш Ag нинг Si даги эрувчанлиги ҳам худди шундай характерли бўлади.

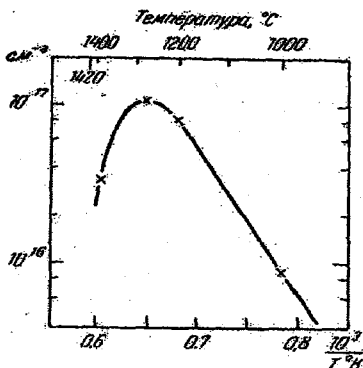
Моддаларни йўналган кристаллашда — қаттиқ фазани суюлмани секин ва йўналган совилиши йўли билан ҳосил қилинганда сегрегация оқибатида қуйма узунлиги бўйича ки-

ришма қайта тақсимланади.

Агар киришма суюлманинг қотиш температурасини пасайтурса ($K_0 < 1$), киришма намунанинг энг охирда кристалланувчи қисмида йиғилади. Бу ҳолда қаттиқ фаза киришмани суюқ фазага суради, бинобарин, суюлма киришма билан бойийди. Аксинча, агар киришма суюлманинг қотиш температурасини кўтарса ($K_0 > 1$), унда киришма намунанинг биринчи навбатда кристалланувчи қисмида йиғилади.

Тавсифланган сегрегация ҳодисалари ҳозирги вақтда моддани йўналган кристаллаш йўли билан тозалаш технологиясида кенг қўлланилмоқда (Чохральский усули, зонавий суюлтириш усули билан кристалл олишда ва ҳ.к.).

Бундай ҳолларда тозалаш жараёнини микдорий тавсифлаш учун K_0 ўрнига эффектив сегрегация коэффициенти $K_{\text{эфф}}$ киритилади. У кристаллнинг ўсиш тезлиги, йўналганлигига, шунингдек, суюлманинг аралаштирилуви даражасига боғлиқ. Унинг ифодаси:



1.24-рasm. Кремнийда олтиннинг эрувчанлиги.

$$K_{\text{эфф}} = \frac{K_0}{K_0 + \left[1 - K_0 \exp\left(-\frac{v}{v_d}\right) \right]}, \quad (I.51)$$

бунда, v — кристаллнинг ўсиш тезлиги (қаттиқ фаза — суюқ фаза чегарасининг кўчиш тезлиги), v_d — ўсиш тезлигининг характеристик доимийси бўлиб, у суюлмани аралаштирилуви ва диффузия коэффициентига боғлиқ.

Агар $v \rightarrow 0$ бўлса, $K_{\text{эфф}} \rightarrow K_0$ бўлади. Унча катта бўлмаган v лар учун ($v < v_d$):

$$K_{\text{эфф}} = K_0 \exp(-v / v_d). \quad (I.52)$$

Агар $v \rightarrow \infty$ бўлса, $K_{\text{эфф}} \rightarrow 1$ бўлади. Демак, суюқ ва қаттиқ фазалар орасида киришмалар қайта тақсимланиши тўхтайди.

Назорат саволлари

1. Диффузия ҳодисаси нимадан иборат?
2. Диффузия тенгламаси қандай шаклланади?
3. Қаттиқ жисмларда диффузия ҳодисаси қандай кечади?
4. Кремнийда диффузия ҳодисаси хусусиятларини тавсифланг.
5. Газларнинг кремнийга кириши қандай юз беради?
6. Яримўтказгичларда турли киришмалар эрувчанлиги ҳақида нималарни биласиз?
7. Сегрегация коэффициенти нимани ифодалайди?
8. Сегрегация коэффициентини тақсимот коэффициенти ҳам дейилади. У нималарга боғлиқ?

4-БОБ. ЭНГ МУҲИМ ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ХОССАЛАРИ

Яримўтказгичлар электроникаси саноатида энг кўп қўлланаётган яримўтказгич моддалар билан танишиб чиқайлик.

4.1. КРЕМНИЙ (Si)

Яримўтказгичли асбоблар ва тизимлар ишлаб чиқаришда энг кўп ишлатилаётган модда кремнийдир. У элементлар даврий тизимида 14-ўринда туради. Атом оғирлиги 28, унинг энг катта валентлиги 4, суюлиш температураси (нормал босимда) 1414°C, қаттиқ кремнийнинг зичлиги 2,33 г/см³, диэлектрик сингдирувчанлиги $\epsilon=11,7$, диамагнетик.

Хона температурасида кремний кимёвий жиҳатдан барқарор, сувда эримайди, кўп кислоталарга нисбатан бардошли. Аммо, у нитрат ва фторид кислоталар аралашмасида яхши эрийди:



Кремнийнинг сиртини тозалаш мақсадида ишқорий едирувчилар қўлланади. Силлиқлаш учун юқоридаги аралашма асосидаги едирувчилар ишлатилади.

Ишқорий эритмаларда кремний



реакция бўйича яхши эрийди.

Кремний ҳавода 900°C гача қиздирилганда барқарор қолади. Аммо юқорироқ температураларда оксидланади. Водород билан кремний 2000°C чамасидаги температурада бевосита реакцияга киришади, $\text{Si}_n\text{H}_{2n+2}$ силанлар ҳосил бўлади.

Азот билан кремний 1100°C-1300°C да реакцияга киришиб, нитридлар ҳосил қилади.

Кремний галогенлар билан осон таъсирлашади: фтор билан хона температурасида, хлор билан 200°C-300°C да, бром билан 450°C-500°C да, йод билан 700°C-750°C да.

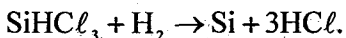
Суюлган кремний юқори кимёвий фаолликка эга бўлади. Кремний монокристалларини ўстириш учун энг мақбул модда синтетик кварц — SiO_2 дир.

Электрик хоссалари. Яримўтказгичларнинг электрик ўтказувчанлиги $\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p)$ ифода билан тавсифланиши маълум.

n -тур яримўтказгичда ўтказувчанлик $\sigma = en\mu_n$, бунда (киришма тўла ионлашадиган температураларда) электронлар зичлиги n донор киришма зичлиги N_d га тенг, яъни N_d бўлиши керак эди. Бу тенглик киришмаларнинг муайян миқдоригача сақланади. Аммо киришмалар зичлиги етарлича юқори бўлганда бу тенглик сақланмайди ($n < N_d$ бўлади). Бу ҳодисани «**легирловчи киришмаларнинг политропияси**» дейилади. Унинг сабаби — етарлича кўп миқдорда яримўтказгичга киритилган киришма унда турли ҳолатда бўлиши мумкин. Масалан, киришма яримўтказгичнинг атомлари ёки унинг тузилиши нуқсонлари билан бирлашмалар ҳосил қилиши, тугунлар орасига жойлашиши ва ҳ.к. бўлишидир. Бундай ҳолатларнинг бирида киришма кристаллда электрик фаол, бошқаларида — нейтрал ҳолатда бўлиши мумкин. Политропия ҳодисаси юз бера бошлайдиган легирловчи киришмалар зичлигини **бўсағавий зичлик** дейилади. Ундан юқори зичликларда яримўтказгич кучли легирланган бўлиб қолади.

Кремнийнинг (К) электрон (Э) турдаги монокристаллари фосфор (Ф) билан легирланади, ковак турдагиси бор (В) билан легирланади. Шунинг учун уларни КЭФ ёки КДБ тарзида белгиланади.

Трихлорсиланни водород билан тиклаб кремний олинади:



4.2. ГЕРМАНИЙ (Ge)

У элементлар даврий тизимида 32-ўринда туради, атом оғирлиги 72,5, энг катта валентлиги 4, суюлиш температураси 936°C , зичлиги $5,3 \text{ г/см}^3$, диэлектрик сингдирувчанлиги 16, диамагнетик.

Хона температурасида германий кимёвий жиҳатдан барқарор. Сувда деярли эримайди. 2-3 мол/л зичликдаги азот кислота эритмасида сезиларли эрийди, аммо кислота зич-

лиги катталашганда, сиртида GeO_2 оксид пардаси ҳосил бўлиб, эрувчанлик жуда камайиб кетади.

Хона температурасида германийни шоҳ ароги (HF), водороднинг H_2O_2 оксиди ва оксидловчи едирувчилар фаол эритадилар.

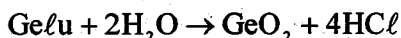
Ҳавода 700°C дан юқорида қиздирилса, германий оксидланади, шу температураларда уни углерод оксиди ҳам оксидлаб қўяди. GeO оксид қора кукун, уни 700°C дан юқорида осон ҳайдаш мумкин.

1100°C дан юқорида германий водород билан реакцияга киришиб, $\text{Ge}_n\text{H}_{2n+2}$ бирикмалар ҳосил қилади. Аммо у азот билан таъсирлашмайди.

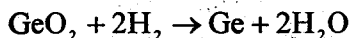
Суюқ германий 1500°C гача температураларда на углерод (C), на кремний оксиди (SiO_2) билан таъсирлашмайди. Бу хислат туфайли германийни графит (C) ва кварц (SiO_2) идишларида сақлаш мумкин.

Германийнинг электрик хоссалари кўп жиҳатдан кремнийникига ўхшаш, чунки улар IV гуруҳ элементларидир.

Тозаланган тетрахлородни сувда гидролиз қилиш йўли билан даставвал германий IV оксид олинади:



GeO_2 IV оксидни тоза водород билан тиклаб, элементар германий олинади:



4.3. ГАЛЛИЙ ФОСФИДИ (GaP)

Галлий фосфиди юқори кимёвий барқарорликка эга: у 700°C — 800°C гача ҳаводаги кислород билан таъсирлашмайди: кислотали ва ишқорли кўп эритмаларга нисбатан ҳам барқарор. Галлий фосфидининг эриш тезлиги азот кислотада (хона температурасида) $0,16\text{ мг/см}^2$ соат, қайнаётган туз кислотада (110°C) $0,01\text{ мг/см}^2$ соат, азот ва туз кислоталари қайнаётган (1:3) аралашмасида $7,8\text{ мг/см}^2$. Кислоталар аралашмасига водород пероксид қўшилса, GaP нинг эрувчанлиги кескин ортиб кетади.

Галлий фосфиди кислоталарда эриганида кучли заҳарловчи фосфин PH_3 ажралади. $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ бирикмаларнинг бошқалари ҳам кислоталар билан ана шундай таъсирлашади.

GaAs ва InAs-арсин AsH_3 ; InP-фосфин PH_3 ва INSb-стибин SbH_3 дан иборат заҳарли моддалар ажратади.

Суyoқ GaP барча контейнер моддалари билан фаол таъсирлашади, чунки унинг суyулиш температураси $\sim 1500^\circ\text{C}$. Поликристалл GaP синтез қилиш учун топ-тоза графит. Монокристалл GaP ўстириш учун кварц контейнер вазифасини бажаради.

Яримўтказгич $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ бирикмаларда (GaAs, GaP..) II гуруҳ элементлари акцептор, VI гуруҳ элементлари донор бўлади.

IV гуруҳ элементлари атомлари галлий атомлари ўрнига жойлашган бўлса, улар донор, агар фосфор арсений ўрнига жойлашса, акцептор вазифасини ўтайди.

Легиранмаган GaP электрон турдаги ўтказувчанликка эга, бунда $n > 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $\mu < 120 \text{ см}^2/\text{Вс}$. Те ва S билан легиранган GaP кристалларида асосий заряд ташувчилар — электронлар-зичлиги $(1,25 \div 40) 10^{17} \text{ см}^{-3}$, ҳаракатчанлиги $(110-60) \text{ см}^2/\text{Вс}$. Ковак турдаги GaP да коваклар ҳаракатчанлиги $20 \text{ см}^2/\text{Вс}$. Баъзи киришмали GaP нинг солиштирма қаршилиги 10^6 Ом см дан ортиқ.

4.4. ГАЛЛИЙ АРСЕНИДИ (GaAs)

Галлий арсениди сув билан таъсирлашмайди, кислота-лар билан фаол таъсирлашиб, заҳарли AsH_3 арсин модда ажратади. Галлий арсениди эрувчанлиги кислоталар аралашмасида анча катта бўлади. Унинг эрувчанлиги туз кислота эритмасида $2 \cdot 10^{-5} \text{ мг/см}^2$ соат, туз ва азот кислоталар сувли аралашмасида (1:1:1) — 60 мг/см^2 соат, азот ва фторид кислоталар сувли эритмасида 1200 мг/см^2 соатгача.

300°C гача қиздирилганда GaAs оксидланмайди, 600°C дан бошлаб у парчаланиб, арсенийни ажратади. Суyoқ GaAs жуда фаол. GaAs технологиясида синтетик кварц (SiO_2) энг кўп қўлланилади.

GaAs нинг зичлиги $5,32 \text{ г/см}^3$, суyулиш температураси 1238°C .

Легиранмаган GaAs монокристаллари n-тур ўтказувчанликка эга, бунда $n < 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ва ҳаракатчанлик $\mu > 4200 \text{ см}^2/\text{Вс}(300\text{K})$ n-GaAs монокристалларини Те ёки Sn билан легиранади. p-GaAs монокристалларини Zn билан легиранади. Кўп ҳолда GaAs (ярим-изоляцияловчи) монокристалларини

хром Cr билан легирланса, уларнинг солиштирма қаршилиги $1 \cdot 10^5$ дан $1 \cdot 10^7$ Ом см гача бўлади.

GaAs кристалларини $[111]$ ва $[100]$ йўналишларда ўстирилади.

4.5. ИНДИЙ ФОСФИДИ (InP)

InP сувда эримайди. Унинг энг яхши эритувчиси туз кислотаси бўлиб, кислота зичлиги ортиши билан InP нинг эриш тезлиги ортиб кетади, аммо бунда заҳарли фосфин PH_3 ажралиб чиқади. Зичлиги $4,80 \text{ г/см}^3$, суюлиш температураси 1058°C .

300°C гача қиздирилганда InP оксидланмайди, юқори-роқ температураларда парчаланиб, фосфорни ажратади. Суюқ InP кварц билан сул таъсирлашади, шунинг учун InP ни ўстириш қурилмаларида синтетик кварц қўлланилади.

Легирланмаган InP кристалларида заряд ташувчилар зичлиги $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ дан ортиқмас, ҳаракатчанлик $3000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{С}$ дан кам эмас.

$n\text{-InP}$ монокристалларини Te ва Sn билан легирланади. Уларда $n = (5 \div 500) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; $\mu_n = (2500 \div 1000) \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{С}$.

Рух билан легирланган $p\text{-InP}$ да $P = (5 \div 8) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Ярим изоляцияловчи InP монокристалларини темир (Fe) билан легирланади. Уларда $\rho > 1 \cdot 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

4.6. ИНДИЙ АРСЕНИДИ (InAs)

InAs сувда эримайди, туз кислотада $+75^\circ\text{C}$ да едирилиш тезлиги $300 \text{ мг}/(\text{см}^2 \cdot \text{соат})$. Азот кислота қўшилса, бу тезлик ошиб кетади. InAs кислоталарда эриганда заҳарли AsH_3 арсин ажралади.

450°C дан юқорида InAs ҳавода оксидланади. Вакуумда 700°C яқинида ва ундан юқорида InAs парчаланиб, арсенийни ажратиб чиқаради. Зичлиги $5,67 \text{ г/см}^3$, суюлиш температураси 942°C .

Легирланмаган индий арсениди монокристалларида асосий заряд ташувчилар зичлиги $(3 \div 5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, ҳаракатчанлиги $(3 \div 4) \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ (77Кда).

Te ва Sn билан легирланган InAs монокристаллари p -тур ўтказувчанликка эга, $n = (1 \cdot 10^{16} \div 8 \cdot 10^{19}) \text{ см}^{-3}$ (77Кда). InAs кристаллари $[111]$ йўналишда ўстирилади.

4.7.ИНДИЙ АНТИМОНИДИ (InSb)

InSb сувда эримаиди, кислоталарда яхши едирилади: азот кислотада едирилиш тезлиги $360 \text{ мг}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$, HNO_3 : HF : $\text{H}_2\text{O}=1:1:1$ аралашмада $480 \text{ мг}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$ ва ҳ.к. InSb нинг кислоталарда эришида заҳарли SbH_3 стибин ажралади. InSb зичлиги $5,78 \text{ г}/\text{см}^3$, суюлиш температураси 525°C . InSb нинг ҳавода оксидланиши 500°C дан юқорида бошланади.

Легирланмаган ёки Ge, Zn ёки Mn билан легирланган InSb монокристаллари p-тур ўтказувчанликка эга:

$$\rho = (1 \cdot 10^{12} \div 1 \cdot 10^{18}) \text{ см}^{-3}, \rho \approx 500 \text{ Ом} \cdot \text{см},$$

$$\mu = (3 \div 5) 10^3 \text{ см}^2 / \text{Вс} (77 \text{ K})$$

Теллур билан легирланган InSb<Te> монокристаллар n-тур ўтказувчанликка эга:

$$n = (8 \cdot 10^{13} \div 5 \cdot 10^{18}) \text{ см}^{-3},$$

$$\rho \approx 50 \text{ Ом} \cdot \text{см}, \mu = (7 \div 8) \cdot 10^{+5} \text{ см}^2 / \text{Вс} (77 \text{ K})$$

Индий антимониди InSb монокристалларини (211) кристаллографик йўналишда ўстирилади.

Назорат саволлари

1. Кремнийнинг қандай хоссаларини биласиз?
2. Германийнинг қандай хоссаларини биласиз?
3. Галлий фосфиди ва галлий арсенидининг кимёвий хоссалари тўғрисида нималарни эслаб қолдингиз?
4. A^{III}B^V яримўтказгич бирикмалар билан ишлаганда қайси шароитда ва қанақа заҳарли моддалар ажралиб чиқади?

ИККИНЧИ ҚИСМ

ЯРИМЎТКАЗГИЧ МОДДАЛАР ОЛИШ ТЕХНОЛОГИЯСИ

КИРИШ

Электрон техникасининг ҳозирги замон жамият ҳаётида тобора кенг ва салмоқли ўрин эгаллаётгани кўпчиликка маълум. Қаттиқ ва суяқ ярим ўтказгичлар ва диэлектриклар асосида тайёрланган асбоблар, қурилмалар, интеграл схемалар автоматикада, телемеханикада, радиоэлектроникада, ҳисоблаш ва бошқарув техникасида, медицинада, транспортда, энергетикада, қуёш энергиясини электрик энергияга ва бошқа энергия турларига айлантиришда ва жамият ҳўжалигининг бошқа кўп соҳаларида самарали хизмат қилмоқдалар.

Электрон техникасининг янада ривожланиб бориши учун электрон саноатини юқори сифатли материаллар билан таъминлайдиган келажаги бор, арзон, экологик тоза, чиқиндисиз технологик жараёнларни жорий қилиш зарурий шартдир.

5-БОБ. ЭЛЕКТРОН ТЕХНИКАСИ МОДДАЛАРИ ТЕХНОЛОГИЯСИ АСОСИЙ ЖАРАЁНЛАРИ УМУМИЙ ТАВСИФИ

5.1. ТЕХНОЛОГИК ЖАРАЁН. АСОСИЙ ТУШУНЧАЛАР

Технологик жараён таркибига хом ашёдан ўтказгич, яримўтказгич, диэлектрик ва магнетик моддалар ҳосил қилинадиган усуллар ва жараёнлар киради.

Хом ашёни қайта ишлаш(ишлаб чиқариш) усули кетмакетлиги тавсифини **технологик схема** дейилади.

Электрон техника материаллари бир қатор содда физик, физик-кимёвий ва кимёвий жараёнлар(амаллар) ёрдамида ҳосил қилинади:

1) хом ашёни тайёрлаш ва реакцияга киришувчи (реагент) таркибловчиларни реакция зонасига келтириш;

2) кимёвий реакциялар;

3) реакция зонасидан маҳсулотларни олиб кетиш ва керакли маҳсулотни ажратиб олиш.

1) босқичда физик жараёнлар юз беради, 2) босқичда модданинг фақат физик хоссаларини эмас, балки унинг туб ҳолатини ва кимёвий таркибини ўзгартирувчи жараёнлар содир бўлади, 3) босқичда кимёвий ўзгаришлар йўқ, бунда асосий маҳсулот, йўлакай маҳсулотлар ва қолдиқ реагентлар (улар яна такрорий жараён бошланишига қайтарилиши мумкин) ажратилади.

Технологик жараёни ташкиллаш ва оптималлаш учун технологик режим(маром) катта аҳамиятлидир.

Технологик режим деб, жараён суръатига, маҳсулотнинг миқдори ва сифатига таъсир кўрсатадиган асосий омиллар (параметрлар) тўпламига (мажмуига) айтилади. Кўп ҳолда электрон техника материалларини олиш жараёнларида асосий параметрлар температура, босим, реагентларни келтириш ва кўчириш усули ва бошқалар бўлади.

Технологик жараёнлар унинг вақт ўтиши билан кечилиши бўйича даврий, узлуксиз ва қўшма (комбинацион) жараёнларга бўлинади.

Даврий жараёнда унинг ҳамма босқичларининг кечими бир жойда бўлади, аммо у ҳолда барқарор ҳолат бўлмайди.

Узлуксиз жараёнда унинг барча босқичлари вақти бирдай, барқарор ҳолат бўлади, натижавий маҳсулот узлуксиз ажратиб олинади.

Қўшма(комбинацион) жараёнда айрим босқичлар даврий равишда, бошқалари узлуксиз йўсинда кечади.

Жараёнининг кечилишини аниқловчи параметрлар асосий гуруҳи қуйидагилардир:

1. **Кириш параметрларига** тажрибада аниқланиши мумкин, аммо жараён мобайнида ўзгартириб бўлмайдиган катталиклар мансуб бўлади.

2. **Натижавий маҳсулотнинг чиқиш параметрларига** кириш, бошқариш ва назорат қилинмайдиган омиллар таъсир қиладиган тизимда ўрганилаётган жараён режими (мароми) билан аниқланадиган тизим характеристикалари мансуб бўлади.

3. **Бошқарувчи параметрлар** қўйилган талабларга кўра, таъсир кўрсатиш мумкин бўлган жараён параметрларидир.

4. **Назорат қилинмайдиган** параметрлар қиймати тасодифан ўзгарадиган ва ўлчаб бўлмайдиган параметрлардир.

Электрон техника материаллари (моддалари) технологиясида қуйидаги асосий моделлар тизими ишлаб чиқилган: жараёнларни тадқиқлаш, технология ҳисоб-китоби ва оптималлаш, жараённинг вақт бўйича юз бериш оптимал йўлини олдиндан аниқлаш, барқарорлаштириш ёки кузатиб бошқариш, ўргатиш ва машқлантириш мажмуалари асосида малакани ошириш автоматик тизимлари моделлари мавжуд.

ЭХМ ёрдамида технологик жараёнлар ўрганилади, турли шароитда уларнинг хулқ-атвори моделланади, оптимал технологик параметрлар ва режимлар аниқланади.

5.2. ГЕТЕРОГЕН КИМЁВИЙ-ТЕХНОЛОГИК ТИЗИМЛАРНИНГ АСОСИЙ ЖАРАЁНЛАРИ

Электрон техника материалларини олишнинг ҳақиқий жараёнлари сарлавҳа номидаги жараёнлардир. Асосий кимёвий жараёнга қўшиладиган энг муҳим физик жараёнлар дастлабки реагентларнинг реакция зонасига келтирилиши ва бу зонадан реакция маҳсулотлари олиб кетилишидан иборат масса-кўчиш ва реакция зонаси билан атроф-муҳит орасида иссиқлик узатиш жараёнларидир.

Масса-кўчиш модданинг бир фазадан иккинчи фазага кўчишидан иборат бўлиб, ҳам гетероген, ҳам гомоген тизимларда (газлар аралашмаси, суюқ ёки қаттиқ эритмалар ва б.) ажратиш ва ҳосил қилиш мумкин.

Масса-кўчиш жараёнларининг ҳаракатлантирувчи кучи турли жойларда кимёвий потенциалларнинг фарқли бўлишидир. Содиқ ҳолларда бир фаза ичида диффузияланувчи модда зичлиги (концентрацияси) катта жойдан у кичик бўлган жойга томон кўчади, жараённинг ҳаракатлантирувчи кучи тақрибан зичликлар фарқи (градиенти) орқали ифодаланади. Ҳақиқий ҳолларда масса-кўчиш жараёни йўналишини аниқлашда температура градиенти ва ташқи кучлар босимлари градиенти ҳам ҳисобга олинishi керак. Масса-кўчиш жараёни ниҳояси тизимнинг мувозанатий ҳолатга эришишидир.

Масса-кўчиш тезлиги орасида бу жараён юз бераётган фазаларда тақсимланган модда кўчиши механизми билан боғлиқ.

Қаттиқ фаза ва ҳаракатланаётган суюқ (газ ёки буғ) фаза орасида масса- кўчиш икки жараёндан иборат: 1) қаттиқ жисм ичида тақсимланган модданинг ички масса бериш ёки масса ўтказувчанлик туфайли фазалар чегараси сиртига томон кўчиши; 2) ўша модданинг суюқликда (газда ёки буғда) ташқи масса бериш йўли билан кўчиши. Демак, массани узатиш ички ва ташқи диффузиядан иборат.

Қаттиқ жисмда модда кўчиши жараёни молекуляр диффузия ҳоли учун Фик қонунларига бўйсунди ва қуйидаги дифференциал тенгламалар орқали тавсифланади:

$$\vec{I} = -D\nabla C,$$

$$\frac{dC}{dt} = D\left(\frac{d^2C}{dx^2} + \frac{d^2C}{dy^2} + \frac{d^2C}{dz^2}\right); \quad \frac{dC}{dt} = -\operatorname{div}\vec{I}.$$

бунда, D —диффузия коэффиценти, C — диффузияланувчи модда зичлиги (концентрацияси), $\vec{I}$ — масса диффузион оқими. Бу тенгламалар тизимини ечиб вақт ва координата функцияси сифатида C зичлик (концентрация) ифодаси олинади, табиий, у орқали диффузион масса оқими аниқланади.

Масса узатишнинг назарий моделлари қуйидаги фазаларга асосланади:

1. Модданинг фазадан фазага масса-кўчишига умумий қаршилиги икки фазанинг ва чегара сиртининг қаршиликлари йиғиндисидан иборат. Кўпинча, чегара сирти қаршилиги йўқ деб ҳисобланади. Ҳар бир фаза ичидаги жараёнлар бир-биридан мустақил кечади.

2. Фазалар чегараси сиртида улар мувозанатда бўлади. Бунда фазанинг асосий массаси ўртача зичлиги ўзгаришига нисбатан мазкур мувозанат анча тез ўрнашади.

Иссиқлик узатиш жараёнларининг ҳаракатлантирувчи кучи температуралар фарқидир. Иссиқлик узатишнинг, маълумки уч содда усули—иссиқлик ўтказувчанлик, нурланиш ва конвекция усуллари мавжуд. Технологик жараёнларда бу уч усул ҳам қатнашиши мумкин. Бизни қизиқтираётган материаллар олиш жараёнларида иссиқликнинг узатилиши фазаларнинг

чегараси қўзғалувчан ёки эркин бўлган ҳоллар учун тузилган дифференциал тенгламалар асосидаги масалалар муҳим аҳамиятга эга. Бу масалалар умумлаштирилиб, **Стефан масалалари** дейилади.

Бу масалаларда фазалар чегарасида иссиқлик оқими узлуксиз бўлади, деган шарт қўйилади. Бу шарт суюлма кристалланаётган ҳол учун қуйидагича:

$$\lambda_1 \frac{dT_1}{dn} - \lambda_2 \frac{dT_2}{dn} = \rho L \frac{d\xi}{d\tau},$$

бунда, λ — солиштирма иссиқлик ўтказувчанлик, L — суюлиш яширин иссиқлиги, ξ — кристалланиш фронти координатаси, n — нормал, ρ — кристалланишда суюлма зичлиги, унинг ўзгариши бу шартда эътиборга олинмайди.

Иссиқлик ва масса узатишнинг фазалар ўтиши иштирокидаги масаласи мураккаб математик масала. Кўпчилик технологик масалаларни ечишда асосан сонли усуллардан фойдаланилади.

Яна бир неча муҳим тушунчалар билан танишайлик.

Чегаравий қатлам — жисмнинг сиртидаги юпқа соҳа, бунда инерция ва ички ишқаланиш кучлари бир тартибдаги катталиклар деб ҳисобланади.

Ташқи оқим — бу оқимнинг қолган соҳаси. Унда ишқаланиш кучлари эътиборга олинмайди.

Чегаравий қатламларнинг уч хили фарқланади:

Динамик чегаравий қатлам — суюқликнинг қаттиқ жисм девори яқинидаги δ_0 қалинликдаги қатлами. Бу қатламда суюқлик ҳаракати тезлиги нолдан (жисм сиртида) то асосий оқим тезлиги w_0 гача ўзгаради.

Иссиқлик(термик) чегаравий қатлам — суюқликнинг девор яқинидаги δ_t қалинликдаги қатлами. Унда температура жисм сиртидаги T_s дан асосий суюқлик оқимининг T_0 температурасигача ўзгаради.

Диффузион чегаравий қатлам тушунчасини қаттиқ жисм сирти яқинида конвекция йўли билан масса бериш жараёнларини таҳлил қилишда киритилади, бу сиртда тегишаётган суюқлик оқими билан ўзаро таъсир реакцияси юз бериб туради.

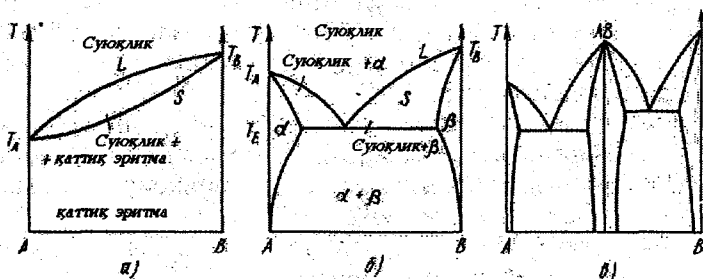
5.3. ҲОЛАТЛАР (ФАЗАЛАР) ДИАГРАММАЛАРИ

Ҳозир суюлмалардан кристалланиш усулидан яримўтказгич ва диэлектрик материалларни тозалаш учун фойдаланилади. Бу усул моддаларни тозалаш технологик жараёнининг охириги босқичида қўлланилади. Бунда материал юқори тозаликдаги монокристалл кўринишида олинади.

Моддани кристаллаш йўли билан тозалаш жараёнларини амалга оширишдан олдин модданинг (ундаги киришмалар билан биргаликдаги) **фазалари диаграммасини** билиш зарур.

Баъзи мулоҳазалар моддаларни тозалашнинг кристаллаш усуллари асосий қоидаларини таҳлил қилишда икки таркибловчили тизимларни кўриб чиқиш билан кифояланиш мумкинлигини тасдиқлайди.

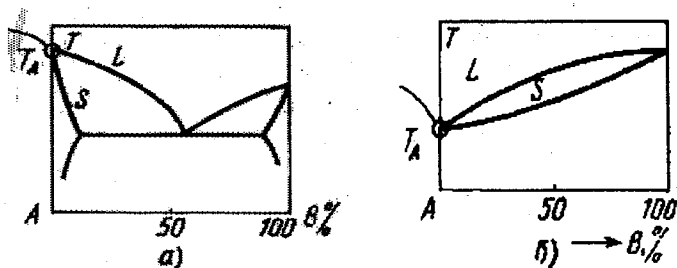
II.1-расмда фазалар диаграммаларининг бир неча ҳоли тисвирланган:



II.1-расм. Фазалар диаграммаларининг энг муҳим ҳолатлари: а-узлуksиз қаттиқ ва суюқ эритмаларнинг ҳолат диаграммаси; б-қаттиқ эритмаларнинг α ва β соҳалари билан ҳолат эвтектив диаграммаси; в-қаттиқ эритмалар соҳалари билан ҳолат дистектив диаграммаси.

Кристаллаш усули билан тозалашнинг асосий қоидаcи куйидагидан иборат: икки ташкилловчили (бинар) тизимдаги аралаш эритманинг кристалланишида юз берадиган жараёнларни кузатайлик, бунда киришма эритманинг суюлиш температурасини пасайтирадиган бўлсин (II.2-расм).

Киришма зичликлари кичик бўлганида фазалар диаграммаси қисмлари тўғри чизиқ кўринишида бўлади. Бунда C_0 зичликли В киришмали А ташкилловчининг T_0 температурадаги суюлмаси бўлсин (II.3-расм).



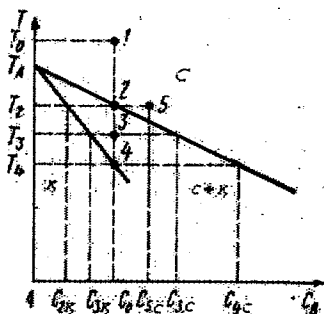
II.2-расм. Асосий ташкилловчининг суюлиш нуқтаси T_A яқинида икки тур фазалар диаграммаси қисмлари С солидус ва L ликвидус чизиқларига уринма ва тўғри чизиқлар икки кесмалар билан тасвирланган: а-суюлиш температурасини пасайтирадиган киришма; б-суюлиш температурасини оширадиган киришма.

Тизимнинг дастлабки ҳолатини C_0 ва T_0 координатали 1 нуқта тасвирлайди. Температура пасайганда 1 фигуратив нуқта тизимнинг кетма-кет ҳолатларини тавсифловчи тик (вертикал) чизиқ чизади. Вертикал чизиқ билан ликвидус чизиғи кесишадиган 2 нуқта қаттиқ эритма кристаллана бошлаши температураси T_2 ни аниқлайди, бунда бу температуранинг солидус чизиғи билан кесишиши жойи аниқлайдиган C_{2K} зичликли қаттиқ фаза ҳосил бўлади. Темпера-

тура яна пасая борса (то кристалланиш охиригача) тизим ҳолати иккита нуқта билан аниқланади.

Бу бир вақтда тизимда ўзаро мувозанатдаги икки фаза борлигини билдиради. Бу нуқталардан бири солидус чизиғи устида бўлиб қаттиқ фаза, иккинчи нуқта ликвидус чизиғи устида бўлиб, суяқ фаза таркибини беради.

Суюлиш оралиғини C_0 вертикалнинг солидус ва ликвидус чизиқлари билан кесишиш нуқталари (4 ва 2) аниқлайди. 4 нуқтага мос T_4



II.3-расм. В ташкилловчининг А да суялтирилган эритмаси кристалланишида суяқ ва қаттиқ фазалар ораларидаги киришма тақсимоти.

температурага эришилганда суёқ фаза бутунлай йўқ бўлади, тизим бир фазали бўлиб қолади, қаттиқ фаза таркиби эса суёқликнинг S_0 таркиби билан бирдай бўлади. Температура яна ҳам пасая борса, қаттиқ фаза таркиби ўзгармайди. Температура орта борганда тизим ўша ҳолатлар кетма-кетлигидан тескари тартибда ўтади.

Демак, кристалланган қуйма таркиби суюлма таркибидан ҳеч фарқ қилмаслиги керак. Юқоридаги мулоҳазалар ҳар бир муайян пайтда тизим мувозанатий ҳолатда бўлади деган фаразга асосланади. Аммо бу фараз температурани жуда секин ўзгартирганда (квазистатик жараёнда) ҳақиқатга яқин бўлади.

Суёқ фазада диффузия коэффициенти қаттиқ фазадагидан бир неча баробар катта (800°C да қаттиқ германийда, индийнинг диффузия коэффициенти $2 \cdot 10^{-17} \text{ м}^2/\text{с}$ бўлгани ҳолда суёқ германийда у $10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$). Шунинг учун кристаллдагига нисбатан суюлмада мувозанат ўрнашиш тезлиги анча катта. Фазалар чегарасида эса мазкур тезлик суёқликдагидан кичик эмас, аммо қаттиқ фазадагидан анча катта бўлиши мумкин.

Фараз қилайлик, кристалланиш жараёни тезлиги шундайки, бунда суюлмада ва фазалар чегарасида мувозанат узлуксиз тикланиб туради. Аммо қаттиқ фазада диффузия жуда секин ва диффузия туфайли қаттиқ фаза таркиби ўзгармайди.

Температура кристалланиш бошланишидагигача пасайганда (II.3-расмда 2 нукта) $C_{2\kappa}$ таркибли қаттиқ фаза вужудга келади, унда А асосий таркибловчи суёқ фазадагидан анча кўп. Суюлма эса, В киришма таркибловчи билан бойиган бўлади. Шу сабабли фигуратив нукта ўнгга (5 нукта) силжийди. 5 нукта аниқлайдиган суюлманинг кристалланиши бошланиши температураси T_2 бирмунча юқори бўлади. Температурани яна пасайтира борилса, 5 нукта ликвидус чизигига етади, энди қаттиқ фазанинг ажралаётган қатламлари, биринчи навбатда кристалланган қатламларга қараганда, В ташкилловчига бой бўлади. Суюлманинг ке-йинги улушлари пастроқ температурада кристалланади, ўсаётган қатламлар В ташкилловчи билан бойийди.

Шундай қилиб, ҳақиқий шароитдаги кристалланиш жараёни кўрсатишича, қаттиқ фаза ўз таркиби бўйича нобиржинс (нотекис) кристалланади, ҳосил бўлган кристалл зичлиги узлуксиз ўзгариб боровчи қаттиқ эритма қат-

ламлардан иборат бўлади. Бу ҳодисани **сегрегация** дейилади, таркибнинг доимийлиги бузилишини **сегрегацион бузилишлар** дейилади.

Ҳақиқий шароитда фазалар чегараси муайян тезлик билан силжийди. Бу силжиш қаттиқ фазада таркибловчилар диффузиясидан катта. Кристалларни ўстиришда шундай температура градиентлари ҳосил қилинадики, диффузион жараёнлар секинлашган, пасайган температура-лар соҳасига ўсаётган қатламлар тез тушиб қолади.

Агар суюқ фазада диффузия қийин бўлса, бу ҳолда қаттиқ фаза кристалланиши суюқ фазанинг асосий массасидан эмас, балки кристалланиш жараёнига яқин қатламда юз беради, бу — ажратиш ёки тозалаш иши самарадорлигини пасайтиради.

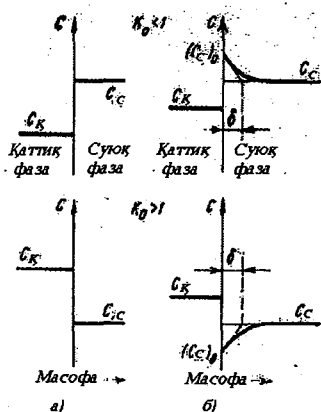
Кристаллаш орқали самарали тозалаш учун жараёни монокристалл ҳосил бўладиган шароитда амалга оширишдир.

Тозалаш самарадорлигини баҳолаш учун K тақсимланиш коэффиценти хизмат қилади. У қаттиқ фазада эриган модда зичлигининг шу модданинг суюқ фазадаги зичлигига нисбатини ифодалайди. K кенг оралиқдаги (10^{-5} — 10) қийматларга эга бўлади. Мувоzanатий ва самарали тақсимланиш коэффицентлари фарқланади.

Мувоzanатий тақсимланиш коэффиценти K_0 (сегрегация коэффиценти) кристалл ва суюлма орасида мувоzanат бўлган шароитда таркибловчиларни ажратиш эффектини тасвирлайди:

$$K_0 = C_k / C_c,$$

бунда, C_k , C_c — қаттиқ ва суюқ фазадаги таркибловчи модда зичликлари. Агар киришма тозаланаётган модда кристал-



II.4-расм. Кристалланишнинг турли шароитида қаттиқ ва суюқ фазалар чегарасида киришмалар тақсимоти (c -киришма зичлиги): а-мувоzanат шароитида; б-мувоzanatsiz шароитида.

ланиши температурасини пасайтирса. $K_0 < 1$ ёки $C_k < C_c$. Аксинча, $K_0 > 1$ ёки $C_k > C_c$.

K коэффициентни аниқ ҳисоблаш кўпинча қийин бўлади. Фазалар диаграммаларида олинган K қийматлари қаттиқ ва суёқ фазалар мувозанати шароитига тааллуқли.

Ҳақиқий ҳолларда кристалланиш fronti тезлиги суёлмадаги диффузия тезлигидан катта, оқибатда кристалланиш fronti олдида d қалинликли суёлма қатлами ҳосил бўлади, агар $K_0 < 1$ бўлса, мазкур қатлам киришма билан бойийди, агар $K_0 > 1$ бўлса, у киришмадан озаяди.

Самарали тақсимланиш сегрегация коэффициентни:

$$K_{\text{эфф}} = C_k / C_{\text{ж}}. \quad (\text{II.1})$$

Масса диффузия орқали δ қатламда кўчирилганда

$$K_{\text{эфф}} = \frac{K_0}{K_0 + (1 - K_0) \exp[-v\delta/D]}, \quad (\text{II.2})$$

бунда, v — кристалланиш тезлиги, D — киришманинг суёлмадаги диффузия коэффициенти. $K_{\text{эфф}}$ — коэффициент кристалланишнинг келтирилган тезлигига боғлиқ бўлади.

Кристаллаш йўли билан тозалашнинг асосий усуллари мазмуни шундан иборатки, улар тозалаш технологик жараёни охириг босқичида қўлланади. Олинаётган материалнинг энг катта физик ва кимёвий тозалигига эришиш мақсадига йўналтирилган.

Йўналган кристаллаш усуллари асосан учга ажратилади: кристалларни суёлмадан тўртиб олиш усули (Чохральский усули), нормал йўналган кристаллаш усули (Брижмен усули) ва зонавий суёлтириш усули (Пфанн усули). Мазкур усуллар ҳақида алоҳида тўхталамиз.

Суёлмадан кристалл тўртиб олиш усулида суёлмага кичик монокристалл шаклидаги хамиртуруш ботирилади, сўнг уни узлуксиз равишда юқорига кўтара борилади. Хамиртуруш монокристаллча суёлманинг суёқ устунчасини эргаштиради, бу эса паст температура зонасига кириб қолиб узлуксиз кристалланади.

Нормал йўналган кристаллаш усулида модда муайян шакли тигелда суёлтирилади, у кейин бир учидан аста-секин совитилади. Йўналган кристаллаш шундай амалга оширилади.

Зонавий суюлтиришда модда қўймасида кичкина қатламни суюлтириб, уни намуна бўйлаб кўчириб борилади. Шу қатлам (зона) кўчиб борган сари унинг олдида модда суюлади, унинг орқасида кристалланиш юз беради. Бу усул ҳозир кўп материалларни чуқур тозалашда энг кўп қўлланилаётган усулдир.

5.4. ГАЗ ФАЗАСИ ОРҚАЛИ ҲАЙДАШ ЖАРАЁНЛАРИ

Бу жараёнлар буғлари юқори эластикликка эга бўлган содда моддалар (элементлар) ни ва кимёвий бирикмаларни тозалаш асосида ётади. Бундай моддалар мисоллари фосфор, сурма, олтингугурт, магний, кальций, рух элементларнинг суюқ хлоридлари (GeCl_4 , TiCl_4 , SiCl_4 ва бошқалар), учиб кетувчи бирикмалар (галогенидлар) ва ҳ.к.

Моддалар **сублимация** ва **дистиллаш** усуллари билан ажратилиши ва тозаланиши мумкин.

Сублимация (ҳайдаш) модданинг қаттиқ ҳолатдан тўғридан-тўғри буғсимон ҳолатга ўтиши жараёнидир. Суюлиш температурасидан пастдаги температурагача қиздирилганда ҳосил бўладиган буғининг босими етарлича юқори бўладиган моддаларни ажратиш ва тозалашда маъқул усул сублимация усулидир. Учувчанроқ киришмалар паст температурада чиқариб юборилади (ҳайдалади), камроқ учувчанлари ҳайдашдан кейинги қолдиқда қолади.

Дистиллаш — буғлари босимлари ҳар хил бўлган суюқ эритмани таркибий қисмларга ажратиш жараёни бўлиб, бунда уларни буғлантириб, кейин буғлар чўктирилади.

А ва В таркибловчилардан иборат қўшалок тизим мисолини кўрайлик.

Агар А ва В таркибловчилар таркиби, миқдори, молекулалари тузилиши бўйича, бинобарин, хоссалари бўйича бири-бирига жуда яқин бўлса, ўзаро бирикмалар ҳосил қилмаса ва бирга тўпланмаса, у ҳолда доимий температурада ҳар бир таркибловчининг эритма устида тўйинган буғининг улуший (парциал) босими унинг эритмадаги граммолларда ифода-ланган улушига мутаносиб бўлади, яъни

$$P_A = N_A P_A^0, \quad (\text{II.3})$$

$$P_B = N_B P_B^0, \quad (II.4)$$

бунда, P_A ва P_B — таркибловчилар буғлари умумий босими, N_A ва N_B — уларнинг эритмадаги молларда ифодаланган улуши, P_A^0 ва P_B^0 — тоза А ва В таркибловчилар буғлари босими. Эритма билан мувозанатдаги буғнинг умумий босими:

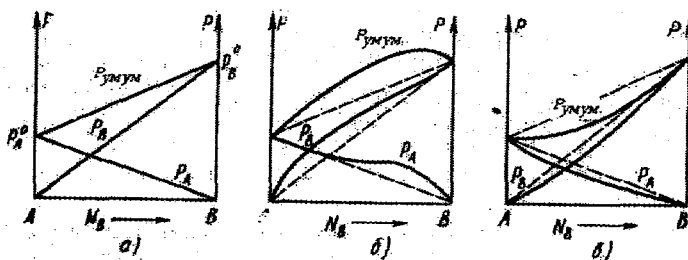
$$P_{AB} = N_A P_A^0 + N_B P_B^0.$$

$N_A = 1 - N_B$ бўлганидан (II.3) ва (II.4.) лардан қуйидаларни оламиз.

$$(P_A^0 - P_B) / P_A^0 = N_B,$$

$$P_{AB} = P_A^0 + N_B (P_B^0 - P_A^0). \quad (II.5)$$

(II.5) ифода идеал тизимлар учун Рауль қонунини ифодалайди: А эритувчининг тўйинган буғи босимининг нисбий пасайиши эритувчида эриган В модданинг молларда ифодаланган улушига миқдоран тенгдир, ва аксинча.



II.5-расм. Умумий ва парциал буғ босимларининг икки таркибли тизимларида боғланиш графиклари: а-идеал тизимда; б-Рауль қонундан мусбат четланган тизимда; в-Рауль қонунидан манфий четланган тизимда (температура доимий).

Амалда сийрак учрайдиган идеал эритмаларнинг ҳосил бўлишида иссиқлик эффекти ёки ҳажм ўзгариши содир бўлмайди. Ҳақиқий эритмаларда эритма буғи ва унинг таркиби орасидаги чизигий боғланишдан четланиш кузатилади.

Мусбат четланишларда эритма устида ҳар икки таркибловчи буғлари босими ва уларнинг йиғиндиси Рауль қонунидан

келиб чиқадиган қийматлардан катта. Бундай эритмалар ҳосил бўлишида иссиқлик ютилади ва ҳажм кенгайди. Манфий четланишларда буғларнинг босими Рауль қонуни бўйича ҳисобланганда кичикроқдир (II.5-в расм). Бундай эритмалар ҳосил бўлишида иссиқлик ажралади ва ҳажм кичраяди.

Эритма устидаги буғнинг таркиби эритманинг ўз таркибига боғлиқ.

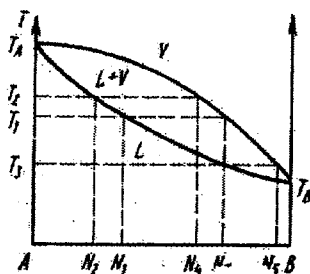
Содда тизимда бу боғланиш II.6-расмдаги кўринишда бўлади.

В пастроқ қайнаш температурали таркибловчи дейлик. Агар N_1 таркибли эритмани қиздирсак, бу ҳолда T_1 температурага етганда у қайнай бошлайди. Бу эритма билан мувозанатдаги буғ N_2 таркибга эга ва эритмага нисбатан В таркибловчига тўйинган бўлади. Эритманинг қандайдир миқдори буғланиб бўлганда, унинг қолган қисми А таркибловчига тўйинган ҳолда, N таркибга эга бўлади, буғ эса эритмага нисбатан В таркибловчига тўйинади. Буғланиш давом этган сари эритманинг қолгани А таркибловчи билан бойиб боради, қайнаш температураси, мос равишда, кўтарилади. Оқибатда эритма қолдиғида амалда тоза А таркибловчи қолади ва қайнаш температураси T_A га етади.

Агар T_1 температурада эритмадан ажралиб чиққан N_2 таркибли буғ ўтказилса (чўктирилса) ва ҳосил бўлган чўкма (конденсат) дистилланса, бу ҳолда у T_2 температурада қайнайди ва ҳосил бўлган буғ N_3 таркибга эга бўлади, яъни В таркибловчига бой бўлиб қолади. Конденсация (ўтказиш) ва дистиллаш жараёнини қайта-қайта бажариб, буғнинг ўзи амалда тоза В таркибловчидан иборат бўлиб қолишига эришилади. Шундай қилиб, қаралган тизимда ҳар қандай икки таркибли аралашмани дистиллаш усули билан тоза таркибловчиларга ажратиш олиш мумкин.

Дистиллаш усули билан ажратиш олиш ёки тозалаш жараёнларини миқдорий баҳолаш учун

$$K = N''/N$$



II.6-расм. Дистиллашда эритма ва буғ таркиблари ўзгариши: L-суюқлик, V-буғ, L+V-суюқлик ва буғ аралашмаси.

тақсимот коэффициент катталиги киритилади, бунда N ва N -таркибловчиларнинг буғда ва эритмада граммоль улушлари, мос равишда. Биз қараган икки таркибловчили тизим учун $K_A = N_A^I / N_A$; $K_B = N_B^I / N_B$.

Ажратиш коэффициент

$$K_A = \frac{N_A^I}{N_A} / \frac{N_B^I}{N_B} = \frac{K_A}{K_B}$$

катталиги юқорида кўрилган дистиллаш усулининг самарадорлигини баҳолайди.

Идеал эритмалар учун K_p таркибга боглиқ эмас ва уни **нисбий учувчанлик коэффициент** дейилади:

$$K_{p, \text{ис}} = P_A^0 / P_B^0.$$

Ҳақиқий эритмалар ҳолида

$$K_p = (P_A^0 / P_B^0)(\gamma_A / \gamma_B),$$

бунда, γ_A ва γ_B — тегишли таркибловчиларнинг фаоллик коэффициентлари. Киришма таркибловчи оз миқдорда бўлганда асосийси учун $\gamma \rightarrow 1$. Масалан, A ни B юқидан тозалашда $\gamma_A \rightarrow 1$. Бунда

$$K_p = (P_A^0 / P_B^0)(1 / \gamma_B) = K_{p, \text{ис}} \cdot (1 / \gamma_B).$$

II.1-жадвалда баъзи бинар тизимлар учун киришма оз бўлганда ажратиш (нисбий учувчанлик) коэффициент кийматлари келтирилган.

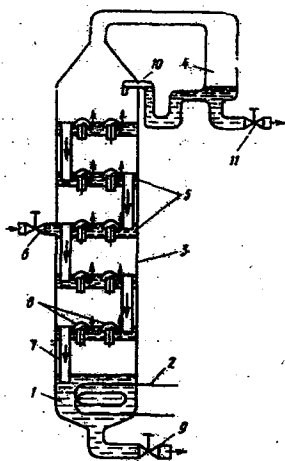
Буғланиш ва ҳайдаш жараёнлари сиртдан юз берганлиги туфайли, жараёнлар тезлиги катта бўлиши учун ажратилаётган модда сирти яхши тайёрланган бўлиши керак.

Ажратиш ва тозалашда моддада ва газ фазада юз берадиган алмашилиш жараёнлари катта ўрин тутади.

II.1-жадвал

Тизим (асосий таркибловчи-нормал)	K_p қиймати
$\text{SiHCl}_3\text{-PCl}_3$	4,47
$\text{SiHCl}_3\text{-CCl}_4$	2,65
$\text{SiCl}_4\text{-PCl}_3$	1,64
$\text{SiHCl}_3\text{-PCl}_3$	4,72
$\text{CH}_3\text{SiCl}_2\text{-PCl}_3$	1,14

Нейтрал газлар асосан буғланишни секинлатади, йиғувчи томонга буғлар диффузияси тезлигини камайтиради. Кимёвий фаол газлар эритмадаги таркибловчиларнинг фаоллик коэффициентига таъсир кўрсатади. Масалан, CH_3SiCl_3 ни PCl_3 дан тозалашда PCl_3 ни озон билан оксидлаб (POCl_3 га етказиб) PCl_3 нинг учувчанлигини камайтириш йўли билан CH_3SiCl_3 ни дистиллаб тозалаш самарадорлигини муҳим даражада ошириш мумкин. Одатда, тозалаш самарадорлигини ошириш учун водород ишлатилади, у кўп оксидларни, сульфидларни, селенидларни, галогенидларни тиклайди. Намли водород кремний суюқмасидан (учувчан VH_3 ҳосил қилиб) борни (В) чиқариб юбориш учун қўлланилади.



II.7-расм. Ректификацион қурилма чизмаси.

Дистиллаш, сублимация жараёнларини кўп марта такрорлаш натижасида юқори даражада тоза моддалар олиш мумкин. Дистиллаш ва конденсирлаш (ўтказиш, чўктириш) амаллари кўп марта узлуксиз такрорландиган жараённи **ректификация** (тозалаш) жараёни, у амалга ошириладиган қурилмани **ректификацион устун** (колонна) дейилади.

II.7-расмда ректификацион қурилма тасвирланган. Унинг асосий қисмлари 1 куб (қозон), ректификацион колонна 3, иситгич 2 ва 4 конденсатор.

Ректификацион колонна (устун) (5) бир қатор горизонтал ликобча (тарелка)ларга эга. Тозалашга (ректификацияга) мўлжалланган ва олдиндан иситилган эритма 6 жўмрак орқали ўрта ликобчалардан би-рига киритилади, уни тўлдиради ва 7 найча орқали пастроқдаги ликобчага оқиб тушади. 8 найча орқали пастдан юқорига кўтариладиган буғларнинг билқиллаши юз беради. 8 найлардаги қалпоқчалар ликобчадаги эритма билан буғни яхши туташтиради. Қўшимча иситгичлар ёрдамида колонна (устун) бўйлаб температура градиенти ҳосил қилинади, бунда кубда температура энг юқори, конденсаторда энг паст бўлиб, бу буғ ва эритманинг тескари иссиқлик алмашилишини амалга

оширади. Бунинг оқибатида колоннанинг юқори қисмидан тоза, учувчанроқ таркибловчи буглари чиқади, кубга эса тоза, камроқ учувчанлик таркибловчидан иборат суюқлик оқиб тушади. 4 конденсаторга келаётган тоза, учувчанроқ таркибловчи чўкади, бунда чўкманинг (конденсатнинг) **флегма** дейилувчи қисми 10 най орқали колоннанинг юқори ликопчасига берилади, у колонна юқори қисмининг бир маромда ишлашини таъминлайди. Конденсатор ва кубдан, 11 ва 9 жўмраклар орқали маҳсулот олинади.

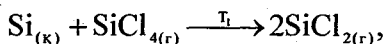
Ажратиш колоннаси қанча узун, масса ва иссиқлик алмашиш қанча жадал бўлса, ажратиш ёки тозалаш эффекти шунча катта бўлади.

Кимёвий кўчириш реакциялари ёрдамида ҳам моддани тозалаш мумкин.

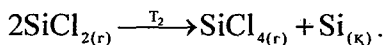
Кимёвий кўчириш реакциялари газсимон фаза иштирок қилувчи қайтар гетероген реакциялар бўлиб, улар ҳосил қиладиган маҳсулотлар — оралик газсимон бирикма ёрдамида турли босимли ва температурали икки реакцион зоналар орасида моддани кўчириш мумкин. Бунда, асосан, турли температурали тизимлардан фойдаланилади.

Бир қатор ҳолларда сублимация ва дистиллаш жараёнлари самарадорлигини ошириш учун асосий модда киришмадан ёки бошқа таркибловчилардан кўра учувчанроқ кимёвий бирикмага айлантирилади. Осон учувчан бу бирикмани парчалаб тоза маҳсулот олиш мумкин, бунда олдинги усуллардагидан тозароқ маҳсулот олинади. Мисол сифатида кремнийнинг дигалогенид кўринишида кўчирилишини қараймиз.

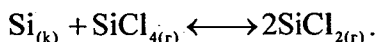
$T_1 = 1300^\circ\text{C}$ да кремний билан тетрахлорид реакцияси оралик газсимон $\text{SiCl}_{2(r)}$ бирикма ҳосил қилади:



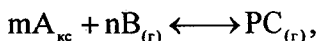
бу маҳсулот реакторнинг совуқроқ четига кўчирилади, бунда $T_2 = 1100^\circ\text{C}$ да кремний ажралади:



Бу реакциялар қайтар бўлади:



Кўчириш реакцияси тенгламаси умумий ҳолда:



бунда, A — тозаланган модда (у қаттиқ ёки суяқ ҳолда бўлиши мумкин); B — A таркибловчи билан газсимон оралиқ C бирикма ҳосил қилувчи газсимон реагент.

Реакциялар юз берадиган ҳажмдаги зоналар орасида температура фарқи ҳосил қилиниб, кўчириш реакциясининг боришига йўналтирилади, натижада тозаланувчи модда қурилманинг бир қисмидан бошқа қисмига кимёвий реакция ёрдамида ҳайдалади ёки кўчирилади. Экзотермик (иссиқлик ажраладиган) реакциялар содир бўлган ҳолда паст температурали жойдан юқори температурали жойга, эндотермик (иссиқлик ютиладиган) реакциялар ҳолида эса юқори температурали жойдан паст температурали жойга модда кўчирилади.

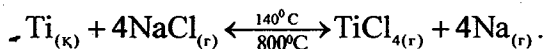
Кимёвий транспорт (кўчириш) реакцияларини уч асосий турга ажратилади:

1. Кўчирилувчи элементни унинг бугсимон ҳолатидан фаолроқ элемент билан сиқиб чиқариш (тиклаш) йўсинида борадиган эндотермик қайтар реакциялар.

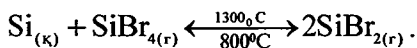
2. Паст валентли бирикмалар ҳосил қилувчи реакциялар.

3. Учувчан бирикмаларни синтез қилиш ва термик диссоциалаш реакциялари.

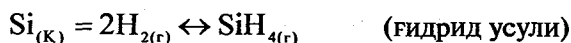
1-тур реакцияларда кўпинча водород, натрий, магний, углерод оксиди ва бошқалар қўлланади. Масалан, титанни (Ti) тозалаш усулида у NaCl буғи билан ўзаро таъсирлашади:



2-тур реакциялар мисоли — кремний тозалаш реакцияси:



3-тур реакциялар мисоли — кремнийни тозалаш жараёни:



Бундай реакцияларни Ge, CdS, Zr, GaAs, GaP ва бошқалар учун ҳам ёзиш мумкин.

Модданинг тозаланиши даражасини баҳолаш учун мувозанатий ажратиш коэффициенти K_p киритилган:

$$K_p = \frac{N^*}{1 - N^*} / \frac{N}{1 - N},$$

бунда, N^* — реакция маҳсулотига киришманинг улуши, N — дастлабки модданинг реакция маҳсулоти билан мувозанатда бўлганида киришманинг улуши. Ажратиш самарадорлиги қанча юқори бўлса, K_p бирдан шунча фарқ қилади. $K_p = 1$ бўлса, ажратиш йўқ. Чуқур тозалашда $N \ll 1$ ва $N^* \ll 1$ ва $K_p \approx N^*/N$ содда кўринишда, уни C концентрациялар (зичликлар) орқали ифодаласа бўлади:

$$K_p \approx \frac{C_c \cdot C_A}{C_A \cdot C_c}.$$

Кимёвий транспорт (кўчириш) реакцияларни амалга оширилиши характери бўйича, йўналиши бўйича, ҳайдалувчи элементнинг ажрилиши бўйича, кўчириш усули бўйича, жараён шакли бўйича фарқ қилинади.

Баён қилинган жараёнлар ёрдамида моддаларни тозалаш схемалари II.8-расмда тасвирланган.

Кўпчилик ҳолларда жараёнлар реакторлари энг тоза кварц шишадан, шаффоф Al_2O_3 корунддан, углеродли шишадан, кремний карбидидан тайёрланади.

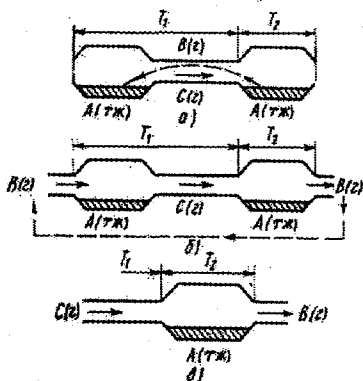
Агар модда тозалаш жараёнида қаттиқ ҳолатда бўлса, бу ҳолда уни реакторга майдаланган ҳолатда жойланади, бунда ифлосликлар қўшилиб қолмаслигига алоҳида эътибор бериш керак.

Транспорт (кўчириш) тезлиги кўчириш механизмига боғлиқ.

Яримўтказгичлар ва диэлектриклар технологиясида очиқ жараёнлар (II.8-в расм) кенг қўлланади, бунда кўчирилувчи элементнинг осон учувчи бирикмасини синтезлаш реакция ҳажмидан ташқарида бажарилади.

Юқорида таҳлилланган моддани тозалаш усули бир поғонали жараёндир, шунинг учун ўз физик-кимёвий хоссалари бўйича асосий моддадан анча фарқ қиладиган киришмалардан моддани тозалашда бу усул самара беради.

Кимёвий транспорт (кўчириш) реакциялар усули тоза модда олишдан ташқари яна яримўтказгич ва диэлектрик бирикмаларни синтезлаш, шунинг-дек, у монокристаллар ва юпқа монокристаллар олиш имконини беради.



II.8-расм. $mA_{(K)} + pB_{(G)} \leftrightarrow pC_{(G)}$ кимёвий транспорт реакциялар ёрдамида моддаларни тозалаш жараёни чизмаси: а-жараён ёпик, уни молекуляр ёки конвектив диффузия амалга оширади; б-жараён ёпик, уни газ-реагент ёки газ-ташувчи оқими амалга оширади; в-жараён очик, унда учувчан ташкилловчининг синтез қилиш ва тозалаш реактордан ташқарида ўтказилади, ташиш олдиндагидек.

5.5. МОДДАЛАРНИ АЖРАТИШ ВА ТОЗАЛАШНИНГ БОШҚА ЖАРАЁНЛАРИ

Ажратиш ва тозалашнинг электрокимёвий жараёнлари.

Бу усуллардан яримўтказгичларни тозалаш учун асосийлари электролиз, анод эритувчи ва электродиализдир.

Барча электрокимёвий тозалаш усуллари оксидлаш-тиклаш жараёнлари орқали амалга оширилади.

Электролиз ёрдамида моддани тозалашда дастлабки материални анодлар қилиб, электролитга ботирилади, улар электролиз вақтида эриб кетади ва тозаланган материаллар катодларга йиғилади. Аноднинг сиртидан $A \rightarrow A^{n+} + ne$ оксидланиш реакцияси юз бериб, бунда модданинг A^{n+} иони эритмага ва электрон катодга ўтади, катодда эса $A^{n+} + ne \rightarrow A$ тикланиш реакцияси кетади, оқибатда катоддан тоза A модда ажралади. Бу реакциялар муваффақиятли кетиши учун, ай-

ниқса, киришмалар иштирок этадиган зарарли жараёнлар таъсирини жуда кам қилиш зарур.

Анод эритувчи (анодда рафинирлаш-тозалаш) усули баъзи ҳолларда катта самара беради. Бу ҳолда ҳам тозаланувчи модда анод сифатида фойдаланилади, электролиз эса киришмаларни аноддан электролитга ўтказadi, сўнгра тоза модда катодда йиғилади. Мисоллар: галлийни руҳдан, алюминий ва магнийни кремнийдан, темирдан, мисдан ва руҳдан тозалаш, қалайи, кўрғошин, бериллий, титан, цирконий, ниобий ва бошқалардан рафинирлаш (тозалаш) ана шу усулда амалга оширилади.

Электролитдан катионларни танлаб чиқариб олиш самарадорлигини **симоб катоддан** фойдаланиб ошириш мумкин (амалгама электрокимёси). Масалан, индий симоб катод усулидан фойдаланиб кўп киришмалардан тозаланади ва унинг тозарoқ бирикмаларини (InSb, InP ва ҳ.к.) олиш имконини беради.

Электролиздан чуқур тозалашда фойдаланганда анод ва катод соҳалари электролитик ваннанинг ўрта бўлмасидан синчиклаб ажратилади, уни яримўтказувчан деворлар (мембраналар) ёрдамида бажарилади, улар анодга ва катодга муайян турдаги ионларни ўтказadi. Электрик майдон ҳосил қилинганда мембраналар орқали ионлар диффузияси тезлашади, бу эса ўрта бўлмадаги тозаланиш тезлиги ва даражасини орттиради. Электролиз усуларининг бу хилини **электродиализ** дейилади. Бу усул қўлланганда электролитик ваннанинг ўрта бўлмасига тозаланувчи модданинг сувдаги суспензияси солинади, ён томондаги бўлмаларга тоза сув ва электродлар жойланади.

Потенциаллар айирмаси (кучланиш) қўйилганда мусбат электродга ўрта бўлмадан мембрана орқали киришмаларнинг анионлари, манфий электродга — киришмаларнинг катионлари ўтиб боради. Электродлар жойлашган ён бўлмаларда киришмалар ионлари тўпланиб борган сари эритмалар тўкиб юборилади ва яна бу бўлмаларга тоза сув тўлдирилади. Бу чоралар ўрта бўлмадан киришмаларни тез кетказишга имкон беради, шунингдек, ён бўлмаларда тўпланиб қолган киришмаларнинг яна ўрта бўлма томон тескари диффузиясига имкон бермайди.

Электродиализ ёрдамида SiO_2 , TiO_2 , MgO , ZnS ва бошқа бирикмалар киришмалардан тозаланади.

5.6. МАРКАЗДАН ҚОЧИРМА МАЙДОНДА АЖРАТИШ ВА ТОЗАЛАШ

Агар модда суюлмаси марказдан қочирма қурилмада (айлантиргичда) ҳаракат қилаётган бўлса, бу ҳолда марказдан қочирма куч таъсирида киришмалар қайта тақсимланади. Асосий модда атомларидан (молекулаларидан) оғирроқ киришма атомлари (молекулалари) суюлманинг четида, енгилроқлари эса айланиш марказига яқин қисмида йиғилади. Масалан, литий суюлмасини 50 с^{-1} тезликда айланувчи центрифугада (айлантиргич қурилмада) кристалланса, литий қуймаси (кристалли)нинг асосий қисми киришмалардан икки тартиб қадар тозаланadi.

Кесишган электрик ва магнитик майдонларда ажратиш. Замонавий масса-сепараторлар изотопларни ажратиш имконини беради. Шу усулни қўллаб энг катта тозалик даражасига эришиш мумкин. Бу қурилмалар яримўтказгичлар ва диэлектриклар тоза юпқа қатламларини олишда кенг қўлланилмоқда.

Диффузия ва термодиффузия йўли билан ажратиш. Газсимон моддаларни ажратиш ва тозалаш учун уларнинг яримўтказувчан (говак) деворлардан диффузияланиб ўтиши тезликлари ҳар хил бўлишидан фойдаланилади, бунда бир хил газлар деворнинг бир томонида, бошқалари иккинчи томонида йиғилади. Бу жараён кўп деворли камерада кўп марта такрорланса, газларни юқори даражада ажратиб юбориш мумкин.

Газлар аралашмаларини ажратиш термик диффузия ёрдамида ҳам самарали амалга оширилади. Агар газлар аралашмаси эгаллаган идиш бўйлаб температуралар ўзгариб борса, бу ҳолда идишнинг иссиқ ва совуқ қисмларидаги аралашмалар таркиби фарқли бўлади: иссиқ қисмида кичик молекуляр массали таркибловчи миқдори катта бўлади. Табиийки, температуралар фарқи қанча катта бўлса, идишнинг иссиқ ва совуқ қисмларида аралашмалар таркиби фарқи шунча катта бўлади.

Яримўтказувчан (говак) деворлар орқали диффузия ва термодиффузия жараёнлари газлар аралашмасидаги молекулалар массалари фарқига жуда сезгир, шунинг учун бу жараёнлардан изотопларни ажратиб олишда қўлланилади.

Назорат саволлари

1. Технологик жараён ва унга тегишли асосий тушунчаларни тавсифланг.
2. Гетероген кимёвий тизим нима?
3. Ҳолатлар диаграммаси қандай тузилади ва унинг фазалар мувозанати ўзгаришидаги аҳамияти қандай?
4. Ҳом ашёни технологик жараёнга дастлабки тайёрлаш амаллари ҳақида сўзлаб беринг.
5. Газ фазаси орқали ҳайдаш жараёнлари қандай кечади?
6. Моддаларни ажратиш ва тозалашнинг қандай усуллари қўлланилади?

6-БОБ. КРИСТАЛЛАР ЎСИШИ КИНЕТИКАСИ

6.1. КРИСТАЛЛАНИШ МАРКАЗЛАРИ ҲОСИЛ БЎЛИШИ

Кристалланиш жараёнлари биринчи тур фазавий ўтишлар бўлиб, уларнинг оқибатида модда атомлари жойлашиши тўла ёки қисман тартибланмаган ҳолатдан (буғ, суюқлик) қатъий тартибланган ҳолатга (кристалл) ўтади. Кристалланиш фақат ўта тўйинган, яъни метастабил (барқарормас оралиқ) ҳолатдаги тузилмаларда юз беради, бу жараён бутун метастабил фаза ҳажмида бир текис бормайди, балки жараён бошланишида дастлабки модданинг (тизимнинг) турли жойларида **кристалланиш марказлари** ҳосил бўлади, кейин улар ўса (катталаша) боради. Янги фаза (кристалл) марказларининг ҳосил бўлиш механизми **гомоген** ёки **гетероген** бўлиши мумкин. Гомоген механизм амалда бўлганда марказлар пайдо бўлишини рағбатлантирувчи ҳеч қандай қаттиқ зарралар ёки сиртлар бўлмайди, гетероген механизм ҳолида эса улар мавжуд бўлади.

Кристалланиш марказлари ҳосил бўлишининг **термодинамик ёки капилляр назарияси** ҳақида тўхталамиз. Ўта тўйинган буғдан суюқ томчилар пайдо бўлишини қарайлик, бунда жуда кичик томчиларга нисбатан термодинамик таҳлил қўлланиши мумкин деб ҳисоблаймиз.

r радиусли кичкина томчининг пайдо бўлиши тизимнинг эркин энергияси (G)ни ΔG қадар ўзгартиради, у

$$\Delta G = \Delta G_1 + \Delta G_2 \quad (\text{II.6})$$

кўринишида бўлиб, ΔG_1 — буғ томчига айланганда (конденсацияланганда) эркин энергиянинг ўзгариши, ΔG_2 — суюқлик ва буғ чегараси сирти шаклланишида эркин энергиянинг ўзгариши.

Унча мураккаб бўлмаган ҳисобнинг натижаси:

$$\Delta G = -\frac{4}{3} \frac{\pi r^3}{v} RT \ln \frac{P}{P_0} + 4\pi r^2 \gamma_{\infty}, \quad (\text{II.7})$$

бунда, v — суюқлик ҳажми P_0 — буғнинг T температурадаги мувозанатий босими, P — томчи ҳосил бўлишидаги ўта тўйинган буғнинг босими, $\gamma_{сб}$ — суюқлик ва буғ чегарасининг солиштирма эркин энергияси.

(11.7) ифодадан кўринишича, r кичкина бўлганда иккинчи ҳад каттароқ, r катта бўлганда биринчи ҳад каттароқ бўлади.

$\frac{d\Delta G}{dr} = 0$ шартдан критик $r_{кр}$ ни ва $\Delta G_{кр}$ ни топиш қийин эмас:

$$r_{кр} = \frac{2\gamma_{сб}v}{RT\ln P/P_0}, \quad (II.8)$$

$$\Delta G_{кр} = \frac{16\pi v^2 \gamma_{сб}^3}{3[RT\ln P/P_0]}. \quad (II.9)$$

$r < r_{кр}$ ўлчамли томчилар буғланишга мойил, уларни муртак (зародиш) дейилади, $r > r_{кр}$ ўлчамли томчиларни эса **янги фаза марказлари** (кристалланиш ҳолида кристалланиш марказлари) дейилади.

Агар $P/P_0 \leq 1$ бўлса, ΔG ўзгариш r ортиши билан ортиб боради, ҳар қандай ўлчамли томчилар буғланишга мойил бўлади.

Хулоса шуки, янги фаза марказлари пайдо бўлиши ва ўсиши учун янги фазадаги модданинг эркин энергияси ўша модданинг дастлабки фазадагисидан кичик бўлиши зарур. Эркин энергияни бевосита ўлчаб бўлмайди, шунинг учун янги фаза марказлари ҳосил бўлиши ва уларнинг ўсиши шартларини аниқлашда **ўта тўйиниш** ва **ўта совиш** тушунчаларидан фойдаланилади.

Кристалланиш марказларининг пайдо бўлиши ва ўсиб бориши учун дастлабки фаза (буғ ёки суюқлик) вужудга келаётган қаттиқ фазага нисбатан **ўта тўйинган** ёки **ўта совиған** бўлиши зарур.

Агар T температурада газ фазасининг P босими суюқ ёки қаттиқ фазалар тўйинган буғларнинг P_0 босимидан катта бўлса, мазкур газ фазасини **ўта тўйинган** дейилади. Ушбу катталиклар қўлланилади:

$\Delta P = P - P_0$ — мутлақ ўта тўйиниш;

$\sigma = \Delta P / P_0$ — нисбий ўта тўйиниш;

$\alpha = P/P_0$ — ўта тўйиниш коэффиценти;

$$\delta = \ell_n P / P_0.$$

Суюқ ва қаттиқ эритмалар учун қуйидаги катталиклар қўлланилади:

$\Delta C - C - C_0$ — мутлақ ўта тўйиниш;

$\sigma = \Delta P / P_0$ — нисбий ўта тўйиниш;

$\alpha = C / C_0$ — ўта тўйиниш коэффициенти.

Суюлмаларнинг ўта совиш катталиги

$$\Delta T = T_c - T$$

орқали тавсифланади, T_c — модданинг суюлиш температураси, T — ўта совиған суюлма температураси.

Критик ўлчамли марказларнинг ҳосил бўлиши фаоллаш энергияси учун олинган (II.9) ифода газ фазасида янги фаза марказлари (томчилар) ҳосил бўлиши тезлигининг ўта тўйиниш даражасига боғлиқлигини ҳисоб қилиш имконини беради.

Янги фаза марказлари пайдо бўлиш тезлиги критик ўлчамли марказларнинг ўз ўлчамини орттириш ўртача тезлигига тенг. Агар $\omega_{кр}$ орқали критик марказнинг атом ёки молекулаларни вақт бирлигида тутиб (бирлаштириб) олиш сонини (частотасини) белгиласак, $n_{кр}$ орқали бирлик ҳажмдаги марказлар сонини белгиласак, у ҳолда газ фазасининг бир ҳажмида янги фаза марказлари ҳосил бўлиши тезлиги

$$I = \omega_{кр} n_{кр} \quad (II.10)$$

бўлади. Критик марказ сирти $S_{кр} = 4\pi r_{кр}^2$ буғ фазасидан мазкур сиртга зарралар оқими $q = P / (2\pi mkT)^{1/2}$, конденсация коэффициенти a_c эканлиги эътиборга олинса, (II.10) ифода қуйидагича шакл олади:

$$I = a_c q S_{кр} n_{кр} \quad (II.11)$$

Больцман статистикасига асосан,

$$n_{кр} \approx n_1 \exp(-\Delta G_{кр} / kT),$$

бунда, $n_1 = P / kT$ — газ фазада зарралар сони. Демак,

$$I = \frac{a_c P}{\sqrt{2\pi mkT}} 4\pi r_{кр}^2 n_1 \exp(-\Delta G_{кр} / kT), \quad (II.12)$$

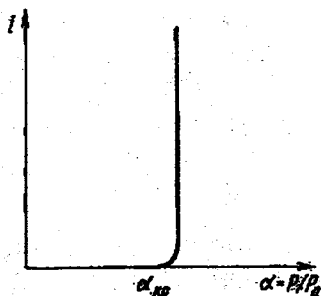
яна ҳам аниқ ҳисоблар натижаси:

$$I = 4\pi r_{кр}^2 \frac{a_c P}{\sqrt{2\pi mkT}} \left(\frac{\Delta G_{кр}}{3\pi k T i_{кр}^2} \right)^{1/2} n_1 \exp(-\Delta G_{кр} / kT), \quad (II.13)$$

бунда, $i_{кр}$ — критик ўлчамли марказдаги зарралар сони.

(II.13) ифода таҳлили кўрсатишича, бирор ўта тўйинишдан бошлаб янгича фаза марказлари пайдо бўлиш тезлиги кескин ортиб кетади. Бу ўта тўйинишни **критик** ўта тўйиниш дейилади.

Энди суяқ фазада қаттиқ фаза марказлари пайдо бўлиши жараёнини қараймиз. Бу ҳол учун бажарилган ҳисоблашлар эркин энергия ўзгаришининг критик катталиги учун



II.9-расм. Ўта тўйинган буғда суяқ томчилар ҳосил бўлиш I тезлигининг ўта тўйиниш коэффициентини α га боғланиши.

$$\Delta G_{кр} = \frac{4}{27} \frac{\eta^2 \gamma_{ск}^3 V^2}{(G' - G'_k)^2}, \quad (II.14)$$

ифодани беради; бунда h — марказ шаклини ҳисобга олувчи коэффициент, $g_{ск}$ — суяқлик ва қаттиқ фаза чегара сиртида солиштирма эркин энергия, V_L — суяқ фаза ҳажми, G'_c ва G'_k — суяқ ва қаттиқ фазадаги моляр эркин энергия. $\Delta G_{кр}$ ўзгариш ўтасовиш ΔT катталигига боғлиқ:

$$\Delta G_{кр} = \frac{4}{27} \frac{\gamma_{ск}^3 \eta^2 I}{L^2 \Delta T^2} T_c^2. \quad (II.15)$$

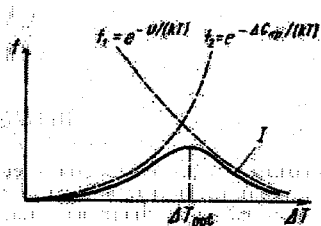
T_c — суяқлик температураси, L — кристалланиш яширин моляр иссиқлиги.

Газ фазада томчилар ҳосил бўлиши жараёни таҳлилида қилинган фаразлардан фойдаланиб, суяқликда кристалл фазаси марказлари ҳосил бўлиши тезлиги учун қуйидаги ифодани оламиз:

$$I = k \exp\left(-\frac{U}{kT}\right) \exp\left(-\frac{\Delta G_{кр}}{kT}\right), \quad (II.16)$$

бунда, k — температурага суиёт боғланган доимий, U — атом (ёки молекула) учун суяқ фаза ва кристалланиш маркази орасидаги чегарадаги потенциал тўсиқ.

(II.16) ифоданинг кўрсатишича, кристаллик фаза марказининг пайдо бўлиш эҳтимоллиги $\Delta G_{кр}$ орқали аниқланади ва у суяқликнинг ўта совуви даражаси ΔT ортиши билан



II.10-расм. Суюқ фазада гомоген муртаклар ҳосил бўлиши тезлигининг суюлма ўта тўйинишга боғланиши.

кўпайиб боради, аммо T нинг камайиши атомлар ҳаракатчанлигини бироз камайтиради. Шунинг учун ҳар қандай суюқлик оптимал ўта совиш даражасига эга бўлади (II.10-расм), бунда I максимал бўлади. Демак, марказлар пайдо бўлиш тезлигига динамик омилдан бошқа яна кинетик омил (ҳаракатчанлик) ҳам таъсир кўрсатиши мумкин.

Қовушқоқмас суюқликлар (масалан, кремний ва германий суюлмалари) кристалланишида кинетик омил муҳим эмас, бу ҳолда юқорида айtilган I максимуми кузатилмайди.

Суюлмалардан кристалл ва аморф қаттиқ jismlar олиш шартлари қуйидагилардир.

Қовушоқ (масалан, кремний оксиди асосидаги) суюлмалар жараёни кристалланишдан фарқ қилади ва у **шишаланиш** дейилади, мўрт ҳолатга тегишли ўтиш температураси эса **шишаланиш T_d температураси** дейилади. Бундай **аморф** қаттиқ jisмда (уни **шиша** дейилади) зарралар жойлашувида қатъий тартиб йўқ, аммо бир неча панжара доимийси чамасидаги масофада зарралар жойлашуви тартиби мавжуд бўлади.

II.2-жадвал

Модда	Суюлиш температураси, оС	Қовушқоқлик Па.с	Модда	Суюлиш температураси, °С	Қовушқоқлик Па.с
Ge	937	$0,8 \cdot 10^{-3}$	SiO ₂	1722	104
Si	1414	$0,9 \cdot 10^{-3}$	GeO ₂	1116	$7 \cdot 104$
GaAs	1237	$1,8 \cdot 10^{-3}$	B ₂ O ₃	450	104
H ₂ O	0	$2 \cdot 10^{-3}$	As ₂ O ₃	312	105
Al ₂ O ₃	2050	$60 \cdot 10^{-3}$	BeF ₂	550	105

Суюлмаларнинг қовушқоқлиги уларнинг шишасимон ҳолатга ўтиши қобилиятининг бош сабаби бўлади. Қовуш-

қоқлиги паст моддалар суюлмаларини шишасимон ҳолатга ўтказиш анча қийин, бунинг учун бу суюлмаларни $(10^5 - 10^6)$ град/с тезликда совитиш талаб қилинади. Шундай қилиб, температура пасайганда модданинг суюлган ҳолатдан қаттиқ ҳолатга ўтиши икки йўл билан юз беради: модда ё кристалланади, ёки шиша шаклида қотади. Кристалланиш **бир таъйинли температурада** (қотиш нуқтаси) содир бўлади, модданинг хоссалари бу ҳолда **сакрашсимон** ўзгаради. Суюлманинг шишаланиши муайян температуралар оралиғида содир бўлади, бунда модда хоссалари силлиқ ўзгаради.

Ўта тўйинган суюқ эритмаларда қотиш марказлари ҳосил бўлиши жараёни таҳлили ўта тўйинган буғлар ва ўта совиган суюлмаларда марказлар ҳосил бўлиши таҳлиliga кўп жиҳатдан ўхшашдир. Бунда газ фазаси ўта тўйиниш коэффициенти ўрнига эритманинг ўта тўйиниш коэффициенти киритилади:

$$r_{kp} = \frac{2\gamma_{ck} v}{RT \ln C / C_0} \quad (II.17)$$

Баён қилинган назария янги фаза марказлари ҳосил бўлиши бошланиши учун керак критик ўта тўйиниш ва ўта совитиш катталикларини баҳолаш имконини беради. Суюлмалардан кристалланиш ҳолида ΔT_{kp} оралиқ $0,2T_{суюл}$ ни ташкил этади. Газ ҳолатидан конденсирланиш (қўйилиш) ҳолида критик ўта тўйиниш $\alpha = P/P_0$ коэффициенти 10 тартибидаги катталик бўлади. Махсус тажрибалар бу баҳолашларни тасдиқлайди.

Энди янги фаза марказларининг гетероген ҳосил бўлиши жараёнини ўта тўйинган буғнинг силлиқ, текис, тоза тагликка ўтиши мисолида кўрамиз. Бунда ҳўлланиш мувозанатий L^0 бурчаги учта сирт тарангликлари мувозанати шартидан аниқланади:

$$g_{бк} = g_{ck} + g_{сб} \cos \varphi \quad (II.18)$$

$g_{бк}$, g_{ck} ва $g_{сб}$ — буғ-қаттиқ жисм, суюқлик-қаттиқ жисм ва суюқлик-буғ чегаралари сиртларининг солиштирма эркин энергияларидир.

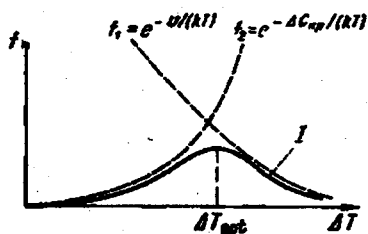
Гетероген марказлар ҳосил бўлиши ҳодисасида тизим эркин энергияси ўзгариши:

$$\Delta G = (4\pi\gamma^2\theta_{\text{сб}} - \frac{4}{3} \frac{\pi\gamma^2}{V} RT \ell_n P/P_0) \frac{(1 - \cos\theta)^2 (2 + \cos\theta)}{4} \gamma_{\text{сб}}. \quad (\text{II.19})$$

Гомоген ҳолдагига нисбатан ΔG да охириги каср кўпаювчи қўшимча пайдо бўлди. Демак,

$$\Delta G_{\text{кр}}^{\text{гет}} = \Delta G_{\text{кр}}^{\text{гам}} \frac{(1 - \cos\theta)^2 (2 + \cos\theta)}{4} = \Delta G_{\text{кр}}^{\text{гам}} f(\theta). \quad (\text{II.20})$$

Баъзи жузъий ҳолларни кўрайлик: $\theta = 180^\circ$ - суюқлик таг-ликни тўла ҳўлламайди. Бу ҳолда $\Delta G_{\text{кр}}^{\text{гет}} = \Delta G_{\text{кр}}^{\text{гам}}$, суюқлик ва таглик зарралари деярли ўзаро бирикмайди. $\theta = 0^\circ$ - янги фаза тагликни тўла ҳўллайди, $\Delta G_{\text{кр}}^{\text{гет}} = 0$, марказлар ва таглик зарралари эса ўзаро бирикади.



II.11-расм.

$$f(\theta) = \frac{(1 - \cos\theta)^2 (2 + \cos\theta)}{4}$$

функциянинг мувозанат ҳўллаш θ бурчагига боғланиш графиги.

$\theta^0 < \theta < 180^\circ$ ҳолда гомоген марказ ҳосил қилишдан кўра, энергетик нуқтаи назардан гетероген марказ ҳосил қилиш анча қўлай.

Яна шуни айтиш кераки, кристалл фаза марказларнинг газ ёки суюқ фазалардан гетероген ҳосил бўлиши ҳолида марказ ва тагликнинг анизотроп деформациясини ҳисобга олиш зарур бўлади.

Гетероген кристаллик фаза марказлари ҳосил

бўлишида киришмалар муҳим таъсир кўрсатиши мумкин. Чегаравий ҳўлланиш бурчаги, марказнинг ҳосил бўлиши фаллаш энергияси ва бу жараённинг тезлиги киришмалар зичлигига боғлиқ бўлади.

Тагликнинг нуқсонлари ҳам қаралаётган жараёнларга муҳим таъсир қилади.

Энди янги фаза марказлари гетероген ҳосил бўлиши тезлиги тўғрисида тўхталамиз.

Бирлик юзага нисбатан бу тезлик:

$$I^{\text{гет}} = Z\omega_{\text{кр}}^{\text{гет}} n_{\text{кр}}^{\text{гет}}, \quad (\text{II.21})$$

бунда, Z — мувозанатсизлик омили, $n_{\text{кр}}^{\text{гет}}$ — критик ўлчамли марказлар зичлиги:

$$n_{\text{кр}}^{\text{гет}} = n_1 \exp\left(-\frac{\Delta G_{\text{кр}}^{\text{гет}}}{KT}\right). \quad (\text{II.22})$$

Баъзи бошқа омиллари ҳисобга олинганда шу келтирилган (II.21) ифода мураккаброқ тус олади.

Баён қилинган янги фаза ҳосил бўлишининг термодинамик назарияси ҳозиргача олинган кўпчилик тажриба натижаларини қониқарли тушунтира олади, у марказлар ўлчамлари ва ҳосил бўлиши тезлигининг ўта тўйиниш, таглик, температураси ва унинг табиатига боғлиқлигини тўғри башорат қилади. Аммо уни катта ўта тўйиниш ҳоллариға татбиқ қилиб бўлмайди.

6.2. КРИСТАЛЛАР ЎСИШИ МЕХАНИЗМЛАРИ ВА КИНЕТИКАСИ

Кристаллнинг ўсиш тезлиги унинг сиртида атомлар жойлашиши қандайлигига боғлиқ. Идеал (мукаммал) кристаллар бурчаклари, сиртлари атомлар жойлашиши бўйича уч турга бўлинади: **сингуляр**, **вицинал** ва **сингулярмас (диффуз)** сиртлар бўлади. Идеал шароитда ҳеч қандай поғоналарсиз бўлган силлиқ ёқлар **сингуляр** сиртлар дейилади. Сингуляр ёқлар нисбатан кичик эркин сиртий энергияға эға ва уларда атомлар зич тахланган.

Вицинал сиртлар сингуляр сиртларнинг бевосита яқинида йўналган сиртлар ҳисобланади.

Улар, сингуляр ёқлар билан кичик бурчак ҳосил қилиб, узун сингуляр ёқларнинг поғонали ясси қисмларидан иборат бўлади. Вицинал ёқлар поғонали бўлгани туфайли сингуляр ёқларникидан каттароқ сиртий энергияға эға.

Сингулярмас ёқлар сингуляр ёқлар билан етарлича катта бурчаклар ҳосил қилади ва кўп поғонали бўлади. Бу ёқлар энг катта сиртий энергияға эға.

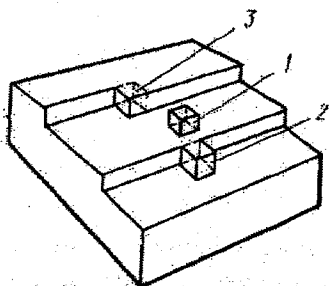
Айтилган ёқлар сиртлари II.12-расмда тасвирланган.

Юқори температурада сингуляр ёқлар силлиқлиги йўқолиши ва улар сингулярмас бўлиб қолиши мумкин. Бу ҳодиса кристаллнинг суюлиш нуқтасидан пастда юз бериши мумкин.

Қатламли ўсиш сингуляр ва вицинал сиртларда амалга ошади. Ўсаётган сиртига тушган атомли поғона синиғида муштаҳкам боғланади (II.13-расм, 3).



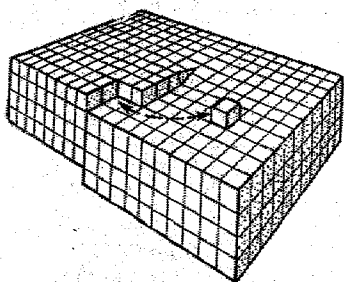
II.12-расм. Содда кубик панжарада турлича йўналган бурчак сиртларининг тузилиши.



II.13-расм. Атом-силлик сиртнинг ўсиш модели.

Агар кубик панжара қаралса, мазкур (3) ҳолатда атом 6 қўшнидан учтаси билан боғланади. 2-ҳолатда атом фақат иккита, 1-ҳолатда эса фақат битта қўшни атом билан боғланган бўлади.

Ташқи фазадан кристалл сиртига тушган атом ўз энергияси қисмини панжарага беради ва кристалл сирти атомлари боғланиш кучлари таъсирида бу сиртга ютилади (ёпишади). Поғона синиғи тўлдирила боради, у тамоман тўлиб бўлганда яна келган атом бошқа поғонага ёпишиб синиқ ҳосил қилади, кейинги келган атомлар унинг қаторига жойлаша боради, бу қатор тўлгач, янги қатор тўлдирила бошлайди ва бу жараён давом этиб кристалл ўса боради. Бундай ўсиш механизми учун қандайдир критик ўта тўйиниш бўлиши зарур. Тажриба ҳақиқий ҳолларда анча кичикроқ тўйиниш бўлганида ҳам кристалллар тез ўсишини кўрсатди. Бундан кристалл ўсиши сиртида поғоналар ҳосил қилувчи манба бор бўлади деган хулоса келиб чиқади. Ҳақиқатан ҳам, бундай манба вазифасини, масалан, **винтсимон дислокация** бажариши мумкин, чунки у сиртга чиқиб йўқолмас поғона ҳосил қилади (II.14-расм).



II.14-расм. Винтсимон дис-
локация асосида ўсувчи
кристалл ёқи.

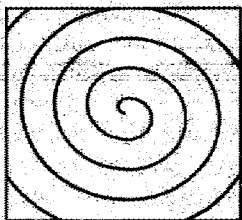
Винтсимон дислокациялар ёрдамида ўсиш жараёни идеал кристаллда поғонали ўсиш механизмига ўхшаш бўлади: винтсимон дислокация туфайли сиртда ҳосил бўлган поғоналарда синиқ (излам) лар бўлиб, у жойларга ютилган атомлар тизила бошлайди, поғоналар винтсимон тарзда ўса боради — кристалл ўсади (II.14-расм).

Сингулярмас сиртларда кристаллларнинг **нормал ўсиши** амалга ошади. Бу сиртлар (атомлар ўлчамида) гадир-будир

бўлганлиги сабабли уларда синиқлар бир текис жойлашган, янги зарралар сиртнинг ҳар қанақа жойида қўшилиб боради. Бу ҳодисада кристалл ёқлари ўзига тик равишда ўсади. Шунинг учун бу ўсиш механизмини **нормал ўсиш** дейилади.

6.3. КРИСТАЛЛАР ЎСИШИНИНГ СИРТҲИЙ КИНЕТИКАСИ

Суюлма (газ, буғ) ва ўсаётган кристалл чегарасини **кристалланиш фронти** дейилади.



II.15-расм. Винтсимон дис-
локация таъсирида ўса-
ётган сирт кўриниши.

Олдин айтилганидек, винтсимон дислокация ҳосил қилган поғонага атомлар қўшила бориб, у спиралга айланади, ўсаётган сиртда пирамидалар вужудга келади (II.15-расм).

Газ фазасидан кристалланиш ҳолида бевосита бугдан (газдан) ўсаётган сирт поғонасига кам зарра тушади, чунки бугнинг зичлиги кичик ва сирт ҳам каттамас. Шунинг учун кристалл ўсишига сиртнинг турли қисмларида ютилган зарраларнинг диффузион оқими асосий ҳисса қўшади.

Бу қисмлар юзи катта, уларга ўтириб қолган ва кейин дислока-

цион поғона томонга диффузияланувчи зарралар кўп бўлади. Бу ҳолда сиртнинг (қатламдор-спиралсимон) ўсиши тезлиги (кристалланиш фронти силжиши тезлиги):

$$v = k_1 \Omega n_0 v k_2 e^{\frac{W}{kT}} \left(\frac{\sigma^2}{\sigma_1} \right) \tanh \frac{\sigma_1}{\sigma}, \quad (\text{II.23})$$

бунда, k_1 ва k_2 — адсорбцион қатлам ва синиқлар орасида зарралар алмашилиш коэффициентлари, Ω — зарра ҳажми; n_0 — кристалл атомлари сиртий зичлиги, n — зарра тебранишлари частотаси, σ — ўта тўйиниш, $\sigma_1 = (2\pi\gamma_{кр}/l_s)$ σ — марказ (шўртак)нинг критик радиуси, $r_{кр}$ — адсорбланган ҳолатда зарранинг ўртача кўчиши, W — зарранинг боғланиш энергияси.

Паст ўта тўйинишлар ($\sigma < \sigma_1$) ҳолида ўсиш (кристалланиш фронти силжиши) тезлигининг ўта тўйинишга боғланиш қонуни келиб чиқади:

$$v = k_1 \Omega n_0 k_2 v e^{\frac{W}{kT}} \frac{\sigma^2}{\sigma_1}. \quad (\text{II.24})$$

Катта ўта тўйинишлар ($\sigma \ll \sigma_1$) ҳолида:

$$v = k_1 \Omega n_0 v k_2 \sigma e^{\frac{W}{kT}}. \quad (\text{II.25})$$

Битта дислокациянинг ўзи бутун кристалл ёқининг ўсишини таъминлай олади.

Кристаллнинг суюлмадан ўсишининг сиртий кинетикаси фақат кристалланиш сирти тузилишига эмас. Балки суюлманинг қовушоқлигига ҳам боғлиқ, чунки бу кристалл ўсишига ҳалақит берадиган сабабдир.

Атом ўлчамларида ғадир-будир сиртлар нормал(тик) механизми бўйича ўсади. Уларда ўсиш марказлари сирт атомлари зичлиги (10^{18} м^{-2}) тартибида бўлади. Бу ҳолда сиртнинг ўсиши тезлиги кристалланиш фронти(сирти) дағи ўта совишга пропорционал:

$$v \sim D T. \quad (\text{II.26})$$

Атом ўлчамларида силлиқ сиртлар қатлам-қатлам бўлиб ўсганда,

$$v \approx \Delta T \exp(-B/T\Delta T), \quad (\text{II.27})$$

қопламли-спирал бўлиб ўсганида

$$v \sim \Delta T^2$$

(II.28)

бўлиши аниқланган.

6.4. КРИСТАЛЛАР ЎСИШИДА КЎЧИШ ЖАРАЁНЛАРИ

Ўсиш сиртидаги кинетик ҳодисалар билан бир қаторда кристалланишда иссиқлик ва масса кўчиш жараёнлари муҳим ўрин тутadi. Бу жараёнларни тегишли дифференциал тенгламалар тизимини ечиб таҳлил қилинади. Улар кристаллнинг шаклланишида, нуқсонлар ҳосил бўлишида, киришмалар киритиш жараёнларида катта аҳамиятга эгадир.

Кристаллар ўсишига киришмалар таъсири. Бу таъсир турли кўринишда юз беради. Баъзи ҳолларда киришмалар кристаллар ўсишини тезлаштиради, баъзи ҳолларда эса секинлаштиради.

Масалан, сиртий фаол киришмалар ўсаётган ёқда (сиртда) ўсиш марказлари ҳосил қилинишига муҳим таъсир қиладди. Агар киришма молекулаларини ютиб олган поғоналар синиқлари ўсишнинг фаол нуқталари бўлмай қолса, кристаллнинг ўсиши секинлайди. Масалан, газ фазасида ўстириляётган германий кристаллининг ўсиш тезлигини кислород киришмаси бир-икки мартага камайтириши мумкин.

Киришмаларнинг кристаллар ўсишига таъсирининг бир қанча бошқа кўринишлари ҳам бор.

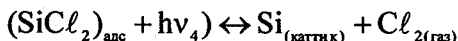
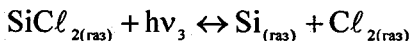
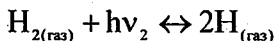
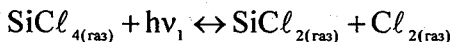
Кристаллар ўсишини тезлаштирувчи усуллар ҳам бор. Улар ёрдамида кристаллар ўсиш тезлигини ошириш, тузилишини мукамалроқ қилиш, кристалланиш температурасини пасайтириш, легирлаш (киришмалар киритиш) жараёнларини бошқариш мумкин.

Ўсаётган кристаллга электромагнетик нурланиш, электрик майдон ёки акустик тўлқинлар билан таъсир қилиб, унинг ўсишини тезлатиш мумкин деб ҳисобланади.

Масалан, газ фазасидан ўстириляётган кремний кристаллига $\lambda = 230-370$ нм диапазондаги ултрабинафша нурлар таъсир қилса, жараён температураси пасаяди, кристалл ўсиши икки марта тезлашади, тузилиши эса мукамаллашади.

Ёруғликнинг монохроматик манбаларини (масалан лазерларни) қўлланиш жараён ёки реакциянинг айрим босқичларига нисбатан муайян нурланишни танлаб ишлатиш имконини беради.

Масалан, $\text{SiCl}_4\text{-H}_2$ тизимда кремний кристаллини $h\nu$ энергияли фотонлар таъсирида ўстиришда қуйидаги реакциялар бўлиши мумкин.



Дастлабки молекулаларнинг боғланиш энергиялари ҳар хил бўлганлиги сабабли у ёки бу реакция юз берадиган нурланиш тўлқин узунликлари турлича бўлади.

Бундан ташқари, электромагнетик нурланиш, айниқса, яримўтказгичларнинг ўсиш, сиртини уйғотади, нурланиш тушган жойда кристалл ўсишига эришиш мумкин, бу эса микроэлектроника учун катта аҳамиятга эгадир.

Электронлар нурлари таъсирида ҳам ўстириш жараёнларини тезлаш, маҳаллий ўсишни амалга ошириш мумкин.

Электрик майдон ҳам масса кўчишини тезлантириш ва ўсиш сиртида жараёнларни фаоллаш эвазига кристалл ўстиришни жадаллаштиради. Газ фазасидан кристаллар ўстиришда электрик майдон таъсир қилса, молекулалар қутбланиши юз беради, бу эса кўчиш жараёнларини рағбатлантиради. Электрик майдон абсорбланган (ютилган) атомга (молекулалар) уюшмасини деформациялаб, уларнинг парчаланиши фаоллаш энергиясини ўзгартириб, ўсаётган сирт қурилишини тезлатади, баъзи ҳолларда ўсиш тезлиги икки мартагача ортади.

Ташқи электрик майдон молекулалари катта дипол моментларга эга бўлган таркибловчилар кўчишига кучли таъсир кўрсатади, у таркибловчилар тақсимооти коэффициентларини ўзгартириши мумкин. Бир жинс бўлмаган (ҳар хил жойда кучланганлиги ҳар хил) электрик майдонларнинг катта кучланганлиги мавжуд жойларда қутбланиш юқори бўлади, кристалланишда қатнашувчи молекулалар ионланиши мумкин, бу эса кристалланишни жадаллаштиришга олиб келади.

Газ фазасини (биқсима ёки юқори частотали зарядсизланиш орқали) ионлантириб, ташқи электрик майдон таъсирини янада кучайтириш мумкин. Масалан, кремний буғини қисман (30%) ионлаб ва ионларни ўсувчи кремний кристаллига тезлатувчи кучланиш (-10 кВ) таъсирида йўналтириб, анча паст температураларда кремний монокристаллини ўстириш мумкин. Ток зичлиги бу ҳолда 100 мкА/см².

Назорат саволлари

1. Кристалланиш марказлари қандай ҳосил бўлади ёки қандай ҳосил қилинади?
2. Кристаллар ўсиши жараёни қандай кечади?
3. Кристаллар ўсишида сиртнинг аҳамияти қанақа?
4. Кристаллар ўсишида қандай кўчиш жараёнлари юз бериб туради?
5. Кристаллар ўсишини тезлаштирувчи усуллар қандай?

7-БОБ. ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ИШЛАБ ЧИҚАРИШДА ФЙДАЛАНИЛАДИГАН МОДДАЛАР

Ҳозирги замон электроникаси талабларини қаноатлантирадиган яримўтказгич моддалар ишлаб чиқариш жараёнлари кўп босқичли ва кўп асосий хом ашёлар ёрдамчи моддалар иштироки билан амалга оширилади. Бу ишлаб чиқаришда физик ва кимёвий жараёнлар муайян кетмакетлик ва биргаликда боради.

Яримўтказгич моддалар жуда тоза бўлиш зарур. Шундагина уларнинг ажойиб хоссалари намоён бўлади, бундан равшанки, яримўтказгич моддалар олиш саноатида фойдаланиладиган моддалар ҳам етарли даражада тозаланган бўлиши керак. Яримўтказгичлар электроникасининг тез суръатлар билан ривожланиши тоза моддалар технологиясининг ўсиши билан чамбарчас боғланган.

7.1. ТОЗА МОДДА ТУШУНЧАСИ. ТОЗА МОДДАЛАР БИЛАН МУОМАЛА ҚИЛИШ ҚОИДАЛАРИ

II бўлимнинг 5-бобида моддаларни бир-биридан ажратиш ва тозалаш усуллари тўғрисида маълумотлар баён қилинган эди. Биз бу ерда тоза модда тушунчасига яна тўхталиб ўтамиз. Яримўтказгичларни олишда хом ашёни тозалашдан ташқари, ёрдамчи моддалар ҳам, технологик жараёнлар олиб бориладиган идишлар, қурилмалар моддалари эриб ёки буғланиб керакли маҳсулотни ифлосламаслиги чораларини кўришга тўғри келади.

Идеал тоза модда нуқсонсиз бўлиб, бир вақтда кимёвий (киришма атомлар йўқ!) ва физик(тузилиш нуқсонлари йўқ!) тозалikka эга бўлиши керак. Идеал тоза модда олиш мумкин эмас, аммо кераксиз киришмалар жуда кам миқдорда бўлган юқори даражада тоза модда олиш мумкин. Бунинг учун назорат қилинмайдиган киришмалар зичлиги муайян чегарадан паст бўлиши керак. Масалан, идеал тоза хусусий кремнийда электронлар ва коваклар сони хона температурасида

10^{10}см^{-3} чамасида назорат қилинмайдиган киришмалар сони бу миқдордан кам бўлмаса, хусусий кремний хоссалари намён бўлмайди.

Одатда, кремний донор ва акцептор киришмалар билан легирланади(легирлаш-киришма киритиш демақдир), бу ҳолда ҳақиқий кремний кристаллидаги назоратсиз киришмалар миқдори киритилган киришмалар миқдоридан камида бир тартиб оз бўлиши керак. Мисол учун, солиштирма қаршилиги 8 Ом см($n \approx 1 \cdot 10^{15}\text{см}^{-3}$) бўлиши талаб қилинадиган n-тур ўтказувчанликли кремний олиш учун 120 Ом·см ли дастлабки модда (яъни акцептор киришмаси $1 \cdot 10^{14}\text{см}^{-3}$ дан кичик зичликли модда) талаб қилинади. Агар кремнийда атомлар зичлиги $\approx 10^{22}$ ат/см³ эканини эсга олсак, бу ҳолда кремнийнинг 10^8 (юз миллион!) атомига 1 тагина акцептор атоми тўғри келади.

Ўта тоза моддалар таркибида назоратланадиган киришмалар миқдори(масса бўйича) $10^{-4}\%$ дан ошмаслиги, кераксиз киришмалар миқдори эса $10^{-6}\%$ дан ортиқ бўлмаслиги керак. Кейингилардан мутлақо қутилиш мумкин эмас, одатда ўта тоза моддаларда ҳам 15-20 элемент мавжуд бўлиши назорат қилинади. Аслида жуда тоза моддаларда даврий тизим элементларидан кўпи мавжуд бўлади. Маслан, галлий фосфиди GaP да 72 хил киришма аниқланган.

Дастлабки ва ёрдамчи моддалар тозалигини сақлаш учун алоҳида шароит талаб қилинади (тахлаш, сақлаш учун алоҳида жой ва уни тоза тутиш ва ҳ.к)

7.2. АСОСИЙ ВА ЁРДАМЧИ МОДДАЛАР

Яримўтказгичлар технологиясида кўп сондаги элементлар ишлатилади. Уларнинг баъзилари фақат легирловчи киришмалар бўлса, бошқалари бир вақтда яримўтказгич бирикмалар таркибловчилари ва элементар (сода) яримўтказгичларда легирловчи киришмалар вазифасини ўтайди.

Алюминийдан (Al) асосан кремний технологиясида акцептор типидagi легирловчи киришма сифатида фойдаланилади. Юқори даражада тоза алюминий (99,999%) сувга нисбатан барқарор. Суюлтирилган азот кислотада, олтингургурт кислотасида сустроқ эрийди, туз кислотаси (HCl) унга таъсир қилмайди. Емирувчи ишқорлар алюминий билан фаол ўзаро таъсирлашади.

Намли ҳавода сақланганда ёки қиздирилганда алюминий оксидланади. Унинг сиртида ҳосил бўладиган юпқа (Al_2O_3) пардаси жуда мустаҳкам ва металлни янада оксидланишдан сақлайди.

Суюлган алюминий жуда фаол-ҳаводаги кислород билан, шунингдек, оксид бирикмалар (CO_2, CO ва б.) дан оксидланади. Кўп металллар ва моддалар билан (10000°C дан юқори) реакцияга кириша олади.

Алюминийни оксидлардан тозалаш анча қийин.

Бор (В) ҳам асосан кремний технологиясида қўлланиб, у кўп ишлатиладиган акцептор киришмадир.

Бор(В) аморф ва кристаллик шаклларда мавжуд бўлади.

Оддий температураларда бор(В) инерт модда. У сув билан таъсирлашмайди, ҳавода оксидланмайди ва бошқа элементлар билан реакцияга киришмайди. Баъзи бир кислоталарда эримайди, баъзиларида оксидланиши мумкин. Кристаллик бор(В) суюқ ишқорлар, карбонатлар ва нитратлар билан яхши ўзаро таъсирлашади.

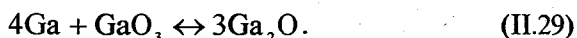
Юқори температураларда бор(В) кимёвий фаол. Кўп элементлар ва бирикмалар билан ўзаро таъсирлашади. 10000°C чамасидаги температурада кристаллик бор(В) оксидланиб, бор (В) ангидриди B_2O_3 ни ҳосил қилади.

Галлий металл яримўтказгич моддалар технологиясида кенг қўлланади. Германийга акцептор киришма сифатида киритилади, GaAs , GaP каби бирикмалар таркибига киради.

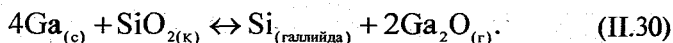
Юқори даражада тоза галлий сувда барқарор ва кислоталарда, айниқса шох ароғида ($\text{H}_2\text{NO}_3 \cdot \text{HCl} = 1:3$) яхши эрийди. Емирувчи ишқорларда у секин эрийди ва водород ажралади.

Қуруқ атмосферада(муҳитда) зона температурасида галлий оксидланмайди. Қиздирилганда металл тез оксидланади.

Галлий суюлмасини оксиддан тозалаш учун суюлган ва озгина қиздирилган металлни, вакуумда, ғовак кварц филтрлардан ўтказилади. Кислоталар аралашмаси билан ювилади ва $650-800^\circ\text{C}$ да 5-6 соат давомида термоишлов берилади, натижада учувчан галлий 1 оксиди (Ga_2O) ҳосил бўлади:



Суюлган галлий 865°C дан юқорида кварц билан реакцияга кириша олади:



Графит суюлган галлий томонидан кам ҳўлланади. 1000-1200°C гача галлийда углерод оз эрийди, аммо юқорироқ температураларда сезиларли эрийди.

Темир яримўтказгичларда чуқур сатҳ ҳосил қилувчи киришма бўлади. Қуруқ ҳавода темир кумушсимон оқ рангли, нам ҳавода занглайди, Fe_2O_3 оксид ва 6. қатлами билан қопланади. Ҳавода қиздирилганда темир 150°C дан юқорида оксидланади.

Темир ҳўл хлор билан қиздирилганда эса бром, йод ва олтингургурт билан таъсирлашади, суюлтирилган кислоталарда осон эрийди, куюқ кислоталарда ҳимояловчи оксидлар билан қопланади (пассивлашади), едирувчи ишқорлар эритмаларида секин, суюлмаларда—тез эрийди. Темирни оксидлардан тозалаш учун 800-900° С да водород оқимида қиздирилади.

Олтин элементар яримўтказгичларда (Ge, Si, Se ва ҳ.к.) легирловчи киришма бўлиб, уларга зарурий фотоэлектрик хоссалар бахш этади.

Олтин катта кимёвий бардошли металл. Ҳавода деярли ҳеч қандай модда билан таъсирлашмайди. Ҳатто суюлиш температурасига қадар юқори температураларда кислород, азот, углерод ва кўп бошқа элементлар билан таъсирлашмайди, кўп кислоталарга нисбатан барқарор, фақат шоҳ арогиди, хлорли сувда ($\text{HCl} + \text{HClO}$) эрийди. Яна у натрий цианиди NaCN да оксидловчилар иштирокида эрийди.

Индий элементар яримўтказгичларда акцептор киришма сифатида қўлланиши мумкин. Индий InSb , InAs , InP каби яримўтказгич бирикмалар таркибига киради.

Кимёвий хоссалари бўйича индий (In) галлий (Ga) га яқин, аммо ундан фарқли равишда, ишқорларда эримайди. Совуқ суюлтирилган кислоталарда индий суст эрийди, аммо қиздирилганда, унинг кислоталарда эрувчанлиги ортиб кетади.

Эриганида индийнинг сиртида индий оксиди In_2O_3 ҳосил бўлади, у эса кварц ёки графит идишнинг деворларига ёпишади, бу хосса индий оксидини индийдан ажратиб олиш имконини беради. Уни паст температурада суюлтирилганда фторопластни идишда сақлаш маъқул. Юқори температурада кварц идишда индий суюлтирилади.

Арсений (As) элементар яримўтказгичларда легирловчи донор киришма вазифасини ўтайди, яримўтказгич бирикмалар (GaAs , InAs) таркибида қатнашади.

Арсений металл ва аморф шаклларда мавжуд бўлади. Аморф арсений 300°C дан юқори температурадаги сиртда арсений буғлари ўтиришидан ҳосил бўлади. Металл арсений хона температурасида сувда эримайди, айрим кислота ва ишқорларда оксидланиб арсений кислотаси H_3AsO_3 ҳосил бўлади.

Туз кислота As га суғ таъсир қилади (у ҳам бўлса, оксидловчилар ва ҳаво кислороди иштирок қилганида).

Арсений ҳавода As_2O_3 оксид пардаси билан қопланади. As нинг тўйинган буғдаги босими температура билан бирга ошиб боради, шу сабабдан уни оксидлардан ажратиш мумкин.

Арсенийнинг барча бирикмалари ўта заҳарли! Энг заҳарлиси арсин AsH_3 .

Қалайи (Sn) кўп яримўтказгичларнинг, айниқса, яримўтказгич бирикмаларнинг асосий донор киришмаларидан бири.

Қалайи оддий температураларда жуда барқарор элемент, у сув билан таъсирлашмайди, суюлган кислоталарда суғ, катта зичликли туғ ва азот кислоталарида эрийди.

Хона температурасида қалайи амалда оксидланмайди. 300°C дан юқорида оксидланиб, SnO_2 ҳосил қилади, бу эса металдан яхши ажралади ва 500°C дан юқорида водород билан осон тикланади. Азот билан қалайи ҳеч қандай температурада таъсирлашмайди.

Қалайи учун идишлар — кварц, алунд, графитдан, паст температурада зангламас пўлат идиш ҳам бўлаверади.

Олтингуғурт (S) — фаол модда. Қиздирганда у кўпчилик металллар билан таъсирлашиб, сульфидлар ҳосил қилади (масалан Cu_2S). Туғ кислотада олтингуғурт эримайди, унга азот HNO_3 ва куюқ олтингуғурт кислотаси (H_2SO_4) 300°C да таъсир қилиб, SO_2 ангидрид бирикма пайдо қилади. Барқарор олтингуғурт шакли органик эритмаларда яхши эрийди.

Ҳавода ёнганда (куйганда), шунингдек, сульфидлар оксидланганда ҳам SO_2 ангидрид ҳосил бўлади. Хона температурасида у газсимон ҳолатда бўлади. Водород атмосферасида 300°C да олтингуғурт H_2S бирикма ҳосил қилади. Бу унча мустаҳкам бўлмаган бирикма 400°C дан юқорида парчаланиб кетади. Ҳавода H_2S куйиб, сув ва SO_2 пайдо бўлади.

Сурма (Sb) яримўтказгичлар технологиясида донор киришма ва шунингдек, бирикмалар таркибловчиси сифатида ишлатилади.

Сурманинг кимёвий хоссалари арсений (As) никига ўхшайди. У оддий температураларда сувга ва ҳавога нисбатан барқарор. Ҳавода қиздирилганда оксидланиб, Sb_2O_3 оксид ҳосил қилади. Суюлтирилган кислоталар Sb га таъсир қилмайди, аммо у шох ароғида ва қуюқ азот кислотада осон эрийди. Туз кислота-сида сурма секин эриб, ундан водород ажралади.

Сурма билан водород **стибин** деб аталган SbH_3 гидрид ҳосил қилади. У сурма иштирок этган яримўтказгич бирикмаларга кислоталар таъсир этганида ҳам ҳосил бўлади.

Стибин кучли заҳарли.

Сурмани графит идишларда (контейнерларда) эритилади, чунки у графит билан таъсирлашмайди. $700^\circ C$ да водород сурма оксидини металл сиртидан узоқлаштиради.

Теллур (Te) яримўтказгич бирикмаларни легирлаш учун ишлатиладиган асосий донор киришмалардандир. Унинг кадмий билан бирикмаси $CdTe$ яримўтказгичдир. Теллурнинг ўзи элементар яримўтказгич.

Теллур ишқорларда эрийди, унга азот ва олтингугурт кислотаси таъсир қилади, аммо у суюлтирилган туз кислотасида суств эрийди. Қаттиқ теллур сув билан $100^\circ C$ дан юқорида таъсирлашади, у кукун кўринишида (ҳавода, хона температурасида) оксидланиб, TeO_2 оксид ҳосил қилади. Бу мустақкам бирикма теллурга нисбатан кам учувчан. Шунинг учун теллурни оксидлардан тозалашда $500-600^\circ C$ да водород оқими билан тиклаш усули қўлланади.

Суюқ теллур унча таъсирчан эмас, шунинг учун суюлтиришда графит ва кварц идишлардан фойдаланилади.

Фосфор (P) элементар яримўтказгичларда, асосан кремнийда, донор киришма сифатида ишлатилади. У баъзи яримўтказгич бирикмалар (GaP, InP) таркибига киради. Қизил фосфор оқ ва қора фосфор аралашмаси бўлади. Буг фазасидан фосфор оқ фосфор кўринишидан зич шаклга ўтади, $250^\circ C$ дан юқорида қизил фосфор ҳосил бўлади. Қизил фосфор — фаол модда: $260^\circ C$ гача қиздирилганда осон ёниб кетади, Пирофорен — ишқаланиш ва зарбадан ёниб кетади. Ҳавода ёнишда P_2O_5 оксид ҳосил бўлади, у учувчан ва намликни ютувчан модда, у намни ҳаводан ютиб, фосфор кислоталар

(асосан H_3PO_4) ҳосил қилади. Буни ҳисобга олиб, уни жипс ёпиладиган (герметик) идишларда сақланади. Уни ишлаштиришдан олдин оксидлардан ва намдан тозалаш учун вакуумда (маълум босимда ва вақтда, 150-200°C да) қуриштилади.

Хром (Cr) галлий арсениди ва галлий фосфидида киришма сифатида қўлланиб, чуқур сатҳлар ҳосил қилади, у мазкур бирикмаларга яримизоляцияловчи хоссаларни етказиб беради. Оддий шароитда хром сувга ва ҳавога нисбатан барқарор. 2000°C га яқин температураларда қиздирилса, хром куйиб, Cr_2O_3 оксид ҳосил қилади. Шу температураларда хром галогенлар — хлор, фтор, бром, йод билан, азот, углерод, кремний, бор ва бошқа элементлар билан таъсирлашади. Суюлтирилган олтингугурт ва туз кислоталари билан фаол таъсирлашади, аммо совуқ азот кислотада эримайди.

Рух (Zn) кўп яримўтказгич бирикмаларнинг асосий акцептор киришмаси вазифасини бажаради, уларнинг ташкилловчиси бўлади (ZnS ва б.).

Рух етарлича фаол, кислота ва ишқорларда яхши эрийди. У хона температурасида тузларнинг сувдаги эритмаларидан мис (Cu), кумуш (Ag), симоб (Hg), сурма (Sb), қалайи (Sn) ва бошқа металлларни сиқиб чиқаради.

Рух кўп бирикмаларни, масалан, оксидлар, хлоридларни осон тиклайди.

Қуруқ ҳавода 150°C дан юқорида рух (Zn) оксидланиб, ZnO оксид пардаси билан қопланади. Нам ҳавода ва сувда ҳам шу оксид пардаси ҳосил бўлади. Рух оксиди металлда эримайди, унинг сиртидан осон узоқлаштирилиши мумкин.

Рух амалда углеродни эритмайди, шу боис унинг учун графит ва алунддан идишлар ясалади.

7.3. КОНТЕЙНЕР МОДДАЛАРИ

Яримўтказгичлар технологиясида қўлланидиган контейнер (идишлар, ҳажмлар) материалларини икки гуруҳга ажратилади: паст температурадаги амалларда — едириш, ювиш ва ҳ.к. ларда қўлланидиган материаллар биринчи гуруҳни ташкил этади. Улардан тахлаш, ташиш ва сақлаш учун ҳам фойдаланилади. Иккинчи гуруҳ материаллар юқори температурада ишлаши керак бўлган буюмлар иссиқлик тугунлари, реакторлар танаси, ампулалар, тигеллар ва қайиқчалар тайёрлашда ишлатилади (иссиқлик тугунлари).

Органик шиша (плексиглас) — шаффоф, рангсиз пластик модда; сув, ишқорлар, спирт ва мойлар таъсир қилмайди, ҳидли (бензол) ва хлорланган (дихлорэтан) углеводородларда эрийди. Бу шишадан яримўтказгичларни едириш ва ювиш учун шаффоф идишлар, яримўтказгичларни сақлаш учун контейнерлар, бокслар қисмлари ва сўргич шкафлар тайёрланади. Энг юқори ишлаш температураси 75° С.

Органик шишани саноат турли қалинликдаги варақлар (тасмалар) ва плиталар (блоклар) кўринишида чиқаради. У механик усуллар билан 100-110° С иссиқда тез юмшаб, осон елимланади. У елимловчи моддалар таркибига киритилади.

Винипласт — полихлорвинил пластмасса, сариқ, қўнғир ёки кулранг рангли; кимёвий жиҳатдан оргшишага нисбатан бардошлироқ; кислоталар, ишқорлар ва турли тузлар эритмаларига нисбатан барқарор. Оргшиша қўлланган мақсадларда ишлатилади. Энг юқори ишлаш температураси 80°С.

Саноатда винипласт варақлар (тасмалар), қувурлар ва стерженлар кўринишида ишлаб чиқарилади. У 120-140°С да иссиқ қисиш билан ва механик усуллар билан яхши ишланади. 120-140°С да кавшарлаш жойи қиздириб турилса, винипластни иссиқ ҳаво оқими яхши кавшарлайди.

Полиэтилен (этилен полимери) — сиртининг ранги ва характери бўйича юқори молекуляр парафинга ўхшайди. Полиэтилен турли кислоталарга (қуюқ азот кислотасидан бошқа), ишқорларга, тузлар эритмаларига ва турли органик суюқликларга нисбатан барқарор. Полиэтилен фойдаланиш вақтида, турли таъсирлар остида эскиради — сариқ тус олади ва механик хоссаларини йўқотади.

Полиэтилендан асосан энг тоза реагентларни ва сувни сақлаш, ташиш ва тарқатишда фойдаланилади. У канистрлар, банкалар, ампулалар ва ҳ.к. тайёрлашда ишлатилади. Энг юқори ишчи температураси 100°С. У механик равишда яхши ишланади, 250°С гача кавшарлаш жойини қиздирганда босим остида кавшарланади.

Фторопласт — оқ рангли полимер модда. «Фторопласт—4» энг кўп қўлланилади, кимёвий барқарор. Винипласт ишлатилган мақсадларда ишлатилади. Галлий, индий, қалайи, олтингугурт каби осон суюладиган моддаларни суюлтириш ва қуйиш учун тигеллар ва қайиқчалар тайёрлашда қўлла-

нилади. Фторопласт вакуум қурилмалар ва автоклавлар, вентиллар тоза реагентлар ва газлар дозаловчилари қисмларини тайёрлашда ҳам ишлатилади. Фторопластнинг энг юқори ишчи температураси 250°C.

«Фторопласт—4» саноатда варақлар (тасмалар), плиталар, қувурлар, стерженлар ва пардалар кўринишида тайёрланади. Бошқа пластмассалардан фарқли равишда фторопласт қизиганда юмшаб кетмайди. Фторопласт қоплама қатлами металл, шиша ёки керамик буюмларни ташқи таъсирдан сақлайди.

Кварц шиша (кварц) — суюлтириб қотирилган кремний (IV) оксиди SiO_2 дир. Ташқи кўринишидан оддий шишадан фарқ қилмайди. Яримўтказгичлар технологиясида кварц шиша қайиқчалар, тигеллар ва бошқалар учун асосий моддалардан бири. Ундан яримўтказгич моддаларни тозалаш ва синтез қилиш учун хизмат қиладиган аппаратларнинг қисмлари тайёрланади. Кварц шиша яримўтказгичларни едирish ва ювиш учун, шунингдек, юқори даражада тоза кислоталарни сақлайдиган идишларни тайёрлаш учун ишлатилади. Кварц буюмларнинг ишчи температураси 1250° С гача, тигеллар 1500° С гача чидай олади.

Кварц кўп кислоталарга нисбатан юқори кимёвий бардошликка эга. Фақат бундан суюлтирувчи кислота истисно, у кварц билан таъсирлашиб $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ силикагел ҳосил қилади, Лекин, кварц ишқорларда ва уларнинг эритмаларида яхши эрийди.

Кварц кўп элементларга нисбатан бефарқ. Аммо, кварц ишқорий ва ишқорий-ер элементлари (Li, Na, K, Ca, Sr ва ҳ.к.), алюминий, кремний ва б. билан таъсирлашади. У баъзи оксидлар билан ҳам таъсирлашиб, силикатлар ҳосил қилади.

Кварцнинг иссиқликдан кенгайиш коэффициенти жуда кичик, шунинг учун температуранинг кескин ўзгаришларига чидайди. Масалан, муз устида турган кварц тигелга суяк пўлат қўйилса, у ёрилиб кетмайди. Кварцнинг иссиқлик ўтказувчанлиги ҳам жуда кичик.

Шаффоф кварц шишадан қувурлар ва тигеллар ясалади. Қувурлардан шиша пуфлаш усуллари ёрдамида яримўтказгичлар технологиясида ишлатиладиган деярли барча буюмлар тайёрланади. Ношаффоф кварцдан ҳам айрим керакли буюмлар ясалади.

Шаффоф кварцга юқори температурада (1800°C атрофида) кислород-водород алангаси таъсир эттириб ишлов берилади. Кварцни олмос диски станокларда (дастгоҳларда) кесилади.

Кварц буюмларни (қайиқчалар, тигеллар, ампулалар, реакторлар ва ҳ.к.ларни) бевосита ишлатишдан олдин кимёвий — иссиқлик, ишловига дучор қилинади. Яримўтказгичлар суюлмаларининг кварц қайиқчалар сиртига ёпишиб қолмаслиги учун уларга қўшимча ишлов берилади. Бунинг учун қайиқчанинг ички сиртига аморф кварц (оқ қурум) қатлами ўтказилади. У ишлангандан кейин кварц сиртига яримўтказгич суюлмаси ёпишиши жуда камайиб кетади.

Графит углероднинг шаклларида бири эканлиги маълум. Яримўтказгичлар технологиясида ишлатиладиган графит қора рангдаги зич модда, кристалл тузилишига эга, кўп кислоталар, ишқорлар, органик эритувчилар ва металллар билан таъсирлашмайди. Аммо у қуюқ азот кислота билан юқори температурада баъзи металллар билан (темир, бор, кремний ва вольфрам ва б.) билан таъсирлашиб карбидлар (SiC ва б.) ҳосил қилади. 400-500°C гача температураларда графит **ҳавода** оксидланиб, ёниб кетади.

Яримўтказгичлар технологиясида монокристалларни (асосан, Чохральский усулида) ўстирадиган қурилмалар қисмлари тайёрланадиган модда сифатида графит кенг қўлланилади. Бу қисмлар — иситгичлар, экранлар, тигеллар тагликлари ва ҳ.к. Графитнинг вакуумда ёки инерт газлар атмосферасида (муҳиtida) ишчи температураси 2500°C гача.

Графит буюмлар механик кесиш усуллари билан токар ва фрезер дастгоҳларда осон тайёрланади.

Ишлатишдан олдин графит буюмлар вакуум — термик ишловга дучор қилинади.

Графит ғовак тузилишга эга. Кислородли газлар графит ичига кириб, уни бутун ҳажмда оксидлайди ва буюмларни ишдан чиқариши мумкин. Газлар киришини камайтириш мақсадида графитни 1300°C да метан, толуол буғлари муҳиtida бир неча соат тутиб турилади, бу газлар (пироуглеродлар) графит ғовакларини тўлдиради.

Графитнинг бир кўриниши шиша-углерод бўлиб, ундан тайёрланган буюмлар ялтироқ қора сиртли, шишасимон кўриниш ва чиганоқсимон синиққа эга.

Шиша углерод графитдан анча кам кимёвий фаолликка эга. У барча кислоталар ва уларнинг аралашмаларига нисбатан бардошли. Унинг ҳавода оксидланиш тезлиги анча паст. Уни яримўтказгичлар суюлмалари ҳўлламайди. Аммо шиша-углерод буюмлар тозаллиги графит ёки кварцникидан пастроқ. Бу унинг қўлланишини чеклайди.

Контейнер моддалари сифатида нитридлар ҳам қўлланиши мумкин.

7.4. РЕАГЕНТЛАР

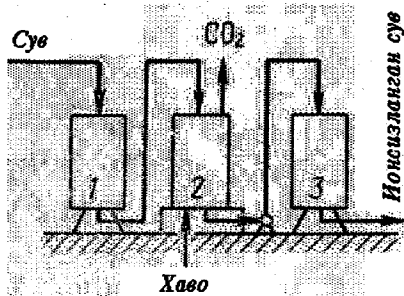
Яримўтказгич моддалар технологиясида **сувдан** гидрокимёвий тайёргарлик амалларида кенг фойдаланилади. Дис-тилланган (тозаланган) сувдан контейнерларни ва ярим-ўтказгичларни дастлаб ювиш, ионсизланган сувдан охириги ювиш учун фойдаланилади.

Дистиλλанган сувни ҳайдовчи қурилмаларда (аппаратларда) олинади, бунда сув қўп киришмалардан тозаланади. Бир неча марта тозаланган сув (дистиλλят)нинг солиштирма қаршилиги 20°C да 0,1 дан 0,3 МОм гача бўлади.

Деионланган (ионсизланган) сувни ионалмашинувчи смолалар билан тўлдирилган колонка (най) орқали дистиλλанган сувни ўтказиб олинади. Бу смолалар кислота ва ишқор гуруҳларига эга бўлган катта полимер органик молекулалар уюмидан иборат бўлади, улар ионларни тутиб қола олади.

Қуруқ ҳаволи смолаларнинг 1 килограммли дистиλλанган сувнинг 1200-1500 л ҳажмини оддий сув қувири сувининг 200 л ҳажмини ионлардан тозалай олади.

Туз кислотаси - HCl нинг сувдаги эритмаси — рангсиз, ҳавода тутовчи шаффоф суюқлик; металлар, оксидлар, гидроксидлар ва тузлар билан осон реакцияга киришади. Унинг зичлиги 1,17-1,19



И.16-расм. Ионсизланган сув олинadиган қурилма: 1-катионитли; 2-газсизлантирувчи; 3-анионитли устун.

г/см³, қайнаш температураси 84°C, сувда 20°C да эрувчанлиги 720 г/л.

Фторли водороднинг (HF) сувдаги эритмаси — рангсиз, шаффоф суюқлик бўлиб, ўткир ҳидли, ҳавода тутайди, металллар билан таъсирлашиб, фторидлар ҳосил қилади. Бу эритма билан осон таъсирлашади, шишанинг ва бошқа силикатларни бузади. Зичлиги 0,94 г/см³, қайнаш температураси 19°C.

Азот кислотаси (HNO₃) — рангсиз ёки озгина сариқроқ шаффоф суюқлик, ўткир ҳидли, ёруғда ёки қиздирилганда H₂O, O₂, NO₂ ларга парчаланади.

Азот кислотаси энг кучли оксидловчилардан бири бўлиб, олтин, платина, иридий ва радийдан бошқа деярли барча металллар билан реакцияларга киришади. Алюминий, темир ва хром суюлтирилган азот кислотаси билан ўзаро таъсирлашади, аммо қуюқ азот кислотаси билан таъсирлашмайди — металл сиртида юпқа оксид қатлами ҳосил бўлади. У сувда яхши эрийди, 84°C да қайнайди.

Сирка кислотаси (CH₃COOH) — ўзига хос ўткир ҳидли рангсиз шаффоф суюқлик, сувда яхши эрийди, кучсиз кислота. Сувсиз сирка кислотаси — қаттиқ модда, музга ўхшайди, 16°C да суюлади, 118,1°C да қайнайди; ҳавода ёнади — чақнаш температураси 38°C. Сирка кислотасининг тўйинган буғи билан ҳаво аралашмасининг портлаш хавфи бор. Портлашнинг пастки чегараси 35°C, юқоригиси 76°C; зичлиги 82-550 мг/л оралиғида.

Бор кислотаси (H₂BO₃) — ҳиди йўқ, рангсиз. Зичлиги 1,44 г/см³, 70°C да B₂O₃ ангидрид ва сувга парчаланади.

Пергидроль — водород пероксид (H₂O₂) нинг 30%ли сувли эритмаси осон парчаланадиган бирикма бўлиб, кучсиз кислота хоссасига ва кучли оксидлаш қобилиятига эга.

Калий гидроксиди — емирувчи кали (KOH) — рангсиз жуда нам ютувчи кристалдир, кислоталарни нейтраллаб тузлар ҳосил қилади, сувда яхши эрийди—20°C да унинг эрувчанлиги 1100 г/л, зичлиги 2,04 г/см³, суюлиш температураси 360°C, қайнаши 1324°C да.

Натрий гидроксид — емирувчи натр, каустик сода (NaOH) — қаттиқ оқ модда, кислоталарни нейтраллаб тузлар ҳосил қилади, сув буғларини ва CO₂ ни тез ютади, сувда яхши эрийди — 20°C да унинг эрувчанлиги 1000 г/л, зичлиги 2,13 г/см³, суюлиш температураси 328°C, қайнаши 1388°C да.

7.5. ГАЗЛАР

Хлор (Cl_2) — ўткир ҳидли яшил-сариқ газ; хона температурасида 6,62 атм босим остида суюлади. Газсимон хлорнинг зичлиги $3,16 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$, суюқ ҳолатда $-1,45 \text{ г/см}^3$ бўлади.

Хлор углерод, кислород ва азотдан бошқа кўп элементлар билан осон ўзаро таъсирлашади. Ёруғда ва қиздиришда водород билан портлаб бирикади. Хлорсиланлар ва германий тетраҳлоридини синтез қилишда ҳам ашё сифатида ишлатилади.

Газни сувдан тозалаш учун уни силикагел тўлдирилган филтёрлар орқали ўтказилади.

Азот (N_2) — рангсиз, ҳидсиз газ; зичлиги газсимон ҳолатда $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$, суюқ ҳолатда $0,891 \text{ г/см}^3$. Суюқ азотнинг қайнаш температураси 77,2 К.

Азотдан инерт муҳит сифатида кенг фойдаланилади, ёнувчи ва захарловчи газлар бўлган аппаратларни шамоллатиш учун, ёнгинни ўчириш ва бошқа мақсадларда қўлланилади. Суюқ азот қурилмаларни совитиш учун ишлатилади.

Тоза ҳолдаги водород, аргон ва гелий каби газлар яримўтказгичлар технологиясида энг керакли моддалар вазифасини ўтайди.

Водород (H_2) — рангсиз, ёнувчи газ, ҳиди йўқ, энг енгил газ — зичлиги $9 \cdot 10^{-5} \text{ г/см}^3$; кўп элементлар билан ўзаро таъсирлашади, кўп суюқ металлларда эрийди, кислород билан фаол таъсирлашади.

0,1% (ҳажм бўйича)дан кам сувли бўлган водороддан хлорли водородни синтез қилишда фойдаланилади. Тоза водород хлорсилан ва германий тетраҳлоридлари тиклашда ишлатилади, баъзан эса элементар яримўтказгич монокристалларни ўстиришда ҳимояловчи муҳит вазифасини бажаради.

Кўп миқдорда водородни сувни электролиз қилиш йўли билан олинганда, унда анча сув буғи бўлади. Уни махсус усуллар билан қурилади.

Водородни кислород киришмасидан яхши тозалашни $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$ реакциясига асосланган каталитик усулда амалга оширилади. Каталитик тозалашдан ўтган водородни яна ҳам тозалаш учун уни паст температурали адсорбцияга дучор қилинади.

Юқори даражада тоза водород оз миқдорда баъзи металлларнинг қиздирилган юпқа варақлари (қатламлари) орқали

диффузиялаш усулида олинади, чунки водороднинг диффузия тезлиги бу ҳолда кислородникидан, (масалан, юпқа никель қатламидан ўтганда) 10^8 марта ортиқдир. Бинобарин, бу усул водороддаги кислородни шунча марта камайтиради.

Инерт газлар – аргон ва гелий – яримўтказгичлар монокристалларини ўстиришда ҳимояловчи муҳит сифатида қўлланилади.

Инерт газларни кислород киришмасидан тозалаш кислородни водород билан $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$ реакция бўйича боғлаб (сув ҳосил қилиб) амалга оширилади. Бунинг учун тозаланадиган газга 3-4% (ҳажмий) водород қўшилади.

Тозаланган газлар истеъмол қилинадиган жойга зангламайдиган пўлат ёки қизил мисдан ясалган қувурлар орқали юборилади. Кераксиз пайтларда қувурлар тоза қуруқ инерт газ билан тўлдириб қўйилади.

Назорат саволлари

1. Тоза модда тушунчаси қандай?
2. Тоза моддалар билан қандай муомала қилиш керак?
3. Яримўтказгичлар технологиясида қандай асосий моддалар ишлатилади?
4. Яримўтказгичлар технологиясида қандай ёрдамчи моддалардан фойдаланилади?
5. Контейнерлар қандай моддалардан тайёрланади?
6. Дистилланган ва деионланган сув қандай вазифаларни бажаради?
7. Кислоталар ва бошқа кимёвий моддалар қандай ишларда қўлланилади?
8. Газлар қандай амалларни бажаришда ишлатилади?

8-БОБ. ПОЛИКРИСТАЛЛИК ВА АМОРФ ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ТЕХНОЛОГИЯСИ

Поликристалл (поли-кўп) кўп монокристалл (моно-бир) доналардан ташкил топган кристалл. Тоза поликристалл бевосита яримўтказгичли асбоблар, катта интеграл микросхемалар ишлаб чиқаришда қўлланади ёки яримўтказгич монокристаллар олишда ишлатилади.

Поликристаллик яримўтказгичларни ўстириб олиш уч жиҳатдан аҳамиятлидир: 1) монокристаллар ва эпитаксиал тузилмаларга нисбатан поликристаллик қуйма ёки парда кўринишида яримўтказгич олиш анча содда ва унумдор технологик жараёндир, бу эса яримўтказгич модда ва унинг асосида тайёрланадиган асбобларни анча арзонлаштиради; 2) бундай яримўтказгичларда доналар чегаралари махсус электрик ва рекомбинацион хоссаларга эга ва улардан бир қатор асбобларда фойдаланиш мумкин; 3) кристалл панжарасининг тузилиши жиддий нуқсони бўлмиш доналар чегараси самарали ички геттер вазифани ўтаб, модданинг асосий ҳажмини қолдиқ киришмалар ва хусусий нуқтавий нуқсонлардан тозалашга ёрдамлашади. Бу хосса электрон қурилмаларнинг температура ўзгаришига барқарорлигини ва радиацион бардошлигини оширади.

Амалий қўлланиш учун кўпроқ қуймалар эмас, балки поликристаллик қатламлар маъқул ҳисобланади. Энг кўп қўлланиладиган кремний поликристаллик қатламлардан интеграл чизмаларнинг тарихий қисмлари: резисторлар, диодлар, майдоний ва қўшқутбли транзисторлар тайёрлашда фойдаланилади.

Ерда ишлатиладиган арзон қуёш батареялар яратиш учун поликристаллик қатламлардан фойдаланилмоқда. Агар дона ўлчами заряд ташувчилар диффузион узунлигидан анча катта бўлса, бу ҳолда ҳажмдаги рекомбинацион жараёнларга ва қуёш элементар батареялар ишига кам таъсир кўрсатади. Масалан, кремнийнинг поликристаллик пардасида айрим кристаллчалар (доналар) ўлчами ~ 1 мм бўлса, унда қуёш

нурларини ютувчи қатлам қалинлиги 50-100 мкм чамасида бўлади. Поликристаллик пардалар арзон тагликлар (кварц, шиша, графит, алунд, молибден ва ҳ.к.) асосида олиниб, етарлича самарали қуёш бата-реялар тайёрлаш учун ишлатилади. Уларнинг фойдали иш коэффициенти 12%-15% тартибдан иборат.

Кремнийнинг поликристаллик қатламларини олиш учун таркибида кремний бўлган моддалар — моносилан, дихлорсилан, трихлорсилан ва тетрахлорсилан учувчан моддалар сифатида қўлланиб, газ фазадан кристаллаш усулларидадан фойдаланилади. Энг паст температурада моносиланни термик парчалаш усули бўлиб, бунда ташувчи-газ сифатида гелий ишлатилади. Бу усул 625-725°C да бошқарилувчи катта ўлчамли доналардан тузилган кристалл пардалар олиш имконини беради. Лазер нурланиши таъсирида SiH_4 ни парчалаганда ишчи температурани 120-150°C гача пасайтириш мумкин, аммо бунда дона ўлчами 0,5-1мкм дан ошмайди. Кремнийнинг қалин поликристаллик қатламларини хлорсиланларни юқори температурада водород билан тиклаш жараёнида ҳосил қилинади.

Галлий арсениди GaAs ва бошқа $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$, бирикмалар поликристаллик қатламлари олишнинг энг илгор усули мос гидрид жараён бўлиб, у паст температурада ўстиришни, дона ўлчамини қайталаб ҳосил қилишни ва пардаларнинг юқори даражада бир жинслигини таъминлайди. Пардаларни металл, графит, алунд ва кварц шишадан тайёрланган тагликларда ўстириш мумкин. Бундай бирикмалар пардаларни вакуум ва плазмаларни чанглатиш жараёнлари орқали ҳосил қилиш усуллари кенг тарқалган.

Поликристаллдаги доналар ўлчами муҳим катталик. У ўтказиш температураси, газ фаза таркиби, кристалланиш тезлиги ва таглик турига боғлиқ. Температура ортиши доналарнинг ўртача ўлчами кенгайишига олиб келади. Пардалар қалинлиги ортиши ҳам доналар ўлчамини катталаштиради. Доналар ўлчами киритилган киришма табиатига ҳам боғлиқ бўлади. Кремний поликристаллик қатламларнинг меъёрий ўсиш йўналишлари $\langle 100 \rangle$ ва $\langle 111 \rangle$.

Поликристаллик пардалар доналари ўлчами ва йўналганлигини бошқариш учун қайта кристаллаш жараёни ўтказилади, бунда суюлиш температурасидан пастда мазкур модда-

га термоишлов берилади. Кремний ҳолида бу жараён 1250-1400°C да ўтказилади. 1350°C дан юқорида бир неча соат қиздирилса, қатламдаги доналар ўлчами 3-4 мкм дан 20-30 мкм гача етади. Юпқа қатламлар қайта кристалланиши учун лазер ёки электронлар нури билан қиздириш ва бошқа усуллар қўлланилади. Бу жараёнда доналар асосан <111> йўналишда ўса боради. Донор киришмаларни катта зичликда киритиш рекристаллаш бошланиши температурасини пасайтиради ва доналар ўсишини тезлаштиради, бунинг сабаби — легирланган моддада вакансиялар ортиб кетиши туфайли ўз диффузия тезлигининг ортиб кетишидир. Керакли параметрларга эга бўлган поликристаллик қатламларни аморф тагликларга ўтказилган аморф ва майда кристаллик қатламларни қайта кристаллаш йўли билан олиниши ҳам мумкин, уларнинг сиртида квадрат ёки учбурчак шакли тўрлар кўринишида махсус рельеф ҳосил қилинган бўлади (“графоэпитаксия”). Бу ҳолда дастлаб ўтказилган пардада торгина суюлган зона ҳосил қилинади, уни юза бўйича силжитиб борилади. Таглик сиртига ўрнатилган рельеф қайта кристаллаш жараёнида муайян йўналишли, бирдай ўлчамли доналар ҳосил бўлишини таъминлайди.

Поликристаллик қатламлардан асбоблар тайёрлаш учун уларга керакли киришмалар киритилади. Энг кўп тарқалган усуллар — қатламлар олиш жараёнида газ фазадан легирлаш ва ионлар имплантацияси (киритиш) усуллариدير. п-тур поликристаллик кремний қатлами олишда легирловчи киришма сифатида арсин, фосфин, р-тур олишда диборан ишлатилади. Р, As, Sb ва В ионларини киритишда ионлар энергияси 30÷60 кЭв ва дозаси $10^{11} \div 10^{15} \text{ см}^{-2}$ бўлади, кейин 1000°C да қиздирилади («куйдирилади»). Юқори омли, ярим изоляцияловчи кремний поликристаллик қатламларни олиш учун кислород киритиш усули қўлланилади.

Қатламларнинг солиштирма қаршилиги киритилган киришма зичлигига ғайриоддий боғланган. Кўп ҳолларда поликристаллик қатламлардаги заряд ташувчилар зичлиги киришма зичлигидан анча маротаба кичик. Бу муносабат доналар ўлчамига боғлиқ ва бу ўлчам катта бўлганда монокристаллик қатламлардагисига яқин бўлади. Заряд ташувчилар ҳаракатчанлиги ва яшаш вақти ҳам дона ўлчамига боғлиқ. Чегаралар бўйлаб киришмалар сегрегация даражаси унинг тақсимо

ва диффузия коэффициентларига боғланган бўлади. Киришмалар сегрегацияси чегарадаги маҳаллий нуқсонлар марказлари заряд ҳолатларига муҳим таъсир кўрсатади. Заряд ҳолатлари ўзгариши доналар орасидаги потенциал тўсиқлар баландлигини ўзгартиради, бинобарин, поликристаллик қатламда заряд ташувчилар қўшимча таъсир қилади. Заряд ташувчиларнинг ҳаракатчанлиги ва яшаш вақтининг доналар ўлчамига боғланиш ҳодисаси чегараларнинг электрон ва коваклар сочилиши ҳамда рекомбинацияси жараёнларига қўшидиган ҳиссасидир.

Доноларнинг чегараланиши поликристаллик қатламларда асосий тузилиш нуқсонлари ҳисобланади. Чегаралар тузилиши масаласи охиригача аниқлангани йўқ. Агар икки дона йўналганлиги фарқи 1^0 дан ошмаса, бу ҳолда уларнинг чегарасини кичик бурчакли чегара дейилади. Чегарадаги дислокациялар зичлиги шу бурчакка боғлиқ бўлиб, бурчакнинг ошиши билан у ҳам ошиб боради. Йўналганлик фарқи $3\div5^0$ бўлганда чегарада айрим дислокацияларни пайқаб бўлмайди.

Доналар чегараларида ҳолатлар зичлигини ва потенциал тўсиқлар баландлигини камайтириш учун поликристаллик қатламларга (тўйинмаган кимёвий боғланишларни тўйдирадиган) тез диффузияланувчи киришмалар киритилади. Пардаларга биқсима разряд плазмасида водород муҳитида $\approx 400^0\text{C}$ да ишлов берилганда водород атомлари поликристаллик қатламга киритилади. Бунда водород асосан доналар чегаралари бўйлаб диффузияланади ва ҳажмда ҳеч қандай ўзгаришга сабабчи бўлмайди. Бундай поликристаллик кремний қатламлари $\approx 320^0\text{C}$ гача қизиганда ҳам узоқ вақт барқарор хоссаларга эга бўлади. Мазкур ишлов беришда чегараларнинг рекомбинацион фаоллиги кескин камаяди ва заряд ташувчиларнинг ҳаракат вақти ортади. Бундай кремний асосида тайёрланган қуёш батареялар Ф.И.К монокристаллик намуналарникига яқинлашади. Галлий арсениди поликристаллик пардаларда доналараро чегаралар фаоллиги уларни анод оксидлантириш жараёнида пасайтирилади.

Бир қатор киришмалар поликристаллик кремний қатламларига киритилганда чегараларнинг потенциал тўсиғи баландлиги ва электрик қаршилиги ошади. Булар: кислород, фтор, селен, азот. Доналар чегараси қаршилиги фтор билан плазмавий ишлов берилгандан сўнг, айниқса, кескин

(250 марта) ортади. Бундай ишлов бериш интеграл схема-ларнинг (ИС) варисторлари, конденсаторлари ва бошқа эле-ментларини яратишда қўлланилади.

PbS, PbTe, PbSe поликристаллик пардалари ИҚ нурла-ниши самарали қабулловчилар (детекторлар) сифатида анчадан бери мувоффақият билан фойдаланилиб келин-моқда. $\text{Cu}_2\text{S}-\text{CdS}$, $\text{Cu}_2\text{S}-\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{S}$, $\text{CuInSe}_2-\text{CdS}$ поликрис-таллик гетеротузилмалар асосида 8+10% Ф.И.К. га эга бўлган қуёш батареялари ишлаб чиқарилмоқда. GaAs поликристалли асосидаги қуёш батареялардаги ер шароитида фойдаланиши кенгаймоқда.

Поликристаллик қатламлар физикаси ва технологияси ривожлана борган сари электрон техникада бундай модда-ларга талаб ошиб бораётир.

Яримўтказгич моддаларни поликристаллик стерженлар (таёқчалар) ёки қуймалар шаклида олиш учун **синтез, аж-ратиш** ва **тиклаш** жараёнлари қўлланади.

8.1. ПОЛИКРИСТАЛЛАРНИ СИНТЕЗ ҚИЛИШ

Кимёвий реакциялар йўли билан содда моддалардан му-раккаб моддаларни олиш жараёни **синтез** деб аталади. Яри-мўтказгичлар технологиясида элементар яримўтказгичларнинг оралиқ бирикмаларини, шунингдек, яримўтказгич бирик-маларни олиш учун синтез қўлланади.

Яримўтказгич бирикмаларни синтез қилишнинг асосий усули тўғри синтез усули бўлиб, унда бирикманинг *A* ва *B* таркибловчилари



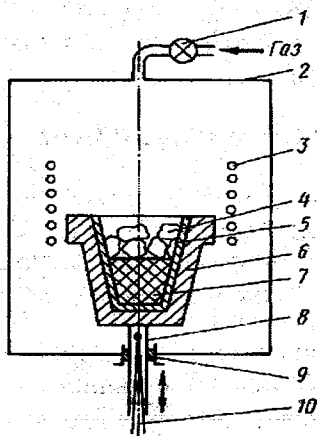
реакциялар бўйича таъсирлашади, бунда *x* ва *y* — таркиблов-чилар улушлари, *n* ва *m* — элементлар гуруҳи санаси.

Парчаланмайдиган бирикмаларни олишда синтезни би-рикма таркибловчиларини бирга қотиштириш йўли билан амалга оширилади. Масалан, индий антимиониди InSb индий ва сурма элементларидан мазкур усулда олинади. Парчалана-диган бирикмаларни олишда таркибловчиларни бирга қотиш-тириш суяқ флюс (қопловчи) қатлами остида бажарилиши мумкин, бунда флюс устида босими учувчан таркибловчи-нинг буғи босимидан катта бўлган инерт газ муҳити бўлади.

Шундай шароитда парчаланадиган дастлаб бирикма, кейин эса кристалл суюлма олинганда учувчан таркибловчи исроф бўлмайди. Флюс сифатида бор ангидриди (B_2O_3) фақат арсенидларни синтезлашда қўлланади, бунда учувчан таркибловчи арсений (As) бўлади, у $817^\circ C$ да суюлади, бор ангидриди эса, $600^\circ C$ да суюлади, демак, арсений бор ангидриди суяқ қатлами остида бўлиб, учиб кета олмайди.

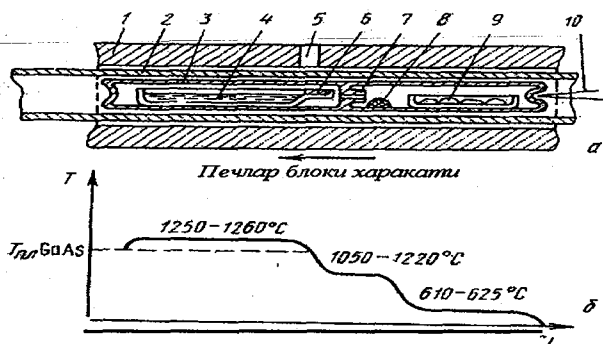
Учувчан таркибловчиси паст суюлиш температурасига эга бўлса, масалан, қизил фосфор ($t_{\text{суюл}} \approx 590^\circ C$), бу бирикмаларни юқоридаги усул билан синтезлаб бўлмайди.

InAs ва GaAs арсенидларни дастлабки таркибловчиларни бирга қоғиштириш йўли билан синтезлашни автоклавда юқори частотали қиздириш қўлланиб амалга оширилади (II.17-рasm).



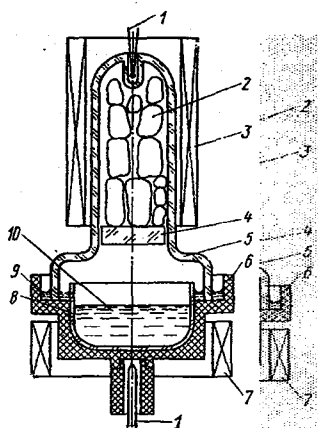
II.17-рasm. Индий ва галлий арсенидларини флюс қатлами остида таркибловчиларни бирга суялтириш усулида синтезлаш қурилмаси: 1-вентиль; 2-юқори босим камераси (автоклав); 3-юқори частотали индуктор; 4-флюс (бор ангидриди); 5-кварц тигел; 6-тигелнинг графит таглиги; 7-бирлашма таркибловчидан аралашмаси; 8-шток; 9-жипслагич; 10-терможуфт.

Бунинг учун графит тагликда турган кварц тигелга (атомлар сони бўйича) бир хил миқдорда турган кварц ва металл (индий ва галлий), улар устига бор ангидриди қатлами жойланади. Зичлантириш ва автоклавни (юқори босим камерасини вакуумлантиригандан сўнг тигелда инерт газнинг юқори босими ҳосил қилинади. Кейин тигел ўрнатилган тагликни юқори частотали индукторга аста-секин қиритиб борилади. Тагликнинг қизиган юқори қисмидан ажралган иссиқлик ҳисобига флюс (B_2O_3) суялади ва бирикма таркибловчилари аралашмасини қоплайди. Энди тигел ўрнатилган таглик-



II.18-расм. Галлий арсениди монокристаллини синтезлаш ва Брижмен усулида ўстириш чизмаси: а-кавшарланган ампулада; б-печлар блокти узунлиги бўйича температура тақсимооти: 1-кўп бўлмали печлар блокти; 2-кварц труба; 3-кварц ампула (реактор); 4-галлий суюлмаси солинган кварц қайиқча; 5-кўриш деразаси; 6-монокристалл; 7-капилляр найча (диффузион затвор); 8-учувчан $\text{Ga}_2\text{O}(\text{Ga}+\text{Ga}_2\text{O}_2)$ аралашма; 9-арсенидли (As) кварц қайиқча; 10-терможуфт.

ни индукторнинг ўртасига жойланади ва уни арсений суюладиган температурагача қиздирилади. Суюлган арсений суюлган металл билан таъсирлашади, реакцияга киришади, бунда ажралган иссиқлик синтезланувчи бирикманинг температурасини суюлиш нуқтасигача кўтариш учун етарли бўлиши



II.19-расм. Парчаланиб кетадиган яримўтказгич бирикмаларни синтезлаш қурилмаси: 1-терможуфт; 2-учувчан ташкилловчи (P, As); 3-электр иситтигич; 4-кварц пластинка; 5-кварц реактор; 6-тигелнинг графит таглиги; 7-тигелни иситувчи; 8-кварц тигел; 9-флюс тўлдирилган гидравлик затвор канали; 10-учмовчан ташкилловчи (индий, галлий) суюлмаси.

керак. Натижада бирикманинг суюлмаси ҳосил бўлади, уни совитиб бирикманинг поликристаллик қуймаси олинади.

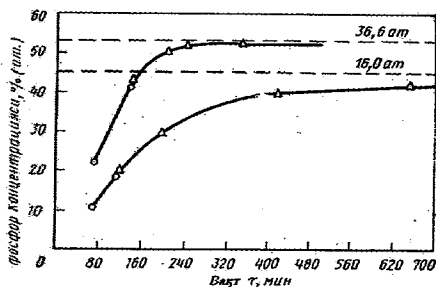
Бироқ қўпчилик ҳолларда, учувчан таркибловчи буғларнинг учмовчан таркибловчи суюлмаси таъсирланиш йўли билан парчаланувчи-яримўтказгич бирикмалар синтез қилинади. Бу жараёни гипс ёпиқ аппаратларда амалга оширилади. Улар кавшарланган кварц ампулалардан учувчан таркибловчи реактор билан учмовчан таркибловчи жойланган тигел бирлашмасидан иборат бўлади (II.18 ва II.19-расм).

Мазкур синтез усулида учмовчан таркибловчи In, Ga суюлмасини синтезланувчи бирикманинг суюлиш температурасигача қиздирилади, сўнгра унга учувчан таркибловчи буғлари берилади. Учувчан таркибловчи буғи керакли босимини ўрнатиш учун бошқариладиган температура тегишлича танланади. Муайян вақт ўтгач ҳосил бўлган бирикма суюлмасини ё совитиб кристалланади, ё ундан монокристалл ўстирилади.

Синтез жараёни вақтини

$$\tau = -2,303V \cdot \lg \frac{C_p - C}{C_p - C_0} (F\alpha)^{-1}, \quad (\text{II.32})$$

ифода бўйича ҳисобланади. C_p , C_0 ва C —мос равишда ишчи суюлмада мувозанатий, бошланғич ва ҳисобланган киришма зичликлари, F — суюлма билан биринчи фаза контакти юзи (см^2), α — буғланиш (таъсирлашиш) коэффициенти ($\text{см}/\text{с}$).



II.20-расм. Фосфор бугининг индий суюлмаси билан ўзаро таъсир жараёни кинетикаси.

Бугланиш коэффициенти суюлмадан бугланаётган ёки суюлма ютаётган учувчан модданинг суюлма-атмосфера чегарасидан ўтиш тезлигидир.

Парчаланадиган яримўтказгич бирикманинг учмовчан таркибловчининг учувчан таркибловчи буғи билан таъсирлашишига асосланган синтез қилиш кинетикаси II.20-расм-да тасвирланган.

Учувчан таркибловчи буғ босими ортган сари синтез тезлиги оша бориб, ўзгармас қийматга эришади, бунда учувчан таркибловчининг суюлмадаги зичлиги C унинг C_0 мувозанатий зичлигига яқин келади. Бу тушунарли, чунки, жараённинг ҳаракатлантирувчи кучи C_p - C айирма бўлади.

Синтезни тезлантириш учун (II.32) га қаранг] суюлмадаги киришманинг C_p мувозанатий зичлигини ошириш керак, F контакт юзини, α — бугланиш коэффициентини ошириш лозим.

Юқорида баён этилган икки усулда синтез қилиш квазипс аппаратларда амалга оширилганда (II.16-расм) катта унумга эришилади, маҳсулот нархи паст бўлади. Бу ҳолда синтез жараёнларини ва монокристаллларни ўстиришни бирга қўшиб олиб бориш қулай, бинобарин, унинг келажаги бор.

Аммо герметик (жипс ёпиладиган) аппаратда синтез қилинса, квазигерметик (квазипс) аппаратдагидан кўра, тозароқ маҳсулот олинади. Бу ҳолдаги амаллар мукамал тузилишли монокристалл ўстириш учун зарур (бир фаза-ли) материал олиш билан бир вақтда уни баъзи киришмалардан тозалаш имконини беради.

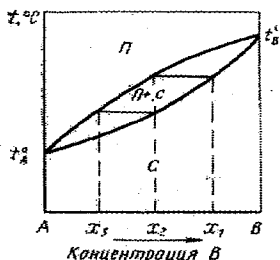
8.2. АЖРАТИШ ЖАРАЁНЛАРИ

Моддаларни тозалаш, яъни уларни асосий модда ва киришмага ажратиш учун турли жараёнлар қўлланади.

Яримўтказгичлар технологиясида фойдаланиладиган физик-кимёвий ажратиш усуллари асосида мувозанатдаги икки фаза таркибидаги фарқ ётади. Масалан, мувозанатдаги суюқлик ва буғ таркибидаги фарқ дистилляциян жараёнларга асос бўлади (содда ҳайдаш ва тозалаш), мувозанатдаги кристалл ва суюлма таркибидаги фарқ кристалланиш жараёнларига асоси бўлади (йўналган кристалланиш), эритма ва сорбентдаги киришмалар фарқи ионалмашинув ажратиш

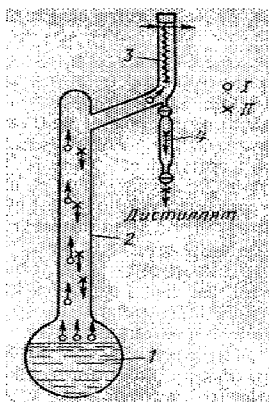
усуллари асосида ётади, экстракцион усулларда эса, чегарадош икки аралашмайдиган суюқ фазаларда киришма ва тозаланувчи модда эрувчанлиги орасидаги фарқдан фойдаланилади.

Бу усуллардан элементар яримўтказгичлар технологиясида уларни хлорид бирикмалардан тозалаш ректификация усули энг кўп қўлланади. Ректификация жараёни узлуксиз боради, юқори унумли, моддаларни чуқур тозалайди. Суюқ эритма ҳолида икки А ва В таркибловчили тизим ҳолатлар диаграммасининг (II.21-расм) юқориси буг соҳаси, пасти суюқлик соҳаси бўлади. Улар орасида икки фазали соҳа жойлашган бўлиб, унда иккала фаза ҳам мавжуд бўлади. Юқоридаги эгри чизиқни конденсация (куюқлашиш) эгри чизиги дейилади, пасткиси эса қайнаш эгри чизиги дейилади.



II.21-расм. Икки учувчан моддалар ҳосил қилган тизимнинг ҳолат диаграммаси (C-суюқлик, Б-буг).

Ректификацион (тозалаш) колоннаси (устуни) II.22-расмда тасвирланган. Ректификация жараёнида ажратиладиган суюқликлар аралашмаси бўлган, иситиладиган I идиш — кубдан буг кўтарилади, 3 совитиладиган конденсаторга етиб бориб суюлади ва колоннанинг пастки 4 қисмига оқиб тушади.



II.22-расм. Ректификацион колонна (устун) чизмаси: 1-буг; II-суюқлик; I-куб; 2-устуннинг ажратувчи қисми; 3-совитгичли конденсатор; 4-дистиллат тўловчиси.

Бу икки қарама-қарши йўналган оқимлар учрашади. Бунда иссиқлик алмашинув натижасида буғ енгил қайнайдиған, суюқлик эса қийин қайнайдиған таркибловчилар билан бойийди, бинобарин, бу таркибловчилар ректификацион колоннанинг қарама-қарши қисмларида тўпланади: енгил қайнайдиған юқориги қисмда, қийин қайнайдиған пастки қисмда тўпланади.

Ректификацион колонна узлуксиз ишлаб турганида унинг маълум жойига дастлабки маҳсулот берилади, юқорисидан енгил қайновчи таркибловчи, пастидан эса қийин қайновчи таркибловчи олиб турилади.

Миқдоран эритманинг А ва В таркибловчиларга ажрати-лиш жараёнининг самарадорлигини ажратиш коэффициенти α_A — тавсифлайди (А таркибловчи-киришма зичлиги оз):

$$\alpha_A = x_2 / x_1, \quad (\text{П.33})$$

бунда, x_1, x_2 — А таркибловчининг суюқлик ва буғдаги миқдо-ри. α_A — ажратилаётган моддалар хоссаларига боглиқ.

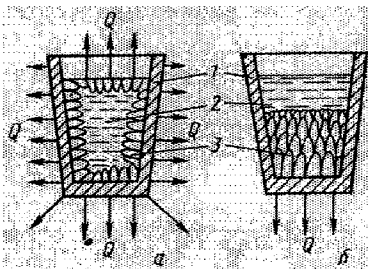
$$\alpha_A = P_A / P_B, \quad (\text{П.34})$$

бунда, P_A ва P_B — А киришма ва В асосий модда тўйин-ган буғлар парциал босимлари. α_A коэффициент 1 дан қанча кўп фарқ қилса, тозалаш жараёни шунча самарали бўлади. α_A ректификацион колонна тузилиши хусусиятларига ҳам бог-лиқ, уни ажратиш омили $F = X_A^0 / X_B^0$ кўринишида ифода қилинади. Ҳақиқий шароитда буғ ва суюқлик оқимлари му-возанатда бўлмайди, шунинг учун тасвирланаётган қурил-манинг самарадорлиги унда бораётган массалар ва иссиқлик алмашинув жараёнларига биринчи навбатда боглиқ бўлади.

Ректификацион колонналарни яхшилаш учун бир қанча тақомиллаштиришлар амалга оширилган (ликопчали, қал-поқли, пардали ректификацион колонналар).

Ректификация моддаларни чуқур тозалашнинг энг кўп тарқалган усулларидан биридир. Унинг қўлланиш температу-ралари соҳаси 4,2 К дан то 1300 К гача. Унинг ёрдамида бирикмаларнигина эмас, балки элементларни (водород, инерт газлар, олтингугўрт, селен, теллур, фосфор, рух, кадмий, симоб ва б.ни) тозалаш мумкин.

Кристаллизацион тозалаш. Йўналган кристалланиш усулларида кристалл суюлма чегарасида ажраладиган яширин суюлиш иссиқлиги Q бир йўналишда — кристалланиш фронти текислигига тик йўналишда олиб кетилади (II.23-расм). Нормал (оддий) кристалланишда иссиқлик суюлмадан ҳамма тарафга тарқалади (II.23, а-расм). Кристалларни ўстиришда уларда киришмалар эрувчанлиги кичик бўлганлиги туфайли киришмаларнинг кўп қисми суюлмада қолади, кристаллга кам ўтади.



II.23-расм. Тигелдаги суюлманинг нормал (а) ва йўналтирилган (б) кристалланиш чизмаси (Q -олиб кетилаётган иссиқлик): 1-тигел; 2-суюлма; 3-кристалл.

Тозалаш ҳодисаси шундан иборат. Бундай тозалашни кўп марта такрорлаб, керакли тозалик ҳосил қилиш мумкин.

C_0 зичликли В киришмаси бўлган А тоза модда суюлмасининг кристалланиш жараёни қарайлик (II.23, а-расм). Температура бирор катталиқдан то ликвидус чизиғидаги 1 нуқтагача пасайганда T_1 температурада суюқ фазадан N_{1-2} таркибли биринчи кристалл ҳосил бўлади, бу солидус чизиғидаги 2 нуқтага мос келади. Суюлма таркиби бу пай-

тда дастлабкисига, яъни C_0 га тўғри келади.

Кристалланиш жараёни давом этган сари, яъни температура 1 нуқтадан 3 нуқтагача пасайганда қаттиқ фаза таркиби солидус чизиғи бўйича 2 нуқтадан 3 нуқтагача, суюқ фаза таркиби эса мовидус чизиғи бўйича 1 нуқтадан 4 нуқтагача ўзгаради. T_{3-4} температурада кристалланиш жараёни тугалланиши пайтида C_{3-4} таркибли суюлманинг охириги томчиси йўқолади.

Агар ликвидус ва солидус чизиқларини тўғри деб олсак, бу ҳолда қаттиқ ва суюқ фазалардаги киришма зичликлари C_K ва C_C лар нисбати ҳар қандай температурада ўзгармас катталиқ бўлади:

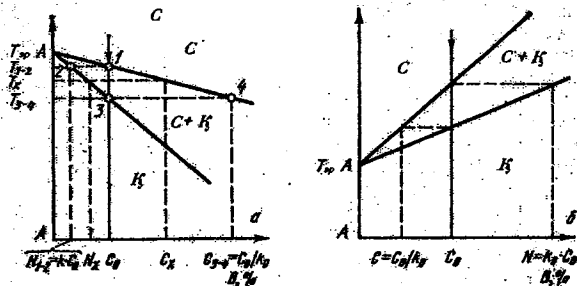
$$K_0 = C_K / C_C = \text{const.}$$

K_0 ни мувозанатий тақсимот коэффициент (сегрегация коэффициент) дейилади.

Қаралган II.23, а-расмдаги ҳолда тоза А моддага В киришма киритилса, А модданинг суюлиш нуктасини пасайтиради, бунда $K_0 < 1$ бўлади. Бу ҳол кўп тарқалган.

Аксинча, яъни В киришма тоза А модданинг суюлиш температурасини кўтарадиган ҳол ҳам бўлиши мумкин (II.23, б-расм), бунда $K_0 > 1$ бўлади. Бу ҳол яримўтказгичларда кам учрайди.

II.24, а-расмда кўрсатилганидек, $K_0 < 1$ бўлганда, ҳосил бўлаётган қаттиқ фаза дастлабки суюлмадагига нисбатан камроқ киришмага эга. Ҳаракатланаётган кристалланиш фронтида суюлмадан ажралаётган киришма ортиқчаси диффузион қатлам ҳосил қилади ва ундан киришма суюлма ҳажмига диффузияланади.



II.24-расм. Тоза А модда — В киришма тизимларининг ҳолатлари микродиаграммасининг қисмлари: а-В киришма А модданинг суюлиш нуктасини пасайтиради ($K_0 < 1$); б-В киришма А нинг суюлиш нуктасини оширади ($K_0 > 1$).

Диффузион қопламнинг б қалинлиги суюлманинг ара-лаштирилиб туриш суръатига, унинг қовушқоқлигига ва киришманинг суюлмадаги D_c диффузия коэффициентига боғлиқ. Натижада тақсимот коэффициент $K_{\text{эфф}}$ суюлманинг кристалланиши мобайнида K_0 мувозанатий коэффициентдан бошқача бўлади, уни **эффектив тақсимот** (эффектив сегрегация) **коэффициенти** дейилади ва у

$$K_{\text{эфф}} = \frac{K_0}{K_0 + (1 - K_0) \exp(-v\delta / D_c)} \quad (\text{II.35})$$

кўринишда ифодаланади, бунда u — кристалланиш тезлиги, кичик тезликлар оралигида $K_{\text{эфф}} = K_{\text{эфф}}(u)$ чизигий функция бўлади, яъни $K_{\text{эфф}} = K_0(1 + u\delta/Dc)$.

$K_{\text{эфф}}$ киришманинг суюлмадаги зичлиги C_c га ҳам боғлиқ. Бу боғланиш $C_c > 10^{18} - 10^{19} \text{ ат/см}^3$ ёки масса бўйича $10^{-3} - 10^{-4}\%$ бўлганида вужудга келади.

$K_{\text{эфф}}$ коэффициентга ўсаётган кристаллнинг кристаллографик йўналиши таъсир кўрсатади.

Суюлманинг жараён мобайнида ташқи муҳит — атмосфера ва контейнер билан таъсирлашиши эътиборга олинishi керак. Масалан, суюлмадан буғланган учувчан киришма суюлма ва атмосфера орасида қайта тақсимланиб туриши мумкин. Бу ҳолда тақсимот коэффициенти қуйидагича бўлади:

$$K_a = \alpha F / (uS), \quad (\text{II.36})$$

бунда, F — кристаллнинг кўндаланг кесими юзи.

Умумлашган тақсимот коэффициенти:

$$K = k + K_a. \quad (\text{II.37})$$

Учмовчан киришма ишлатилганда: $\alpha=0$, $K_a=0$, $K=k$.

Яримўтказгичларни кристаллизацион тозалашни кўпроқ зонавий суюлтириш усули билан амалга оширилади: оловга бардошли узун қайиқчага тозаланадиган моддани кичкина бўлакчалар ёки олдиндан тайёрланган поликристаллик қуйма шаклида жойланади. Сўнгра, қа-йиқчани бир учи билан ҳалқасимон иситгич ичига киритилади, иситгич қайиқчада қуймага нисбатан қисқа узунликдаги қисмида (белбогида) суюлма ҳосил қилади. Крис-талланиш фронтининг орқа чегарасида суюлма кристалланади. Бунда киришма кристалл ва суюлма орасида қайта тақсимланади, аниқроғи, кристалланган қисмдан анча киришма суюлмага ўтиб кетади.

Масалан, агар учмовчан киришма $K=0,5$ га эга бўлса, яъни суюлмани тўйинтирадиган материалда $C_c=1$ бўлса, суюлмадан ҳосил бўлган биринчи кристаллчада $C_k=K$, $C_c=0,5C_c$ ички киришма ҳосил бўлади. Шундай қилиб, кристалл киришманинг дастлабки миқдорининг фақат 50% ини ўзига олади, қолган 50% суюлмага суриб чиқарилади. Суюлмадаги киришма зичлиги суюлган зона қуйма узунлиги қадар сил-

жиганда $G_{x_1} = C_c + 0,5C_c = 1,5C_c$ бўлиб қолади. Бу ҳолда кристаллда киришма зичлиги $C_{k_1} = 0,5 \cdot 1,5C_c = 0,75C_c$ бўлади. Ниҳоят, суюлмадаги киришма зичлиги ўзининг чегаравий қиймати $C_{кр} = C_c \cdot 1/x = 2C_c$ га эришганда киришма бутун кристалл узунлиги бўйича текис тақсимланади ва $C_k = 2C_c \cdot 0,5 = C_c$ бўлади.

Учувчан киришма билан легирланган суюлма кристалланганда унинг суюлмадаги зичлиги буғланиш тезлигига боғлиқ бўлади. Агар бу тезлик кам бўлса, киришма суюлмада тўпланиб қолади. Агар буғланиш тезлиги ортса, кўпроқ киришма атмосферага буғланиб кетади. Ниҳоят, буғланаётган ва суюлмага суриллаётган киришма миқдорлари тенглашганда суюлмадаги киришма зичлиги доимий $C_{ст}$ қийматга эришади. Бундай суюлмадан яратилаётган кристаллнинг бутун узунлиги бўйича киришма доимий зичликка эга бўлади.

Зонавий суюлтириш усулининг характерли хусусияти кристаллизацион жараён мобайнида суюлма ҳажмининг ўзгармас қолишидир. Бу жиҳатдан унга гарписсаж суюлтириш, монокристаллни «тагликдан» ёки сузувчи тигелдан ўстириш усуллари ўхшашиб кетади.

Суюлма ҳажмининг кристалланишда ўзгариб турадиган усуллар (Брижмен ва Чохральский усуллари) ҳам ишлаб чиқилган. Улар ҳақида алоҳида тўхталамиз.

Суюлманинг қолдиғига унда g кристалл улуши ўстирилган пайтда киришма зичлиги

$$C = C_0(1 - g)^{K-1} \quad (II.38)$$

ифода бўйича ҳисобланиши мумкин, бундаги C_0 — киришманинг дастлабки зичлиги, K — умумлашган тақсимот коэффициенти, $g = V_g/V_0$ — суюлманинг дастлабки V_0 ҳажмининг кристалланган улуши.

Учувчан киришма учун ($\alpha=0$) $C = C_0(1 - g)^{K-1}$.

Зонавий суюлтириш усули тозаланаётган кристаллнинг бир ўзида суюлган зонани кўп марта ўтказиш имконини беради. Бу ўтишлар сони ортиши билан киришмалар тақсимот чизиклари тикроқ бўлиб боради (II.25, б-расм), охириги қисмлар тўғри чизик устига тушади (чегаравий ёки охир-

ги тақсимот чизиги). Бунга эришилганда киришма қуйманинг охирги қисмига сурила олмайди.

Кўп марта ўтишлар билан амалга оширилган горизонтал зонавий суюлтириш ҳолида тозаланаётган модда массасининг қайиқчанинг бир учидан иккинчи учига кўчишини ҳисобга олиш лозим. Масса кўчишини олдини олиш чоралари ишлаб чиқилган.

Эриган киришмалардан ташқари, яримўтказгичларнинг кристалланувчи суюлмаларида газлар (водород, азот ва б.) ва металлмас қириндилар бўлиши мумкин.

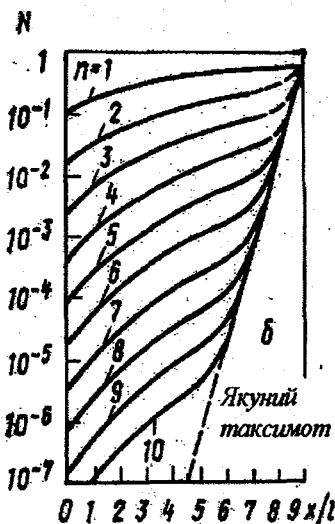
Суюлмада ҳосил бўлган газ пуфаги газ билан ўта тўйинган суюлмадан диффузияланувчи буг ёки газ ҳисобига ўса боради. Кристалланиш фронти уни суюлма ичига суради, бу пуфак $K < 1$ ҳолга тўғри келган киришмадек бўлади. Кристалланиш фронти тезлиги катта бўлса, пуфак катталашиб улгурмасдан қаттиқ фазага ютилади.

Кичикроқ шу тезликларда пуфак кристалл ўсиши йўналишида чўзилиб, цилиндр кўринишини олади.

Суюлмада яна оксидлар, карбидлар, нитридлар ва бошқалар мавжуд бўлиши мумкин. Уларни қаттиқ қириндилар ҳам дейилади.

Қаттиқ қириндиларни кристалланиш фронти томонидан фақат кристалл ўсиши тезлиги кичик бўлганда (0,5 мм/мин) сиқиб суриб чиқарилиши мумкин. Бу ҳолда кристалланиш фронти олдида тўпланадиган қаттиқ қириндилар кристалланиш маркази бўлади, аммо монокристалл ўсишига тўсқинлик қилади. Натижада кристалланган модда қуймаси поликристалл тузилишга эга бўлиб, ундаги қаттиқ қириндилар доналар чегаралари бўйича жойлашган бўлади.

Катта тезликларда кристалланиш фронти силжиганда қаттиқ қириндиларни ўсаётган монокристалл ўз ичига ола-



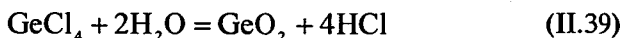
П.25-расм. Кўп қайталанган зонавий суюлтириш усулида ўстирилган кристалл бўйича учмоччан киришманинг назарий тақсимооти.

ди, улар энди ҳажмда текис тақсимланади ва монокристалл ўсишига тўқинлик қилмайди.

8.3. ТИКЛАШ ЖАРАЁНЛАРИ

Юқори даражада тоза поликристаллик элементар ярим-ўтказгичларни олиш учун уларни тозаланган хлорид бирикмалардан ажратиб олиш зарур. Бу ишни бажариш учун тиклаш жараёнлари қўлланади.

Қаттиқ ҳолатдаги яримўтказгичлар бирикмаларини тиклаш энг содда жараён бўлади. Масалан, тозаланган германий хлориди сувда германий (IV) оксидига ўтказилади:



Куруқ (IV) оксидни графит қайиқчага тўлдириб, уни найсимон электропечга жойланади. 1000°C атрофидаги температурагача қиздирилгандан сўнг қайиқча устидан юқори даражада тоза водород оқими ўтказилади. Юз берадиган



реакция оқибатида германий тикланади ва унинг томчилари қайиқча тубига оқиб тушади.

Кремний (IV) оксиди SiO_2 га нисбатан бундай жараён 2000°C дан ҳам юқори температураларни талаб қилади. Шунинг учун тозалашдан сўнг бевосита олинадиган хлорсиланлар водород билан тиклашга ҳаракат қилинади:



Яримўтказгич кремнийни ишлаб чиқаришда (II.41) реакция бўйича трихлорсиланни водород билан тиклаш жараёни энг кўп қўлланилади.

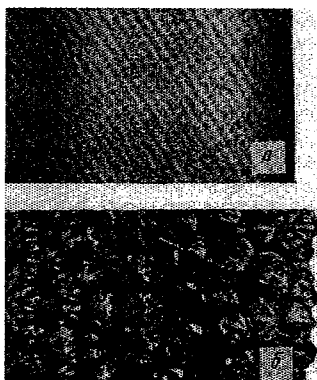
Бу жараён реакторларда амалга оширилади. Реакторга водород ва трихлорсилан аралашмаси келтирилади. Уларда (II.41) реакция оқибатида ажраладиган кремнийни электрик ток ўтказиб қиздирилаётган кремний стерженлари сиртига ўтқазилади. Мазкур жараён энг яхши самара берадиган температура оралиғи: 1100-1200°C. Реактордан ўтаётган буғ-газ аралашмасининг тезлиги ошган сайин кремний ўтириши солиш-тирма тезлиги $[\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{соат})]$ ҳам ортади. У қизиган кремний

стерженлари сиртида турли шаклдаги кристаллчалар кўринишида кристалланади. Бунда дастлабки кремний стерженлардан радиал (радиус бўйича) тарқалаётган устунсимон кристаллчалар ўса болади. Бундай ўсишда силлиқ сиртли зич кремний поликристаллик стержени олинади (II.26, а-расм).

Агар ўтқазилаётган сирт яқинида газ алмашинув ёмон бўлса, бу ҳолда кремний кристаллари дендрит шаклига (шоҳчалик тузилишга) эга бўлади, стержен сирти жуда нотекис бўлади (II.26, б-расм). Бундай стерженлар сифати олдинги стерженларникидан анча паст, чунки уларнинг сирти кўп миқдорда киришмаларни ютиб олиб, яримўтказгич тозалигини пасайтиради. Стержен ҳажмидаги газлар кремнийни эритиш жараёнида унинг қайнаб ва сачраб кетишига сабаб бўлади. Буни стерженлар кўринишидаги тайёрламалардан монокристаллар ўстиришда эътиборга олиш керак.

Водород ва трихлорсиланнинг $M=H_2/SiHCl_3$ оптимал нисбатини аниқлаш мураккаб. Назарий [(II.41) ифода] у 1 га тенг бўлиши керак. Бироқ реакторга келаётган буғ-газ аралашмасининг бутун миқдоридан фақат 1100-1200° С температура-лар соҳасига тушгани (стерженга бевосита яқин, қизиган соҳага тушгани) кремний ҳосил қилади. Кремний маҳсули кўпроқ бўлиши учун реакторда газ алмашинувини жадаллаштириш зарур. Бу реакция зонасидан хлорли водородни (HCl) олиб кетиш ва шу зонага янги трихлорсилан улушини олиб келишини тезлаштиради.

Табиий, реакторда газ алмашинувини кучайтириш учун ундан буғ-газ аралашмасининг ўтиш тезлиги оширилади. Бунда трихлорсиланни тежаш мақсадида водородни кўпайтириш ҳисобига буғ-газ аралашмаси ҳажми оширилади: HCl миқдори жуда секин ошади, кремнийнинг чиқиши (хатто $M=15$ бўлганда ҳам) 60% атрофида.



II.26-расм. Водород билан тиклаш жараёнида олинган стерженлар сиртининг кўриниши: а-оптималга яқин; б-ундан узоқ.

Кремний олиниши самарадорлигини оширишнинг энг яхши чораси — «ёпиқ цикл» усулини қўллашдир. Бу ҳолда реактордан кетаётган буғ-газ аралашмаси ишловга дучор қилиниб, ундан энг фойдали таркибловчилар — трихлорсилан ва водород ажратиб олинади ва тозалашдан сўнг яна ишлаб чиқаришга қайтарилади.

8.4. ПОЛИКРИСТАЛЛИК ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ОЛИШ

8.4.1. ТРИХЛОРСИЛАННИ ТИКЛАШ УСУЛИДА ПОЛИКРИСТАЛЛИК КРЕМНИЙ ОЛИШ

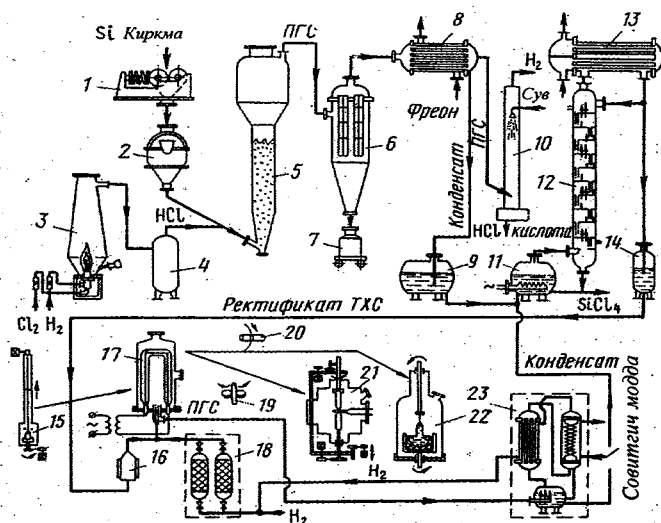
Дастлабки иш хлорли водороддан трихлорсиланни ва кремнийни тайёрлашдир. Водородни хлор оқимида куйдириб хлорли водород олинади:



Синтез печида олинган хлорли водородни намдан тозаланади — музлатиш усули билан қуригилади. Сўнг (II.27-расм.) таркибида 96-99% асосий модда бўлган ва майда кристаллик кўмач бўлган техник кремнийни (баъзан у ферросилицийни) янчкида ва шарсимон тегирмонда (1,2) 0,5 мм бўлақларгача майдаланади. Ҳосил бўлган кукунни 200° С да қуригилади ва «қайнаш қатлами» дейиладиган 5 реакторга трихлорсиланни синтез қилиш учун киритилади. Реактор пўлат деворлари сув билан совитиладиган вертикал цилиндрдан иборат. Унинг пасти қисмида хлорли водород киритиладиган фурмалар (жўмрақлар) бор. Бир неча атмосферага тенг босим остидаги газ оқими кукунсимон кремнийни тез-тез аралаштиради, бунда иссиқлик таъсирлашувчи массанинг бутун ҳажми бўйича текис тақсимланади.

(II.42) реакцияда катта миқдорда иссиқлик ажралади, шунинг учун синтезнинг маъқул (оптимал) температурасини 300°С атрофида доимий тутиб туриш учун реакторга киритиладиган хлорли водородга трихлорсилан буғлари аралаштирилади.

Оптимал нисбат: $\text{HCl}:\text{SiHCl}_3=1:1$. Бу шароитда трихлорсиланнинг чиқиши HCl бўйича 60%, Si бўйича 70%. Буғ-газлар аралашмаси 6 филътрга ўтади, унда механик равишда қўшилиб қолган кремний чанги тутиб қолинади.



II.27-расм. Кремний монокристаллини ҳосил қилиш қурилмаси.

1-майдалагич; 2-шарсимон тегирмон; 3- HCl ни синтезлаш печи; 4-ресивер; 5- SiHCl_3 ни синтезлаш реактори; 6-халтасимон фильтр; 7-чиқит йиғувчи идиш; 8-конденсатор; 9,14-оралиқ ҳажмлар; 10-скруббер; 11-ректификацияон; 12-ликопчасимон устун (колонна) куб; 13- дефлегматор; 15-кремний поликристаллик таёқчалари (асослари) ўстириладиган қурилма; 16-буғлантиргич; 17-водород билан тиклаш реактори; 18-водородни тозалаш блокти; 19-кремний стерженларини шилиш дастгоҳи; 20-ўлчамли тайёрламаларни кремний стерженларидан кесиш дастгоҳи; 21-тигелсиз зонавий суьултириш усули билан кремний монокристалларини ўстириш қурилмаси; 22-ўша ишни Чохральский усулида бажариш; 23-водородли тиклаш реакторидан чиқаётган газсимон маҳсулотни қуйилтириш блокти;

БГА-буғ-газ аралашмаси; ТХС-трихлорсилан.

Фильтрларда тутилган чангда реакциянинг ёндош маҳсули—полихлорсиланлар ҳам бор бўлади. Уларнинг кимёвий ифодалари: $\text{Si}_n\text{Cl}_{2n+2}$ (мас; Si_2Cl_6) ва $\text{H}_n\text{Si}_m\text{Cl}_{2m+2}$ (мас; H_2SiCl_2). Полихлорсиланларнинг ҳосил бўлиши металл киришмалар (Al , Fe , Ca ва б.) билан ифлосланган дастлабки кремнийдан фойдаланишга, унинг бўлаклари ўлчамини катталаштиришга ва буғ-газ аралашманинг тез совишига имкон беради.

Полихлорсиланлар жуда фаол моддалар. Улар совуқда ҳам оксидланиб, катта миқдорда иссиқлик ажралади, бу эса уларнинг ёниб кетиши ва ҳатто портлашига олиб келади. Шунинг учун филтёрлардан чангни чиқариб юбориш, уни ташитишни ва сақлашни алоҳида эҳтиёт чораларига риоя қилиб амалга оширилади.

Филтёрлардан ўтган (чангсизланган) буғ-газ аралашмасини $(-50) + (-70)^{\circ}\text{C}$ да суёқ ҳолатга ўтказилади. Бу иш мобайнида кремнийнинг хлорланиш маҳсулотлари ажралади. Мас равишда $31,8^{\circ}\text{C}$ ва $57,2^{\circ}\text{C}$ қайнаш температураларига эга бўлган трихлорсилан ва кремний тетрахлориди суёлади, водород ва хлорли водород (қайнаш температураси -84°C) учиб кетади. Суёлтириш амалини найлардан ташкилланган 8 иссиқлик алмашингичларда (конденсаторларда) ўтказилади. Найлар бўйича буғ-газ аралашма ўтади, улар орасидан совитувчи — сув, кальций хлориди, фреон ва б. ўтиб туради. Бир неча конденсаторлар кетма-кет уланган бўлиб, улардан ўтаётган аралашма кетма-кет совиб боради.

Суёлиш (конденсация) жараёнида буғ-газ аралашма ҳажми кескин камаяди. Агар аппарат ёмон жипсланган (герметизацияланган) бўлса, унга ҳаво сўрилиб, аралашмадаги полихлорсилан ёниб кетиши мумкин. Шунинг учун қурилманинг барча қисмлари яхши жипсланган бўлиши керак.

Конденсациядан ўтиб кетган буғ-газ аралашмада 90% дан ортиқ водород ҳамда хлорли водород бўлади. Бу аралашмани (10) скрубберга (ажратувчига) юборилади, у жойда хлорли водород ажратилади.

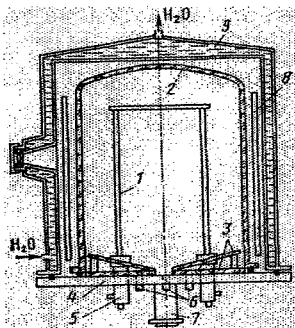
Буғ-газ аралашмадан шу йўсинда ажратилган водородни тегишли йўл билан (18) қурилмага йўналтирилади, бунда уни қурилади ва тозалади. Бундай водородни яна хлорли водород синтез қилишга ишлатилади.

Олинган конденсат 90% трихлорсиланга ва 10% тетрахлорсиланга эга бўлади. Бу конденсатда қуйидаги киришмалар бор (масса бўйича % да): $\text{V}-3 \cdot 10^{-3}$; $\text{Al}-1 \cdot 10^{-6}$; $\text{Fe}-4 \cdot 10^{-6}$; $\text{P}-1 \cdot 10^{-6}$; $\text{Ti}-8 \cdot 10^{-7}$; $\text{Cu}-5 \cdot 10^{-7}$.

Кейин конденсатни $(\text{SiHCl}_3 + \text{SiCl}_4)$ кетма-кет равишда иккита (12) колоннадан ўтказилади. Биринчисда енгил учувчан таркибловчи (1-фракция), иккинчи колоннада тозаланган трихлорсилан (ректификат) ажратиб олинади.

Одатда, бундай ректификацион колонналар бир нечта бўлади. Ректификацион колонна вертикал ўрнатилган зангламайдиган пўлатдан қилинган цилиндрдан иборат.

Олинган ректификат (тозаланган трихлорсиланни) кимёвий анализга дучор қилинади ва ундаги киришмалар аниқланади. Киришмалар миқдори (масса бўйича % да) қуйидагидан кўп бўлмаслиги керак: В- $3 \cdot 10^{-8}$; Al- $2 \cdot 10^{-7}$; Fe- $3 \cdot 10^{-7}$; Ca- $2 \cdot 10^{-6}$; Ti- $5 \cdot 10^{-8}$; Cu- $2 \cdot 10^{-8}$; Ni- $6 \cdot 10^{-8}$.



П.28-расм. Трихлорсиланни водород билан тиклаш реактори.

1-кремний таёқча (асос); 2-ички кварц қалпоқ; 3-тубдаги кварц экранлар; 4-металл туб; 5-сув совитадиган ток келтирувчи; 6-буғ-газ аралашма (БГА) киритадиган найча; 7-БГА чиқадиган найча; 8-бошланғич иситгич (12 дона); 9-ташқи, сув совитадиган металл қалпоқ.

П-симон иситгични ташкил қилади.

Реакторда таёқчалар сони ҳар хил бўлади, у қайси усул билан кристалл ўстирилишига боғлиқ.

Кремний таёқчалари — асослар тағлиқдан ўстириш усулида тайёрланади (15). Одатда, бундай таёқчалар диаметри 4-6 мм, узунлиги 2 м гача.

Электрик ток ўтказиб таёқчалар қиздирилади. Трихлорсиланни водород билан тиклашни 1100°C атрофида ва $\text{H}_2/\text{SiHCl}_3$ моляр нисбат 6 га тенг бўлганда амалга оширилади.

Кейинги вақтда ректификатнинг сифатини ундан олинган монокристалл параметрлари бўйича назорат қилинаётир. Бунинг учун кичик «кварц-тест» деган асбоб қўлланади.

Ректификатни (тозаланган SiHCl_3 трихлорсиланни) водород билан тиклаш реакторига (П.28-расм) берилади. У зангламайдиган пўлат ёки пўлатдан ясалган қалпоқ кўринишида бўлиб, сув билан совитиладиган зангламас пўлат плита (таглик) устига герметик равишда (жипс) ўрнатилган. Плита орқали изоляцияланган ток келтирувчилар ўтган, уларнинг устига (тик) вети-кал равишда **кремний стерженлар** маҳкамланади. Устидан кремний таёқча билан кавшарланган иккита **кремний таёқча**

Поликристаллик кремнийнинг легирланган стерженларини кучли легирланган таёқчалар — асосларга ўтказиш йўли билан олинади. n-тур кремний олиш учун стерженлар фосфор (P) билан, p-тур олиш учун бор (B) билан легирланади.

Реактордан чиқариб олинган поликристаллик кремний стерженларини монокристаллар ўстиришга юборишдан олдин қўшимча ишлов берилади.

Чохральский усули билан монокристаллар мўлжалланган қуймани тигелга жойлантириш қулай бўлган бўлақларга бўлинади ёки олмос дисклар (20) билан кесилади. Тигелсиз зонавий суёлтириш жараёни учун ишлатиладиган стерженларни шилиш йўли билан тегишли ўлчамли қилинади (19). Шундай механик ишловдан сўнг поликристаллик моддани едирилади, ювилади, қурилади ва тахланади.

Поликристаллик кремний сифатини вакуумда $1 \cdot 10^{-4}$ мм. сим.уст. тигелсиз зонавий суёлтириш усулида назорат стерженини тозалаш йўли билан текширилади. Суёлган зонанинг 3 мм/мин тезликда 15 марта такроран ўтишидан сўнг кремнийдан бор (B) дан бошқа деярли ҳамма донор ва акцептор киришмалар чиқариб ташланади, бор (B) қолади. Бундай тозалашдан кейинги кремний солишгирма қаршилигини **бор (B) бўйича солишгирма қаршилиқ** дейилади.

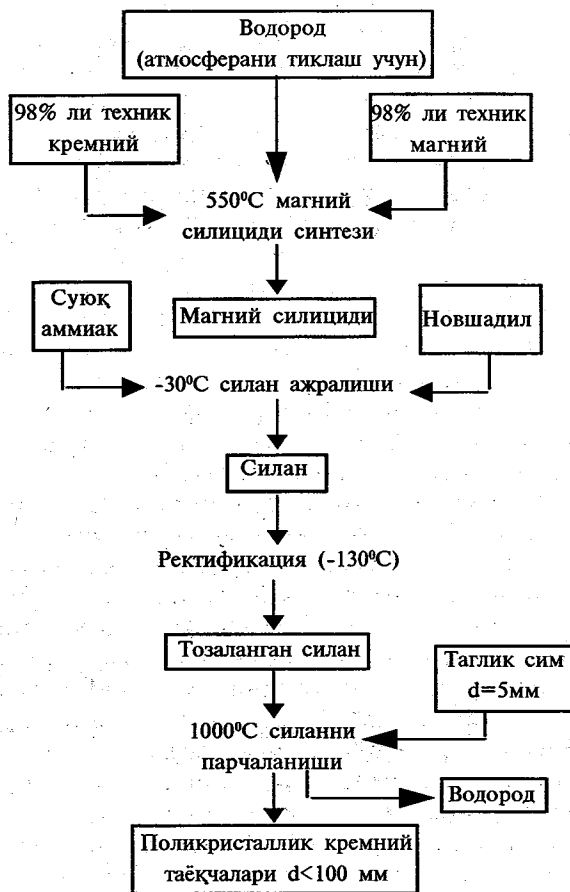
Поликристаллик кремний стерженларида донорлар миқдорини назорат қилиш вакуумда, суёлган зонанинг силжиш тезлиги 3 мм/мин бўлган ҳолда, бир мартали зонавий суёлтириш усули билан амалга оширилади. Поликристаллик кремний юқори даражада тоза бўлиши учун унинг тозалик даражаси бор (B) бўйича 5000 Ом.см дан кам ва донорлар бўйича 250 Ом.см дан ортиқ бўлмаслиги, стерженлар сиртида хлоридлар бўлмаслиги, стерженнинг синган ёки кесилган жойида оксидланган ҳалқалар бўлмаслиги керак.

Поликристаллик кремний стерженлари бир хил массали бўлақлар кўринишида берилиши мумкин. У энг кичик массаси 50 г бўлган бўлақлар кўринишида ҳам берилиши мумкин.

8.4.2. МОНОСИЛАНДАН КРЕМНИЙ ПОЛИКРИСТАЛЛАРИНИ ОЛИШ

Энг тоза кристаллик кремнийни SiH_4 моносиланни термик қиздириб парчалаш усули ёрдамида тайёрлаш мумкин.

Олинган маҳсулот бор (В) бўйича 80000 Ом.см гача ва донорлар бўйича 5000 Ом.см гача солиштирма қаршиликка эга бўлади. Бу усулнинг технологик схемаси II.29-расмда тасвирланган.



II.29-расм. Силанни термик усул билан парчалаб кремний олишнинг технологик тартиби.

Горизонтал электропечларда техник кремнийни (асосий модда >98%) ва магнийни (асосий модда > 98%) 550°C да синтез қилинади:

$2\text{Mg} + \text{Si} = \text{Mg}_2\text{Si}, \quad (\text{II.44})$

сўнгра Mg_2Si ни хлорли аммоний билан парчаланади:



Парчаланишни -30°C да суюқ аммиак NH_3 муҳитда ўтказилади. Бу жараёнда кремний ундан энг қийин чиқариладиган бор (В) дан тозаланади. Бор (В) силандан осон ажраладиган бор — аммиак бирикмаси таркибида маҳкам боғланиб қолади.

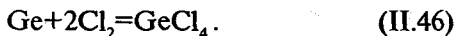
Силанни тозалаш -130°C да ўтказиладиган паст температурали ректификация усулида давом эттирилади. Олинган ректификат (тоза модда) да масса бўйича бор (В) $3 \cdot 10^{-6}$ ва фосфор $1,1 \cdot 10^{-7}\%$ дан кам бўлади. Бошқа киришмалар яна ҳам кам миқдорда бўлганлиги боис, улар сезилмайди.

Моносилан SiH_4 ни реакторларда 1000°C да парчаланади: $\text{SiH}_4 = \text{Si} + 2\text{H}_2$. Бундай реакторларнинг тузилиши II.27-расмдагидан асосан фарқ қилмайди. Реакция натижасида ажралган юқори даражада тоза водороддан яна фойдаланилади, тоза поликристаллик кремний эса монокристаллар ўстиришда, бевосита унинг ўзидан асбоблар ишлаб чиқаришда қўлланади.

8.4.3. ГЕРМАНИЙ ПОЛИКРИСТАЛЛАРИНИ ОЛИШ

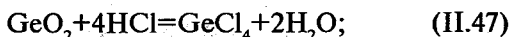
Германий хом ашёда оксидланган ёки элементар шаклда бўлиши мумкин. Турли концентратлар таркибида германий GeO_2 ёки MgGeO_3 хилидаги германатлар кўринишида мавжуд бўлади. Германийнинг концентратлардаги миқдори (масса бўйича) 5 дан 60% гача, асосий киришма — арсений-6,5% ни ташкил қилади.

Поликристаллик германий олиш технологиясининг биринчи амали хом ашёдаги германийни GeCl_4 тетрахлоридга ўтказиш бўлади:



Бу жараён графит қопланган реакторда $300-400^\circ\text{C}$ да бажарилади. Тетрахлорид маҳсули 95% атрофида. Олинган германий тетрахлориди конденсаторда конденсирланиб, сўнг йигувчи идишга ўтади.

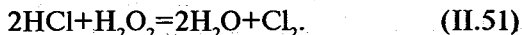
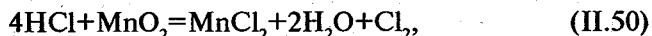
Хом ашёдаги оксид ва элементар шаклдаги германийни эритмада хлорлаб тетрахлоридга ўтказилади:



Арсенийнинг германийдан қийин ажралиб кетадиган учуван трихлориди AsCl_3 асосий киришмасини ушбу реакция билан учмайдиган H_2AsO_4 арсений кислотасига айлантиради:

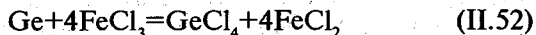


Баъзан реакторга хлор ўрнига пиролюзит MnO_2 ёки водород пероксиди H_2O_2 киритилади:



Реакторда хлорнинг бўлишлиги концентратдаги элементар германий эришига ёрдамлашади.

Бутун оксидланган германийни тетрахлоридга ўтказгандан сўнг эритмадаги туз кислота зичлиги 270 г/л гача камайтирилади ва иккиламчи хом ашё солинади. Унинг миқдори масса бўйича ~15%. Шундан кейин реакторга хлорли темир киритилади.



реакция бўйича (хом ашёдаги) элементар германий тетрахлоридга ўтказилади. Бу жараён тугагач, эритмадан тетрахлорид чиқариб олинади. Бунинг учун реакторни 83°C дан (GeCl_4 қайнайдиган температурадан) юқоригача қиздирилади. Энг юқори температура 110°C. Тетрахлорид буғлари суюлтирилиб, йиғувчи идишга қуёлади.

Ушбу дистилляцияцион жараёнда германий тетрахлориди кўп киришмалардан тозаланади. Бунда арсений трихлориди AsCl_3 ни тозалаш муҳим, чунки у ўз хоссалари бўйича GeCl_4 га яқин ва уни ажратиш олиш қийин. Экстракция усули билан тозалаш GeCl_4 да арсений миқдорини масса бўйича $5 \cdot 10^{-4}\%$ гача камайтиш имконини беради.

Тозаланган германий тетрахлориди GeCl_4 ни ректификацион колонна кубига киритилади. Одатда, ректификация

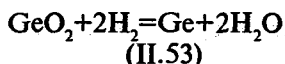
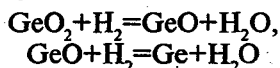
жараёнини бир нечта колонналарда бажарилади. Бу ерда ҳосил бўлган германий тетрахлориди буғлари совитгичда конденсацияланади. Конденсатни дехлораторда хлордан ажратилади ва гидролиз жараёнига юборилади.

Германий тетрахлориди гидролизини аралаштиргичли фторопласт реакторда ўтказилади. $\text{GeCl}_4:\text{H}_2\text{O}=1:7$ ҳажмий нисбатда, бу GeO_2 нинг эрувчанлиги энг кичик бўлишини таъминлайди. Гидролизда иссиқлик ажралади, шунинг учун реактор деворларини оқар сув билан совитиб турилади, GeO_2 маҳсулоти ортади.

Гидролиздан кейин олинадиган GeO_2 синчиклаб аралаштирилади ва контейнерларга жойланади. Бу оксид тозалигига кремнийдагига ўхшаш талаблар қўйилади.

Поликристаллик германий олиш учун GeO_2 ни графит қайиқчаларга солинади, қайиқчаларни найлар кўринишидаги электропеч орқали 3 мм/мин тезликда силжитилади.

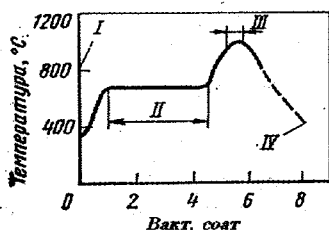
Печ бўйлаб иккита температура зонаси бўлади. Биринчисида ($650^\circ\text{C}-710^\circ\text{C}$) германийнинг тикланиш жараёни кечади, у икки босқичдан иборат:



Иккинчи зонада (1000°C атрофида) тикланган германий зарралари германий суюлмасини ҳосил қилади, у эса печдан чиқаётиб кристаллга айланади. (II.30-расм). Баъзан тиклаш печига яна бир зонани (температураси 1000 дан 900° Сгача) қўшилади. Бу зонадан ўтганда суюлма йўналишли кристалланади.

Германийнинг поликристаллик қуймаларини Брижмен горизонтал усули билан тозалашда яхши натижаларга эришилади. Бунда германийли қайиқчани тиклаш печидан чиқарилгандан сўнг уни алоҳида махсус печга жойланади ва тозалаш бажарилади.

Поликристаллик германийни тозалаш горизонтал зонавий суюлтириш усулида давом эттирилади, бунда зонада суюлмани юқори частотали тоқлар билан қиздириладиган қўп найли қурилмалар қўлланади.



II.30-расм. Германий (II) оксидини тиклаш жараёнининг температурали-вактли мароми (режими): I-тартиб чиқариш бошланиши; II-тиклаш; III-су-юлтириш; IV-тартиб чи-қариш охири.

Горизонтал зонавий суюлтириш усулида тозаланган поли-кристаллик германий 18°C да 52 Ом.см, 19°C 51 Ом.см ва 20°C да 50 Ом.см солиштирма қаршиликка эга бўлиши керак. Назорат монокристаллида ҳаракатчанлик ҳам текширилади, у 77 K да 25000 см²/В·с дан кам бўлмаслиги керак.

8.4.4. ГАЛЛИЙ АРСЕНИДИ КРИСТАЛЛАРИНИ ОЛИШ

Яримўтказгич бирикмаларни синтез қилишнинг энг содда усули таркибловчиларни бирга суюлтиришдир. Бундай синтезни ўтказадиган аппаратнинг схемаси II.16-расмда кўрсатилган.

Галлий арсенидини синтезлаш жараёнини ўтказиш тартиби қуйидагича: кварц тигел тубига дастлаб майдаланган арсений (бўлак ўлчами 3 мм), унинг устига галлий, кейин эса бор ангидриди жойланади. Арсений ва галлий 1:1 нисбатда (атомлар сони бўйича) олинади, флюс — бор ангидридини 25 мм чамасида суюлма ҳосил қилиш учун зарур миқдорда олинади.

Тигелни графит тагликка жойланади. Таглик юқори босим камерасида жойлашган, камерани зичлантирилади, унда вакуум ҳосил қилинади, кейин инерт газ (азот, аргон) билан 60 атм босим остида тўлдирилади.

Юқори даражада тоза поли-кристаллик германий олишнинг асосий шартлари барча бос-қичларда энг катта тозаланишни таъминлашдир.

Графитдан ясалган қайиқчаларнинг тозаланишига алоҳида эътибор бериш керак. Уларни жуда зич ва жуда тоза графитдан тайёрланади, сўнг 1000°C дан юқорида хлор оқимида чиниқтирилади. Ишга солишдан олдин қайиқчаларда бир неча ювувчи суюлтиришлар ўтказилади. Шунинг учун узоқ фойдаланишда бўлган қайиқчалар энг катта тозаланишга эга бўлади.

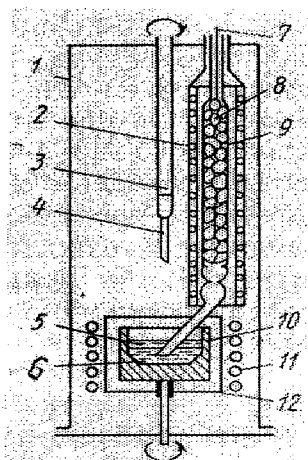
Бу амаллар бажарилгандан кейин тигелни кўтарадиган механизм ишга туширилади ва тигелни секин (унинг юқориги қисмини 850°C гача қиздира оладиган) индуктор печга киритилади. Олдин галлий, кейин флюс суюлади. 817°C атрофидаги температурага эришилганда арсений ҳам суюлади ва синтез реакцияси бошланади. Бу реакцияда анча иссиқлик ажралади, бу тигелдаги суюлма температурасини галлий арсениди суюлиш температурасидан бир мунча юқори кўтаради.

Синтез жараёни тугаллангандан сўнг суюлма температураси пасая бошлайди. Индукторнинг қувватини ошириб, 1 соат давомида температурани 1240°C атрофида сақлаб турилади, бу суюлманинг бир жинслилигини ошириш учун зарур. Кейин температурани секин пасайтира бориб суюлма кристалланади.

Равшанки, олинган бу бирикма поликристаллнинг тозалиги дастлабки таркибловчилар тозалиги билан аниқланади.

Галлий ва арсенийнинг мавжуд намуналари (маркалари) тозалиги унча юқори эмас.

Шунинг учун галлий арсениди ва индий арсенидининг тоза поликристаллик қуймаларини олиш учун кўпроқ Брижмен горизонтал усули қўлланади. Бу жараёни вакуумли ва кавшарланган кварц ампулаларда ўтказилади. Ампуланинг бир учида галлий солинган кварц қайиқча, иккинчи учида ар-



П.31-расм. Парчаланиб кета оладиган яримўтказгич бирикмаларни флюс орқали синтезлаш қурилма чизмаси:
1-автоклави; 2-учувчан таркибловчи (As, P) иситтиги; 3-шток; 4-монокристалл хамиртуруш; 5-флюс; 6,8-учмовчан таркибловчи (In, Ga); 7-терможуфтлар; 9-кварц реактор; 10-тигелнинг графит таглиги; 11-юқори частотали индуктор; 12-графит экранлар; 13-тигелнинг говак туби; 14-пироуглерод билан жипсланган графитли реактор; 15-суюлма иситтиги; 16-кўриш шишаси.

сенийли қайиқча жойланади. Тегишлича босим ва температура шароити ўрнатилади.

Ушбу усул қурилма қисми бир неча печлардан иборат бўлиб, ампула бўйича керакли температура тақсимотини ҳосил қилиб беради.

Галлий-арсений суюлмали қайиқча бўйича кристалланиш fronti силжиб бориши печлар қисмини ҳаракатсиз ампулага нисбатан кўчириш йўли билан амалга оширилади.

Қўрилган усул билан синтезланган галлий арсениди **поли-кристаллида** эркин электронлар зичлиги 2.10^{16}см^{-3} дан катта эмас, уларнинг ҳаракатчанлиги $4200\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ дан кам эмас.

Кейинги даврда галлий арсенидини синтезлаш жараёнини Чохральский усули билан биргаликда олиб бориш ривожланди. Бу — охири маҳсулот — монокристаллнинг тозалигини муҳим даражада оширди ва ишлаб чиқаришни арзонлаштирди.

Бундай қурилма схемаси II.31-расмда тасвирланган. Жараён қуйидагича амалга ошади. Тигелга металл галлий ва флюс-бор ангидрид жойланади. Арсенийли ампула туби синдирилади ва кейин уни 325°C гача қиздирилади. Бунда галлий суюлади. Қурилма камерасида 10–3 мм.с.м.уст. гача вакуум ҳосил қилинади ва кейин уни 1 атм босимгача азот билан тўлдирилади, сўнгра огма найни тигелдаги галлий суюлмасига туширилади.

Тигелдаги температурани 1240°C гача етказилади, бунда флюс суюлади ва тигелдаги суюлган галлий сиртини қоплайди. Сўнгра, арсенийли ампула жойлашган печнинг температурасини тадрижан 580°C – 630°C гача ошириб борилади. Камерадаги азотнинг иссиқлик ҳаракати эвазига босими 1,3–1,5 атм. гача ортади ва бутун жараён давомида шу сатҳда тутиб турилади. Синтез тугагач, ампула билан бирга найни суюлмадан кўтариб четга олинади. Кейин оддий усулларда монокристалл ўстиравериш мумкин бўлади. GaAs, InAs ларни синтезлашнинг бошқа йўллари ҳам бор.

8.4.5. ИНДИЙ ВА ГАЛЛИЙ ФОСФИДЛАРИНИ ОЛИШ

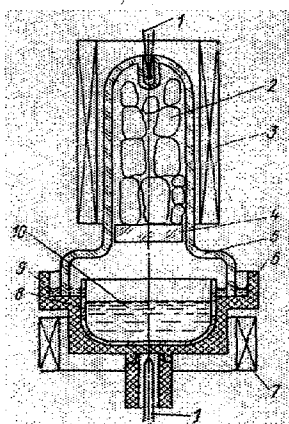
Поликристаллик галлий фосфидини синтез қилишда икки усул энг кўп тарқалган.

Биринчи усул — горизонтал (зонавий) суюлтириш йўли билан синтезлаш, у галлий ва қизил фосфор солинган гра-

фит контейнер жойлашган, вакуум ҳосил қилинган ва кавшарланган реакторда ўтказилади. Реакторни икки фон электропечидан ва улар орасида жойлашган юқори частотали индуктордан иборат печлар блокига жойланади. Фон печлари қизил фосфорни унинг реакторда талаб қилинган буглари босими ҳосил бўладиган температурагача қиздиради. Фосфор буги реактор деворида ўтириб қолмаслиги учун температура баландроқ бўлиши керак.

Печлар блоки (унда жойлашган реактор билан) автоклавга жойлашгач, унда инерт газнинг керакли босими ҳосил қилинади.

Жараён режими: фосфорнинг реактордаги босими 10 атм, суюлган зона кенглиги 30-40 мм, суюлган зона кўчиш тезлиги 1 мм/мин гача, ундаги суюлма температураси 1500°C гача. Бу шароитда заряд ташувчилар зичлиги 10^{17} см⁻³ дан кам бўлган поликристаллик галлий фосфиди қуймалари олинади (24 соатда 2 кг гача).



II.32-расм. Фосфор бугининг индий суюлмаси билан ўзаро таъсири жараёни кинетикаси (фосфор бугининг тегишли босимлари учун суюлмада фосфорнинг мувозанатий C_p концентрацияси узук (пунктир) чизиқлар билан кўрсатилган.

Бундай материалда кислород кам $-5 \cdot 10^{-4}\%$ (масса бўйича), шунинг учун ундан, кислород зарарли бўлган, эпитаксиал тизилма таглиги бўладиган монокристалларни ўстириш учун фойдаланилади.

Шу усул билан индий фосфиди ҳам синтезланади, унда электронлар зичлиги 10^{15} см⁻³.

Иккинчи (унумдорроқ) усул — автоклав қурилмалардаги квазигерметик реакторларда синтез амалга оширилади.

Индий фосфидининг кристаллик қуймаларини синтез қилиш учун қўлланадиган II.32-расмдаги қурилма ушбу усулга мисол бўлади. Унда реакторнинг қизил фосфорли кварц қисми ва индийли тигели бор графит қисмининг бирлашуви гидравлик завтор

ёрдамида амалга оширилади. Синтез куйидагича ўтказилади: тигелга керакли миқдорда индий жойланади. Реакторнинг кварц қисмига мос стехиометрик миқдордаги қизил фосфор яна ортиғи билан (бўшлиқни ва исрофни камайтириш учун) жойланади. Гидрозатвор каналига унинг 2/3 баландлигигача суюлган индий қуйилади ва яхлатилади. Бундан кейин ушбу қисмни очиқ томони билан каналдаги металлга ўрнатилади, юқори босим камерасини зичлантирилади, унда вакуум ҳосил қилинади, кейин ишчи босим 60-70 атм бўладиган босим остида инерт газ билан тўлдирилади.

Реакторнинг қизил фосфорли қисмини керакли температурага қиздирилади (реакторда фосфор буғи босими 25 атм га етиши керак). Шундан кейин индий суюлмали тигелни бирикманинг суюлиш температурасидан (1060°C) юқори температурага қиздирилади ва синтез жараёни тўла амалга ошиши учун муайян вақт берилади [уни (11.31) ифода бўйича баҳоланади]. Энди тигелдаги суюлма температурасини секин пасайтириб, у кристалланади, **InP бирикманинг поликристаллик қуймаси** ҳосил қилинади. Бу материал етарлича тоза, унда $n \approx (1+2) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ $\mu \approx 4500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ (300K да).

Индий ва галлий фосфидларини тавсифланган тартибда синтез қилиш жараёни уларнинг монокристалларини ўстириш билан бирлаштирувчи инерт газнинг босими 60-80 атм бўлиши талаб қилади. Бу анча қийин масалалардир. Шунинг учун бу жараён кенг ёйилмаган.

Галлий ва индий фосфид монокристалларини юқорида баён қилинган усулда синтезланган поликристаллардан ўстирилади.

8.5. АМОРФ ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАРНИНГ ОЛИНИШИ ВА ҚўЛЛАНИЛИШИ

Аморф яримўтказгичлар анчадан бери маълум. Si, Ge, GaAs ва бошқа яримўтказгичларнинг аморф пардалари (қатламлари) кўп йил илгари синтез қилинди, аммо катта амалий аҳамиятга эга бўлмади. Ўша моддаларнинг кристалларига қараганда, аморф ҳолдаги моддалар тақиқланган зонада катта зичликдаги маҳаллий ҳолатларга эга. Бу маҳаллий ҳолатлар мазкур яримўтказгичларда узоқ тартибнинг йўқлигидан ҳамда микроваклар туридаги кўп нуқсонларнинг борлиги-

дан келиб чиқади. Улар хона температурасида пардалар электрик ўтказувчанликка асосий ҳисса қўшади. Маҳаллий ҳолатлар бўйлаб электрик ўтказувчанликнинг асосий механизми термик фаолланидиган **сакрама ўтказувчанлик** бўлиб, унда қатнашувчи заряд ташувчилар жуда паст ҳаракатчанликка эга: электронлар учун $0,01-0,1 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$, коваклар учун эса яна ҳам кичик. Маҳаллий ҳолатлар зичлиги катта ($\geq 10^{20}\text{см}^{-3}$), улар рекомбинацион марказлар бўлганлиги учун бундай яримўтказгичларда заряд ташувчилар ҳаракат вақти жуда кичик. Бундай аморф пардалар электрик ўтказувчанлигини бошқариш амалда мумкин эмас. Ферми сатҳи уларнинг тақиқланган зонаси ўртасида жойлашган ва пардалар жуда катта солиштирма қаршиликка эга ($10^8-10^{10} \text{ Ом.см}$).

Агар аморф кремний пардасига водород киритилса, аҳвол бутунлай бошқача бўлади. Маълум бўлишича, водороднинг аморф кремнийда эрувчанлиги жуда юқори, у 40-45% га етади. Аморф кремнийда эриган водород имконий боғланишларнинг бўш жойларини тўлдиради (тўйинтиради), оқибатда бундай водородланган («гидридланган») моддада тақиқланган зонадаги ҳолатлар зичлиги кескин пасаяди ($10^{16}-10^{17} \text{ см}^{-3}$ гача). Бундай моддани $\alpha\text{-Si:H}$ деб қисқа белгиланади. Шундай $\alpha\text{-Si:H}$ ни аъъанавий донор (P,As) ва акцептор (В) киришмалар билан легирлаб, электрон ёки ковак ўтказувчанлик ҳосил қилиш мумкин. Бунда ўтказувчанлик катталигини ўн тартиб ораликда такроран ўзгартириш мумкин. Бундай моддада р-п-ўтиш ҳосил қилиш мумкин. Аморф кремний пардасига фтор киритилганда ҳам водород киритилгандаги эффектга эришиш мумкинлиги аниқланган. Бир вақтда водород ҳамда фтор бўлган $\alpha\text{-Si}$ пардаларида маҳаллий ҳолатлар зичлиги яна ҳам кичик бўлади ($\leq 10^{16} \text{ см}^{-3}$) ва электрик характеристикалари юқори термик барқарорликка эга бўлади. Яна бир қатор водородланган аморф яримўтказгичлар синтез қилинган. Улар орасида: $\alpha\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$, $\alpha\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$, $\alpha\text{-Si}_{1-x}\text{N}_x\text{:H}$, $\alpha\text{-Si}_{1-x}\text{Sn}_x\text{:H}$.

$\alpha\text{-Si:H}$ аморф яримўтказгичлар арзон, уларни олиш технологияси нисбатан содда: қалинлиги бўйича бир жинс юпқа пардаларни паст температураларда, катта юзали турли ва арзон тагликларда ўстириш мумкин. $\alpha\text{-Si:H}$ пардалар ўстиришнинг энг тарқалган усули биқсима разряднинг юқори частотали плазмасида моносиланни парчалашдир. Кремний манбаи сифатида ё тоза SiH_4 моносилан ёки SiH_4 нинг аргон билан

10% ли аралашмаси ишлатилади. Жараённи ишчи реакторда паст босимда (1- 100 Па) ўтказилади. Асосий тагликлар зангламайдиган пўлат ва кварц шишадан ясалган пластиналар ва тасмалар шаклида бўлади. Қатламлар ўсиши тезлиги одатда $1,5 \text{ нм.с}^{-1}$, лекин у газсимон фазадаги SiH_4 миқдори ошган сайин ошиб боради. Пардалар тагликларга $250\text{--}300^\circ\text{C}$ температурада ўтказилганда тақиқланган зонадаги маҳаллий ҳолатлар зичлиги энг кам бўлади. р-тур ўтказувчанликли пардалар олиш учун газ фазасига бор гидридлари (кўпинча диборан) дозаланган миқдори киритилади, п- тур олиш учун фосфин ёки арсин киритилади.

Легириланмаган а-Si:H пардалар солиштирма қаршилиги $10^7\text{--}10^{10} \text{ Ом.см}$, тақиқланган зонаси кенглиги $1,5\text{--}1,8 \text{ эВ}$. Маҳаллий ҳолатлар зичлиги $10^{16}\text{--}10^{17} \text{ см}^{-3}$, спектрнинг кўринадиган соҳасида ёруғликни ютиш коэффиценти $10^4\text{--}10^5 \text{ см}^{-1}$. Киришмалар киритиб (легирлаб), $10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ўтказувчанликли р- ва п-тур қатламлар олиш мумкин. а-Si қатламларида водороднинг миқдори 5-8% (атом %)ни ташкил қилади. Аммо бўш ҳолатларни тўлдиришда $\approx 10^{20} \text{ см}^{-3}$ водород иштирок қилади. α -Si пардаларига қўшимча равишда фтор киритилса, уларнинг термобарқарорлиги ортади. Бунда қатламларни (пардаларни) $\text{SiF}_4 + \text{H}_2$ аралашмани плазмавий парчалаш йўли билан ўтқазилади. Қатламларни легирлашда BF_3 (р-тур) ёки PF_5 (п-тур) қўшимчалар киритилади. Водород ва фтор киритилган пардаларни узоқ вақт қуёш ёритиб турганда ҳам тузилиши ўзгармайди. α -Si пардаларини плазмавий ўтқазуш технологиясини такомиллаштириш бўйича кўп ишлар қилинмоқда. Плазмавий ўтқазуш усулида бошқа аморф яримўтказгичлар ҳам олинади. “Гидридланган” α -SiC аморф қатламларини $\approx 250^\circ\text{C}$ температурада $\text{SiH}_4 + \text{CH}_4$ аралашмани плазмавий парчалаш йўли билан олинади. Легириловчи киришма манбалари: B_2H_6 ва $\text{PH}_3 \rightleftharpoons \text{a-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$ пардаларини $\text{SiH}_4 + \text{GeH}_4$ аралашмани парчалаш йўли билан олинади. Бундай пардаларда таркибловчилар миқдорлари нисбатини (x) ўзгартириш тақиқланган зона кенглигини ўзгартиради. Масалан, $\alpha\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ учун $E_g = 1,1\text{--}1,8 \text{ эВ}$, $\alpha\text{-Si}_{1-x}\text{Sn}_x\text{:H}$ учун $-1,1\text{--}1,4 \text{ эВ}$.

Қизиқарли янги модда микрокристаллик кремний (мк Si:H), α -Si дан фарқли равишда, биқсима разряд қуввати катта ($\approx 120\text{--}150 \text{ Вт}$) бўлганда олинади. Бу ҳолда материал кри-

сталлчалари ўртача ўлчами 6 нм бўлган “микрoкристаллик” тузилишга эга бўлади. Унинг таққикланган зонаси кенглиги 1,8-1,9эВ, ўтказувчанлиги α -Si никидан юқори ($20 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$).

α -Si:H пардаларнинг таркиби, тузилиши ва хоссалари биқсима разряд плазмасида кечадиған физик-кимёвий жараёнлар табиатиға боғлиқ.

Газсимон фазада энг кимёвий фаол зарралар SiH_x моно-силан радикаллари, кремний ва водород бўлади. Бу диссоциация (парчаланиш) маҳсулотлари тағлик сиртиға томон диффузияланади ва хемосорбция оқибатида ўсаётган пардаға тизилади. Ўтқазиш шароити, аввало, газ оқими тезлиги ва плазманинг юқори частотали қуввати парда ўсишида қатнашадиган зарралар таркибига муҳим таъсир қилади. Бу таркибда SiH ва SiH_2 боғланишлар ҳам бўлиши мумкин.

Водород миқдори 5-8% бўлган α -Si да SiH боғланишлар кўпроқ бўлса, бундай парда энг яхши фотоэлектрик характеристикаларға эга бўлади.

Қаралган усулларидан ташқари, яна бир қатор усуллар сифатли α -Si:H пардалар олишда қўлланилмоқда. Аморф кремний пардаларига юқори вакуум шароитида 20- 25 кэВ энергияли водород ионлари киритилса, яхши натижалар олинади. Бундай пардалар ва кучли ёруғлик таъсирида бар-қарор реактив чанглаш йўли билан ҳам сифатли α -Si:H пардалар олинади. α -Si:H пардалар (қатламлар) ўстиришда газсимон фазадан кристаллаш анъанавий усуллари кенг қўлланилади. Улар орасида:

- паст босимли реакторларда моносиланни пиролиз қилиш усули, бунда пиролиздан кейин водородли плазмада қиздириш ёки ионлар киритиш йўли билан “гидрланади”;
- юқори тартибли силанларни ($40\% \text{SiH}_4 + 30\% \text{Si}_2\text{H}_2 + 15\% \text{Si}_3\text{H}_8 + 10\% \text{Si}_4\text{H}_{10}$) пиролиз қилиш усули;
- газсимон фазанинг юқори температурағача қиздирилган силанни гомоген парчалаш усули, бунда пиролиздан кейин анча паст температурали тағлиққа кремний ўтқазилади;
- силанни газ фазада ультрабинафша нурланиш таъсирида парчалаш усули.

Санаб ўтилган усуллар биқсима разряддагига нисбатан 1-2 тартиб қадар (10-100 марта) α -Si пардалари ўсиш тезлигини оширади. Бундай пардалар самарали легирланади- (эришиладиған ўтказувчанлик $\sim 0,1 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$) ва ташқи

таъсирларга юқори бардошли. α -Si:H нинг тузилиш хусусиятлари камроқ ўрганилган.

Электрон микроскопия усули билан аниқланишича, плазмавий ўтказишнинг муайян шароитида α -Si:H пардаларида устунсимон тузилиш шаклланади, у 10-20 нм диаметрли ва тахминан ўсиш йўналишига параллел ўқли устунчалардан иборат, ИК спектрометрик текширишлар бундай пардаларда водороднинг нотекис тақсимланишини аниқлади: устунлар ичида асосан моно ва дигидрид гуруҳлар, оралиқ соҳаларда кўндаланг боғланишли полимер занжирчалар $(\text{SiH}_2)_n$ бўлади. Устунсимон тузилишнинг тафсилий тавсифи бора-сида ҳам анча тадқиқотлар амалга оширилган. Устунсимон тузилишнинг ҳосил бўлиш сабаблари: таглик сиртига ёмон ишлов бериш, пардалар ўсиши шароитининг номукаммаллиги, уларни легирлаш.

α -Si:H пардаларнинг қўлланиши энг асосий соҳаларидан бири ер устидаги қуёш энергетикасидир. α -Si:H томонидан кўзга кўринадиган ёруғлик ютиш коэффициенти кристаллик кремнийникидан бир тартибдан (10 мартадан) ҳам ортиқ, оптик ютиш қатлами қалинлиги 0,5-1 мкм. Бу хоссалар юпқа пардали қуёш батареялар яратиш имконини беради. Тақиқланган зона кенглиги қуёш нурланиши спектр максимумига яқин, бу эса қуёш энергиясини электр энергиясига айлантириш самарадорлиги юқори бўлишини тақозо қилади. α -Si:H нинг юпқа пардаларини олишнинг соддалиги, арзонлиги арзон қуёш батареялар тайёрлаш имконини беради. Тажриба кўрсатишича, α -Si:H асосида тайёрланган p-i-n тузилмалар ёки Шоттки диодларидан фойдаланиш мақсадга мувофиқ.

p-i-n тузилмалар асосидаги қуёш батареяларда турли аморф яримўтказгичнинг (гетеро) бирлашмалари қўлланиши муҳим натижалар берди. Масалан, p-соҳани ҳосил қилиш учун бор (В) билан легирланган α -SiC пардаларидан фойдаланилди (α -SiC нинг тақиқланган зона кенглиги α -Si никидан катта). Бу кенг зонали дераза p-қатламда ёруғлик ютилишини жуда камайтиради ва салт юриш кучланишини кўтариш имконини беради. Бундай кенг зонали деразаси бор қуёш батареялар Ф.И.К.и 8,5-10,5%га етди ва ундан кўпроқ бўлиши кутилади. Назарий ҳисоблар бу батареялар Ф.И.К.и 18-19% бўлишини билдиради.

Қуёш батареялар етарлича қўп миқдорда ишлаб чиқарилмоқда. Бу батареялардан кам энергия талаб қиладиган қурилмаларда (қўл соатлари, микрокалькуляторлар, болалар ўйинчоқлари ва ҳ.к.) энг қўп фойдаланилмоқда. Аммо юқори энергия талаб қиладиган қурилмаларда қуёш батареяларидан фойдаланиш соҳасида узлуксиз иш олиб борилмоқда.

α -Si:H пардаларининг яна бир ажойиб хусусияти шуки, уларнинг сирти яқинидаги соҳада электрик майдон таъсирида энергетик сатҳлар силжийди. Бу “майдоний эффект” майдон ҳосил қилиш йўли билан сирт яқинида ўтказувчан канал пайдо қилиш мумкин, бунда заряд ташувчилар зичлиги 10^3 - 10^4 см⁻³ қадар ҳажмдагидан катта. Бу асосда майдоний транзисторлар яратиш мумкин. Бу транзисторлар ўлчами жуда кичик (парда қалинлиги <1 мкм, манба-затвор оралиги 10 мкм, ўтказувчан канал кенглиги 100 мкм), уларни тайёрлаш унча қийин эмас.

Водородланган кремний ксерографияда ёруғликка сезгир элементлар, бирламчи тасвир датчиклари (сенсорлар), узатувчи телевизион найлар (трубкалар) ва видеоконлар мишенлари тайёрлаш учун яхши материалдир.

α -Si:H ксерографияда амалда бутун кўринадиган спектрал соҳада юқори ёруғликка сезгирлиги, тез ишлай бошлаши, мустаҳкамлиги, барқарорлиги билан юқори баҳоланади. Электрофотографик материал сифатида α -Si:H тасвирнинг юқори сифатли қиладиган ва юқори ажратиш қобилиятини таъминлайди.

α -Si:H асосидаги оптик датчиклардан видеоахборотни ёзиб олиш, текстил ва металлургия саноатида нуқсонларни аниқлаш ва бошқа мақсадларда фойдаланилади.

α -Si:H асосидаги термоэлементлар ўз сезгирлиги бўйича металл терможуфтлардан ўнлаб маротаба юқори. α -Si:H асосидаги тензодатчиклар учун деформацияга нисбатан сезгирлик бир тартиб юқори. α -Si:H ва унинг гетерокомпозициялари асосидаги хотира элементлари ва ёруғлик нурлантирувчи диодлар ҳам муҳим вазифаларни бажаради.

Назорат учун саволлар

1. Қандай синтез жараёнлари мавжуд?

2. Моддаларни олишнинг бир-биридан қандай усуллари бор?

3. Кимёвий тиклаш жараёнлари қандай?

4. Поликристаллик яримўтказгичлар қандай олинади?

5. Кремний поликристаллари қандай олинади?

6. Германий поликристаллари қандай олинади?

7. Галлий ва индий арсенидлари олиш технологияси қандай?

8. Индий ва галлий фосфидлари қандай олинади?

9. Аморф яримўтказгичлар қандай олинади?

9-БОБ. МОНОКРИСТАЛЛАР ЎСТИРИШ ТЕХНОЛОГИЯСИ АСОСЛАРИ

Яримўтказгич монокристаллар ва эпитаксиал қатламлар ўстириш қаттиқ фазадан, суюқ фазадан, газ фазадан амалга оширилиши мумкин. Биз қуйида бу ҳолларнинг ҳар бири ҳақида тўхтаб ўтамиз.

9.1. КРИСТАЛЛАРНИ ҚАТТИҚ ФАЗАДАН ҲОСИЛ ҚИЛИШ

Бундай жараёнлар уч асосий йўналишда олиб борилади: 1) қаттиқ фазада ва қовушиш ҳолида деформациялаш қиздируви воситасида қайта кристаллаш; 2) полимер авририлишлар воситасида қайта кристаллаш; 3) аморф ҳолатдан ва ўта тўйинган қаттиқ эритмадан қайта кристаллаш усуллари мавжуд.

Бу жойда қайта кристаллаш деганда қаттиқ фазадан кристалл ўстирилганда кристалл панжараси симметрияси (тузилиши) ўзгармаслиги (**рекристалланиш**) ёки бошқа симметрияли янги кристалл панжараси ҳосил бўлишини тушунилади.

Бу усулларнинг афзалликлари: материалнинг суюлиш температурасидан анча паст температураларда кристаллар ўстириш имконияти кристаллар олиш технологиясини соддалаштиради; зарур шаклли кристаллар олиш жараёнлари соддалашади, чунки, ўсаётган кристалл шакли олдиндан тайинланади; паст температурада диффузия коэффициентлари кичик бўлганлиги туфайли киришмаларнинг ўсаётган кристалл-даги тақсимооти дастлабки моддадагидек сақланади.

Мазкур усулларнинг камчиликлари ҳам бор: қаттиқ фазадан кристалланишнинг имконий марказлари миқдори кўп бўлади. Марказлар вужудга келишини ва бинобарин, йирик яримўтказгич монокристаллар ўстиришни бошқариш қийин. Шунинг учун бу усуллар батафсил қаралмайди.

Аморф ҳолатдан ва ўта тўйинган қаттиқ эритмалардан қайта кристаллаш усуллари юпқа эпитаксиал қатламли

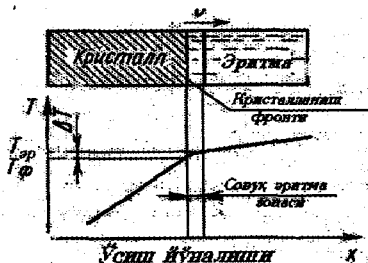
яримўтказгич моддалар ва микроэлектрон асбоблар технологиясида етарлича кенг қўлланишга эга бўлмоқда.

9.2. КРИСТАЛЛАРНИ СУЮҚ ФАЗАДАН ҲОСИЛ ҚИЛИШ

Кристалларни бундай ўстиришнинг икки гуруҳ усуллари ишланган бўлиб, улар суюлмаларнинг ўзидан ўстириш ва эритмалардан ўстириш усуллари дидир.

9.2.1. КРИСТАЛЛАРНИ СУЮЛМАЛАРДАН ҲОСИЛ ҚИЛИШ

Бу усуллар саноатда кенг қўлланади. Уларнинг унумдорлиги юқори. Жараёнлар, киришмалар деярли бўлмаган бир таркибловчили тизимда боргани туфайли ўстириш тезлиги анча катта, етарлича тоза кристаллар олинади. Кристалларни бу усулларда ўстиришда мумкин бўлган энг катта температуралар талаб қилинади. Бу эса, баъзи муаммоларни келтириб чиқаради. Хусусан, жараён юқори температурада бориши учун қувватдор қурилмалар бўлиши зарур. Ушбу шароитда суюлма ифлосланиши ҳам мумкин.



П.33-расм. Суюлмадан йўналган кристалланиш усулида, кристалл ўстиришда температура тақсими.

Монокристалларни суюлмадан ўстиришнинг барча усуллари суюлманинг йўналган кристалланиш жараёнларига асосланган. Бунда суюлма ΔT қадар ўта совиган ҳолда кристаллнинг ўсиши бир фазавий чегарада амалга ошади ва иссиқлик кристалланиш fronti-дан бир йўналишда асосан олиб кетилади (П.33-расм). Бу жараёнда битта моно-

кристалл ҳосил бўлади.

Йўналган кристалланиш усуллари уч гуруҳга бўлинади:

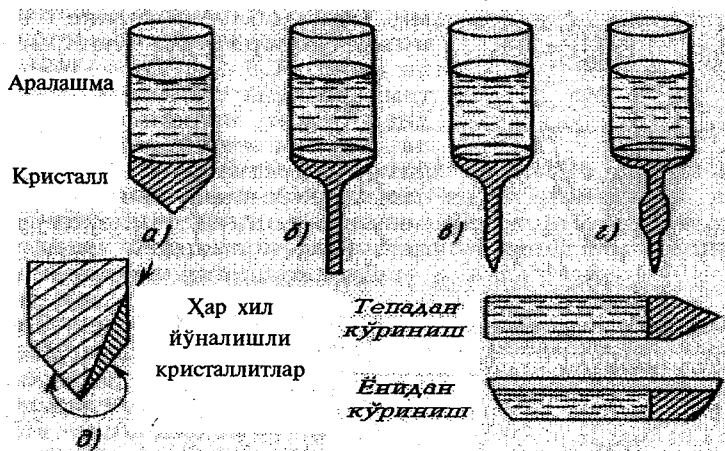
- 1) тайёрлама моддани суюлтирилади ва кейин уни бир томонидан кристалланади (нормал йўналган кристалланиш);
- 2) суюлган тайёрлама моддадан монокристалл тортиб олинади (суюлмадан кристалларни тортиб олиш);

3) ҳар бир пайтда тайёрлама модданинг фақат унча катта бўлмаган қисми (зонаси кетма-кет суюлтирилиб, кейин у кристалланади (зоналарнинг қайта кристалланиш усуллари).

9.2.2. СУЮЛМАЛАРНИНГ НОРМАЛ ЙЎНАЛГАН КРИСТАЛЛАНИШ УСУЛЛАРИ

Бу усулларнинг барчасида кристалл суюлмали идиш (тигел) деворларига ёпишган ҳолда ўсади. Кристалланиш жараёнида ўта совиш ҳосил қилиш учун суюлмали тигелни иситгичга нисбатан ёки иситгични тигелга нисбатан жилдириб оқизилади. Бу ишни, бунингсиз, суюлмали тигелни температура градиенти мавжуд бўлган ҳолда совитиш эвазига ҳам бажариш мумкин.

Нормал йўналган кристалланиш жараёни махсус равишда кристалланиш марказлари ҳосил қилмасдан ҳам ўтказилиши мумкин. Бу ҳолда кристалланувчи бутун модда жараён бошида суюқ ҳолатда бўлади. Тигелнинг модда суюлиш температурасидан паст температурадаги соҳаси совиганда, қоида тариқасида, бир неча кристалланиш марказлари ўз-ўзидан



II.34-расм. Нормал йўналган кристалланиш усулида кристаллар ўстиришда қўлланиладиган тигеллар шакллари.

ҳосил бўлади. Ўсиш жараёни самарадорлигини ошириш учун бир неча хил тузилишли тигеллар ишлатилади (II.34-расм).

Даставвал кристалланувчи модда ҳажмини камайтириш учун тигелнинг бир учи конус шаклига келтирилади. Бу жойда кристалланиш маркази ҳосил бўлиши эҳтимоллиги ортади. Ўсиш учун қулай йўналган марказ бошқаларининг ўсишини тўхтатади. Бундай натижага эришиш учун тигелнинг бир учи капилляр шаклда ясалади (II.34, б,в-расм)

Нормал йўналган кристалланиш жараёнини амалга ошириш учун керакли анжомлар:

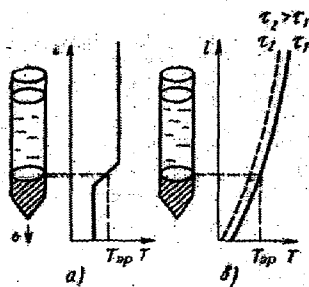
- тайин шаклли тигел, у кимёвий барқарор (бирикма ҳосил қилмайдиган, таъсирлашмайдиган) моддадан тайёрланади,

- тайин иссиқлик майдони ҳосил қиладиган печ:

- печнинг температурасини ва тигел ёки иситтични механик кўчиришни бошқарадиган тизим.

Тигелни суюлма ҳўлламаслиги, у етарли термик ва механик мустаҳкамликка эга бўлиши керак.

Тигелларни тайёрлашда кўпинча кварц шиша, алюминий оксиди Al_2O_3 , цирконий диоксиди, торий диоксиди ва б. қўлланади.



II.35-расм. Нормал йўналган кристалланиш усулида кристаллар ўстиришда печларда температура тақсимооти.

Кристалларни печларда турли температура градиенти мавжуд бўлган шароитда ҳам ўстирилади, бунда орасида температуралар фарқи бўлган изотермик соҳалар вужудга келтирилади. Бир соҳа модданинг суюлиш температурасидан юқорида, иккинчиси пастда бўлади (II.35, а-расм). Бу соҳалар орасида иссиқлик алмашинуви жуда кам бўлиши чоралари кўрилади.

Агар тигелни жилдирмасдан печнинг температурасини умумий пасайтирилиши ҳисобига кристалл ўстирилса, бу ҳолда темпе-

ратура тақсимооти II.35, б-расмдагидек бўлади.

Нормал йўналган кристаллаш бир қатор яримўтказгичлар ва диэлектрикларнинг йирик кристалларини олиш учун қўлланади.

Қараб чиқилган усулнинг асосий камчилиги шуки, ўстирилаётган кристалл ва тигелнинг иссиқликдан чизиғий кенгайиши коэффициентлари ҳар хил бўлиши туфайли бу усулда мукаммал кристаллар олиш қийин.

9.2.3. СУЮЛМАДАН КРИСТАЛЛНИ ТОРТИБ ОЛИШ УСУЛЛАРИ

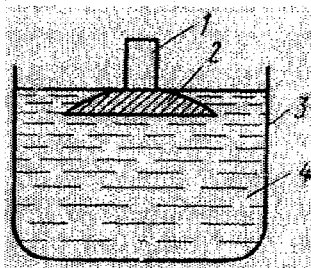
Бу усуллар назорат қилинадиган ва қайталанадиган хос-сали яримўтказгичларнинг йирик монокристаллари саноатда ишлаб чиқаришда энг кўп қўлланади. Кристалларни суюл-мадан тортиб олиш асосий қондасини биринчи марта 1916 йили Чохральский таклиф қилган. Шунинг учун бу усуллар туркумини умумлаштириб, Чохральский усули дейилади. Бу усулнинг тавсифини мукаммал тузилишли монокристал-лар олиш бандида келтирилади.

Бу ўринда биз Чохральский усули ҳақида қисқача маъ-лумот берамиз. Бу усул қуйидагидан иборат: синчиклаб тоза-ланган дастлабки моддани (порошок ёки поликристалл пар-чаларини) тигелга солинади ва суюлгунча қиздирилади. Жа-раёни жипс ёпиладиган камерада (бўлмада) вакуум шарои-тида ёки нейтрал (инерт) оксидловчи ёки тикловчи муҳитда ўтказилади. Сўнгра суюлмага ўлчами бир неча мм бўлган хамиртуруш кристалл ботирилади.

Хамиртурушнинг учи қисман суюлган ва муайян темпе-ратура маромига эришилгандан сўнг, суюлманинг кристал-ланиши хамиртурушдан бошлаб юз берадиган қилиб, уни тортиб чиқара бошланади. Кристаллнинг диаметрини тортиб олиш тезлигини танлаш ёки суюлмани қиздириш йўли би-лан бошқарилади.

Киропулос усули. Бу усулда хамиртуруш суюлмага кири-тилади ва кейин ундан тортиб чиқарилмайди, суюлма ичида ўса бошлайди, бунга модда суюлиши температурасига мос изотерма суюлманинг ичкарасига кўчиши сабабчи бўлади. Бунга эришиш учун суюлманинг температураси пасайганда кристалл (хамиртуруш) тутгич орқали хамиртурушни сови-тилади. Киропулос усули диаметрининг баландлигига (узун-лигига) нисбати катта бўладиган кристалларни ўстиришда қўлланилади.

Кристаллни суюлмадан тортиб олиш усуллари нормал йўналган кристалланиш усулидан қуйидаги афзалликларга



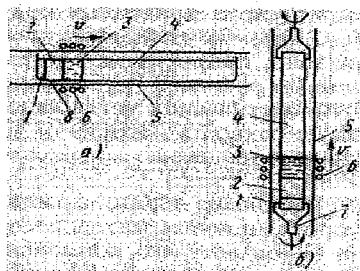
П.36-расм. Киропулос усулида кристаллар ўстириш.
1-хамиртуруш; 2-кристалл; 3-тигел; 4-суюлма.

Ғими 1 кг бўлса, ҳозир у 60 кг дан ортиқ. Ўстирилган кристаллар диаметри 150-300 мм ва узунлиги 1,5-2 м га етди. Уларнинг тузилиши ҳам мукаммаллашиб бормоқда, дислокацияларсиз кристаллар ўстирилмоқда.

эга. Кристалл эркин фазода ўсади, тигел унга механик таъсир кўрсатмайди, қурилма ўсаётган кристалл ўлчамларини ҳар хил қилиб олиш имконини беради. Кристалл ўсиши жараёнини кузатиб туриш мумкин.

Бу усуллар кремний монокристаллари олишда асосий ўрин тутди. Жаҳонда олинадиган кремний монокристаллари йилига 2000 тоннадан ортиқ. Технологик қурилмалар тобора такомиллашмоқда. Масалан, 1960 йилда кремний кристаллари ўстирадиган тигелнинг си-

9.2.4. ЗОНАВИЙ СУЮЛТИРИШ УСУЛЛАРИ



П.37-расм. Зонавий суюлтириш усулида кристалл ўстириш:

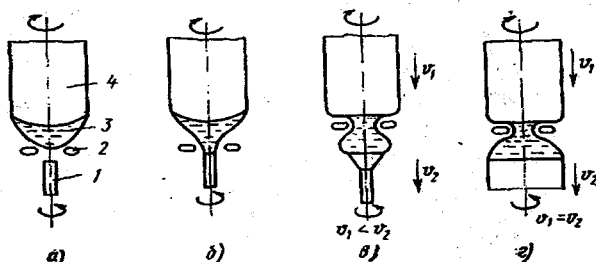
а) горизонтал зонавий суюлтириш; б) вертикал тигелсиз зонавий суюлтириш 1-хамиртуруш; 2-кристалл; 3-суюлган зона; 4-дастлабки модда; 5-жипс ёпиладиган камера девори; 6-индуктор; 7-кристалл тутгич; 8-тигел.

Бу усуллар яримўтказгич монокристалларини ўстириш ва моддаларни чуқур тозалашда муҳимдир. Уларнинг бир фазилати-кристалларни ўстираётганда киришмаларни ҳам бир текис киритиш имкониятидир. Булардан горизонтал ва вертикал зонавий суюлтириш, тигелсиз зонавий суюлтириш ва Вернейл усуллари-ни кўрсатиш мумкин.

Горизонтал зонавий суюлтириш усулида (П.37, а-расм) кристалланувчи модда тигелга жойланади. Тигелнинг бир четига монокристалл хамиртуруш жойланади. Жараён бо-

шида хамиртуруш — дастлабки модда чегарасида суёқ зона ҳосил қилинади. Унинг дастлабки модда орқали, хамиртурушдан то тигелнинг бошқа четига силжиб бориши туфайли монокристалл ўсиб боради. Мазкур усулда кристаллни тигелдан фойдаланмасдан ўстириш мумкин (сузувчи зона усули) (II.37, б-расм). Бу усул жуда тоза монокристалларни ўстиришда кенг қўлланилади.

Тигелсиз зонавий суёлтириш жараёнида намунадаги суёлган зонани сиртий таранглик кучлари ушлаб туради. (II.38-расм). Кристаллнинг шакли қандай бўлишлиги гидростатик босим ва суёлманинг сиртий таранглиги муносабатига боғлиқ. Бу усулни кремний технологиясида қўллаш диаметри 100 мм ва ундан ортиқ бўлган монокристаллар олиш имконини берди (II.38-расм).



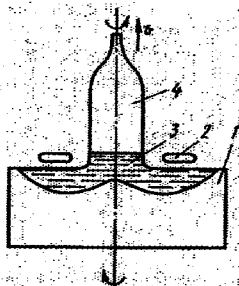
II.38-расм. Индуктор диаметри суёлтириладиган стержень диаметридан кичик бўлган ҳолда тигелсиз зонавий суёлтириш усулида кристаллни ўстириш жараёни босқичлари (V_1 , V_2 — мос равишда, стержень ва хамиртуруш ҳаракати тезликлари): а- суёлма томчиси ҳосил қилиш; б- хамиртурушни қўлланиш; в- диаметрни шакллантириш; г- ўзгармас диаметрли кристаллни ўстириш.

Монокристалларни тигелсиз, тагликдан ўстириш (гарнисаж) усули ҳам ишлаб чиқилган. Бу усулда суёлтириладиган катта диаметрли стерженнинг (пъедестал, тагликнинг) юқориги юзида суёлма ҳосил қилинади ва хамиртуруш ёрдамида кристалл тортиб олинади.

Бу усулнинг афзаллиги шундаки, унинг ёрдамида узунлик ва кўндаланг кесим бўйича киришмалар юқори даражада бир текис тақсимланган монокристаллар олиш мумкин.

Монокристалларни тигелсиз ўстириш усуллари қийин суюладиган яримўтказгич моддалар олишда айниқса аҳамиятлидир.

Вернейл усулида хамиртуруш кристалл учини алангада суюлтирилади. Бу усулни биринчи марта сапфир монокристалларини ўстиришда қўлланилган (П.39-расм). Уни иссиққа бардошли моддалар кристалларини ўстиришда қўлланилади. Ундан ҳозир сапфир, рубин, рутил, цирконий оксиди, иттрий оксиди, никелли феррит ва бошқа кристалларни ўстиришда фойдаланилади.



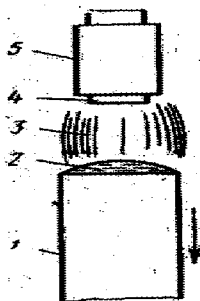
П.39-расм. Тагликдан кристаллни тигелсиз ўстириш усули: 1-таглик; 2-индуктор; 3-суюлма; 4-ўстирилаётган кристалл.

9.3. КРИСТАЛЛАРНИ ЭРИТМАДАН ЎСТИРИШ

Бу жараён олдин қўрилган тоза суюлмадан ўстиришга нисбатли анча паст температураларда олиб борилиши мумкин.

Ушбу усул билан:

-жуда юқори суюлиш температурасига эга бўлган моддалар кристалларини (масалан, олмосни);



П.40-расм. Аланга билан суюлтириш усулида (Вернейл усули) кристаллни ўстириш: 1-ўстирилаётган кристалл; 2-суюлма; 3-аланга; 4-дастлабки модда кукуни ва кислород юбориладиган найча; 5-водород юбориладиган найча.

-суюлиш температурасида таркибловчи буғ босими жуда юқори бўлган ёки парчаланиб суюладиган кимёвий бирикмаларни;

-суюлмаси юқори даражада қовушоқ бўлган моддалар кристалларини;

-паст температурали полиморф (кўп шаклли) моддалар кристалларини ўстириш мумкин. Жараённинг паст темпера-

турали бўлиши кўпинча тозароқ ва мукамалроқ монокристаллар олиш имконини беради.

Эритувчига қўйиладиган талаблар:

-у кристалл ўстириш жараёни температурасини муҳим даражада пасайтириши ва ўз буғининг босими етарлича паст бўлиши керак;

-ўстирилаётган кристаллни ифлосламаслиги, яъни тақсимот (сегрегация) коэффиценти кичик бўлиши керак;

-унинг кристаллдаги атомлари нейтрал киришма бўлиши маъкул. Бундай эритувчини танлаб олиш анча қийин.

Ушбу ҳоллар фарқ қилинади:

1. Ўстирилаётган кристалл таркибига кирмайдиган модда эритувчи хизматини бажаради (масалан, NaCl кристаллини ўстиришда сув).

2. Ўстирилаётган бирикманинг таркибловчиларидан бири эритувчи бўлади (масалан, GaP кристаллини ўстиришда).

Биринчи ҳолда ўстирилган кристалл эритувчининг барча таркибловчилари киришмалар сифатида қолдиқ киришмалар билан биргаликда мавжуд бўлади. Шунинг учун бундай кристаллар унча тоза эмас.

Иккинчи ҳолда эритмада чет моддалар йўқ, ўстирилаётган кристалларнинг тозалик даражасини фақат эритма таркибловчилари тозалиги аниқлайди.

Эритмадан кристалл ўсиши ҳолида бу жараён қуйидаги босқичлардан иборат:

-дастлабки таркибловчиларнинг эриши;

-таркибловчиларнинг эритманинг суяқ фазаси орқали кристалланиш фронти томонига диффузияланиши;

-кристалланиш фронтида таркибловчиларнинг ўтириб қолиши;

-кристалланиш иссиқлигининг сочилиши.

Эритмадан ҳосил қилинаётган кристалларнинг ўсиш тезлиги ўз суялмаларидан олинадиган кристалларникига нисбатан икки-уч тартиб чамасида кам (10^{-3} - 10^{-2} см/соат) бўлади, ammo уни оширишнинг баъзи чоралари ҳам мавжуд.

Кристалланувчи модданинг эрувчанлигини ошириш учун шу модда билан таъсирлашувчи таркибловчилар эритмага қўшилади. Уларни **минерализаторлар** дейилади.

Эритмалардан яримўтказгичлар монокристалларини ўстириш усуллари бир-биридан эритманинг кристалланувчи

модда билан ўта тўйинишини қандай ҳосил қилиниши билан фарқланади:

- эритувчининг буғланиши билан;
- кристалланувчи модда манбаи ва хамиртуруш орасида температуралар фарқи вужудга келтириш билан;
- электрик майдонда кристаллаш билан;
- тўйинган эритмани секин совитиш билан;
- бутун намунада ҳосил қилинган температура градиенти бўлгани ҳолда зонавий суюлтириш билан.

Махсус хамиртурушлар киритмасдан, балки кристалланиш марказларининг ўз-ўзидан (спонтан) пайдо бўлиши ва ўсиши йўли билан ҳам эритмадан кристалларни ўстириш мумкин (оммавий кристалланиш) ёки кристаллни хамиртуруш атрофида ўсишини назорат қилиб ўстириш мумкин.

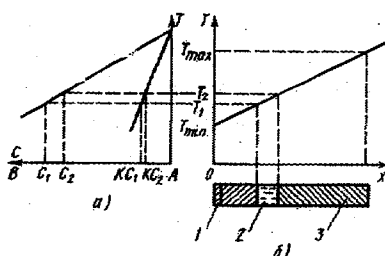
Энг содда ҳолда кристалл ўсиши учун керак бўлган эритманинг ўта тўйинишини эритувчининг буғланиши ёки тўйинган эритманинг секин совитилиши орқали пайдо қилинади. Бу ҳолда оммавий кристалланиш оқибатида кичик кристаллар олинади, уларда нуқсонлар кўп, киришмалар жуда нотекис тақсимланган.

Йирик кристалларни эритмалардан хамиртуруш асосида ўстириш худди суюлмадан ўстириш усулларига ўхшаб кетади.

9.3.1. ТЕМПЕРАТУРА ГРАДИЕНТЛИ ЗОНАВИЙ СЮЮЛТИРИШ УСУЛИ

Ушбу усул кристалларни эритмадан ўстиришнинг муҳим усулидир.

1 хамиртуруш ва дастлабки 3 (А) модда орасида 2 эритувчининг юпқа қатлами жойлашган. Улар температураси тақсимооти II.41, 6-расмда тасвирланган печга жойланади. Тизимнинг $T_{\text{макс}}$ энг катта температураси А модданинг суюлиш температурасидан паст, энг кичик $T_{\text{мин}}$ температураси эса А-В эвтектиканинг суюлиш температурасидан юқори қилиб олинади. В эритувчи А модда билан туташган ҳолда суяқ фаза ҳосил қилади ва у ҳар икки йўналишда горизонтал равишда тарқалади. Зона чегаралари температураси T_1 ва T_2 бўлиб қолгунча (улар А-В тизимнинг мувозанатий ҳолатига мос келади) А модданинг эриши давом этади. А модданинг мувозанатий зичлиги ўнг чегара яқинида чап чегара яқини-



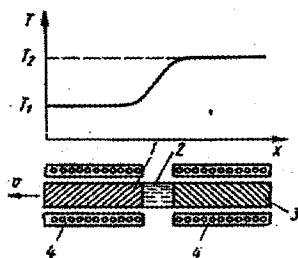
11.41-расм. Температура градиенти бўлган ҳолда кристаллни зонавий суюлтириш усулида ўстириш: а- A (кристалланувчи модда)- B (эритувчи) тизими ҳолатлари диаграммасининг қисми; б-намуна бўйлаб температура тақсироти (1- A модда хамиртуруши; 2-суяқ $A-B$ эритма зонаси; 3-дастлабки A модда).

дагидан юқори. Суялган зонада (соҳада) A модда зичлигининг градиенти ўрнашади ва у зонанинг иссиқ чегарасидан совуқ чегарасига томон диффузияланади. Оқибатда **суялган зона температура градиенти** таъсирида намунанинг иссиқроқ учи томонга кўчади. Бу кўчиш зона ичида эритувчи зичлигини ўзгартиради. B эритувчининг зонадаги миқдори унинг A қаттиқ фазадаги эрувчанлиги ҳисобидан ҳам камаяди.

Суялган зона кўчиши тезлигини ошириш учун температура градиенти (dT/dx) ва A таркибловчининг суяқликда D диффузия коэффиценти катта бўлиши ва ликвидус чизиги оғмалиги (dT/dc) кичик бўлиши керак.

Бир жинслироқ кристалларни ўстириш учун температура градиенти кичик бўлиши, A қаттиқ фазада B эритувчи жуда кам эрувчанликка эга бўлиши керак.

Эритманинг зонаси орқали электрик ток ўтказиб, изотермик шароитда кристаллаш мумкин. Бу ҳолда ионларнинг кўчиши ва Пельтье эффекти ҳисобига кристалланиш фронтида эритма ўта тўйинади. Манба — эритма чегарасида Пельтье иссиқлиги ажраладиган, эритма — таглик чегарасида эса у ютиладиган қилиб ток йўна-



11.42 -расм. Температура градиенти бўлган ҳолда бир жинсли кристалларни зонавий суялтириш усулида ўстириш: 1- A модда кристалли; 2-суяқ $A-B$ эритма зонаси; 3-дастлабки A модда; 4-икки зонали печ.

лиши танланади. Пельтье иссиқлиги таъсирида манба қатлами эрийди, шу вақтда бош-қа чегарада температура пасайиб, эритма ўта тўйиниб қолади, кристалланиш юз беради. Электрик майдонда бундай крис-талланиш жараён температурасини бир мунча пасайтириш имконини беради, бу эса мазкур усулнинг фазилатидир.

9.3.2. КВАРЦ МОНОКРИСТАЛЛАРИНИ ЎСТИРИШ

Кварц кристаллари саноатда муҳим аҳамиятга эга. Уларни температура градиенти мавжуд бўлганида хамиртурушларда ўстириш усулини қараб чиқайлик.

Кварцнинг эритувчиси сифатида сув ишлатилади.

Юқори температура ва босимда, минерализатор (NaOH) иштирокида амалга ошадиган кварц кристалларини ўстириш қуйидаги тартибда олиб борилади:

- α -кварцнинг майда доналари кукуни реактор-автоклав тубига солинади, унинг юқориги қисмида α - кварц хамиртурушлари осиб қўйилган;

- автоклавнинг (0,8) қисми ишқорий эритма ($0,5\text{NaOH}$) билан тўлдирилади;

- автоклав икки зонали печда тик вазиятда жойланади;

- автоклавнинг кукунли пастки қисмининг температура-си юқориги қисм-ўсиш зонаси температурасидан юқори;

- температурани сувнинг критик температураси 374°C дан пастроққача оширилганда эритма сатҳи кўтарилади ва ишчи ҳажмни тўла эгаллайди;

- автоклав ичидаги босим температуралар майдони ва унинг дастлабки эритма тўлдириш билан аниқланади;

- пастки зона температураси 400°C , юқори зонаники 350°C , автоклавдаги босим 200 МПа бўлганида α - кварц монокристалларининг ўсиш тезлиги $[0001]$ йўналишда суткада 2 мм.га етиши мумкин;

- кристалланиш фронти яқинида ўта тўйиниш 400°C да тўйинган эритманинг ўсиш зонасига конвекцион кўчирилиши ҳисобига ҳосил қилинади. Бу зонада 350°C да эритма ўта тўйинган бўлиб қолади.

Бу усул билан кварцнинг энг йирик ва мукамал монокристаллари ўстирилади.

Кварц кристалларини ўстиришда автоклав (тигел) пўлатдан ясалади. Бошқа моддалар учун эса асл металллардан ички қристормалардан фойдаланилади.

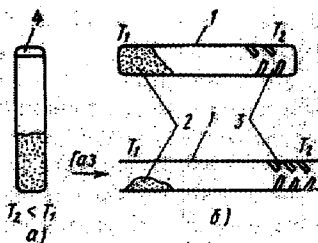
Баён қилинган усул билан яна бир қанча моддаларнинг йирик кристаллари ўстирилади (сапфир, рубин, рух оксиди, иттрий-темир гранат ва б.).

Кристалларни эритмалардан ўстириш қонуниятлари ва усуллари яримўтказгичли асбоблар технологиясида эпिताксиял қатламлар олиш учун кенг қўлланилади.

9.4. КРИСТАЛЛАРНИ ГАЗСИМОН ФАЗАДАН ЎСТИРИШ

Газсимон фазадан кристалларни ўстиришда қўлланидиган усулларнинг икки гуруҳи бор:

1. Тоза физик конденсацияланишга асосланган усуллар. Уларнинг энг муҳими сублимация-конденсация жараёнига асосланган усулдир.



И.43-расм. Газ фазадан кристалларни ўстириш учун қўлланиладиган ёпиқ ва оқимли (очиқ) тизимлар: а-ёпиқ тизим; б-оқимли тизим (1-контейнер; 2-дастлабки модда (шихта); 3-ялпи кристалланиш зонаси; 4-монокристалл хамиртуруш).

2. Кристалланиш зонасида (соҳасида) газсимон кимёвий бирикмаларнинг парчаланиши (ёки тикланиши) ҳисобига кимёвий синтезланиш ва кимёвий кўчиришга асосланган усуллар.

Электронлар техникасининг газсимон фазадан олинадиган энг муҳим материаллари монокристаллари орасида биринчи ўринларда $A^{IV}B^{IV}$, $A^{IV}B^{VI}$ бирикмалар ва кремний карбиди туради.

Кристалларни газсимон фазадан суюлиш тем-

пературасидан анча паст температураларда ўстириш мумкин. Бунда амалда ҳар қандай моддалар кристалларини ҳосил қилса бўлади.

Сублимация-конденсация усули билан кристаллаш.

Бу усулни буғи суюлиш температурасидан пастда етарлича юқори босим ҳосил қиладиган моддалар кристалларини

бошқа газсимон усуллар ночор бўлган ҳолдаги моддалар кристалларини ўстиришда қўлланилади. Бу усулда кристалланиш-ни ёпиқ ёки оқимли тизимларда ўтказилади.

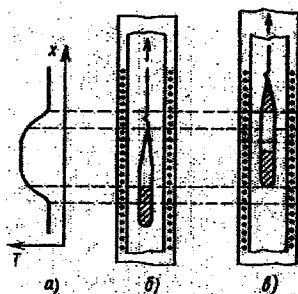
Ёпиқ тизим кавшарланган кварц ампуласи бўлиши мумкин. Қийин суюлувчан моддалар учун корунд (Al_2O_3) ёки қийин суюлувчан металллардан тайёрланиб, кавшарланган тигеллардан фойдаланиш мумкин. Баъзи ҳолларда, зарура-тан, тигелларни бошқа материаллардан (масалан, графит-дан, шиша углероддан) жипс ёпилмайдиган қилинади, аммо тигелдан буғларнинг чиқиб кетиши кам бўлиши ке-рак (**квазиберк тизимлар**).

Берк (ёпиқ) тизимларда масса узатилиши молекуляр дас-талар (вакуумда), ё молекуляр ёки конвектив диффузия орқали амалга оширилади.

Оқимли тизимларда кристаллар ўстиришда дастлабки модда буғларини кристалланиш зонасига инерт газ олиб боради.

Кимёвий реакция иштирокида кристалланиш усуллари-ни суюлиш температурасидан пастда ўз буғлари босими кичик бўладиган моддалар ёки сублимация жараёнида ўз таркиби бузиладиган моддалар кристалларини ўстиришда қўлланила-ди. Кимёвий транспорт иштирокида кристалларни ўстириш берк ёки квазиберк тизимларда бажарилади: газсимон кимё-вий бирикмаларни парчалаш (ёки тиклаш) усулини оқимли тизимларда қўлланилади.

Кристалларни газсимон фа-задан ўстириш усуллари-нинг барчасида кристалланиш мар-казларининг ўз-ўзидан ҳосил бўлишидан ёки хамиртуруш-лардан фойдаланиш мумкин (II.43-расм). Биринчи ҳолда ўстирилган игнасимон кристал-лар, пластинасимон ёки поли-кристаллик ўсмали кристаллар электрон техникада камдан-кам қўлланади. Баъзи ҳолларда хамиртурушсиз технология етарлича йирик монокристал-лар беради (II.44-расм).

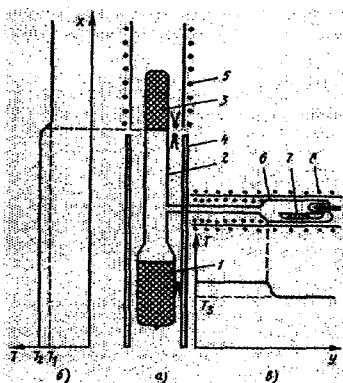


II.44-расм. Ампулада кимёвий транспорт реакциядан фойда-ланиб кристалл ўстириш: а-печ баландлиги бўйича тем-пература тақсимо-ти; б-тортиб чиқариш бошида ампула вазияти; в-жараённинг кейинги босқичи.

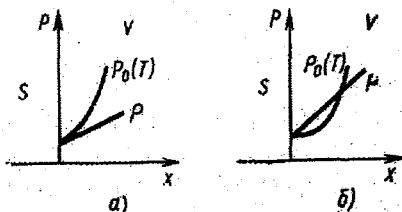
Бугни хамиртуруш кристаллчага назоратли ўтказиш усули билан кимёвий таркиби ва стехиометриясини назорат қилиб, ўстириладиган старлича йирик (диаметри 100 мм гача) кристаллар ҳосил қилиш мумкин. Бундай жараённинг тасвири HgSe монокристаллари олиш учун II.45-расмда келтирилган. Дастлабки поликристаллик моддани (2) кварц ампуланинг (1) тигелига солинади. Ампуланинг юқориги қисмида (3) монокристаллик хамиртуруш жойланади. Ампулани бирикманинг сублимация температурасигача (4) печда қиздирилади. (4) ва (5) печлар силжиб, кристалл ва буг фаза чегарасида зарурий температуралар градиентини ҳосил қилади.

(6) кварц ўсмага симобли ёки селенли (7) қайиқча жойланади. (8) печнинг температурасини бошқариб, (2) ампула ичида буг фазанинг зарурий таркиби пайдо қилинади. Хамиртурушнинг T_1 ва буг фазанинг T_2 температуралари, шунингдек, печлар силжиши тезлиги ўстириладиган монокристаллар ўсиш тезлиги ва сифатини аниқлайди. T_3 температурани бошқариб, монокристалл таркиби ва стехиометриясини ўзгартириш мумкин. Симоб селениди HgSe монокристаллари $T_1=230\div250^\circ\text{C}$, $T_2=300\div330^\circ\text{C}$, $T_3=250\div350^\circ\text{C}$ бўлган шароитда олинади ва уларда заряд ташувчилар зичлиги 10^{23}м^{-3} бўлади.

Одатда, газсимон фазадан монокристалл ўсиши тезлиги $10^{-2}-1$ мм соат бўлиб, Чохральский усулида ўстириш тезлигидан бир неча тартиб қадар паст. Чунки суюлма зичлигига нисбатан газ зичлиги 10^4-10^6 марта кичик.



II.45-расм. Монокристалларни буг фазасидан (а) ўстириш ва печларнинг температура тақсимотлари (б, в): 1-кварц тигел; 2-кварц ампула; 3-хамиртуруш; 4, 5-печлар; 6-кварц найча; 7-учувчан таркибловчили қайиқча; 8-учувчан таркибловчи буглар босимини бошқарадиган иситгич.



П.46-расм. Газ фазадан кристалл ўстирилганда барқарор (а) ва барқарор бўлмаган (б) фазалар ажралиш сиртининг мавжуд бўлиши шартлари.

Босимни ошириш йўли билан газсимон фаза зичлигини ошириш мумкин. Аммо бунга чегараловчи бир мунча сабаблар бор. Босимни жуда орттириб юборилса, ампула портлаб кетиши ҳам мумкин. Газ ташувчининг мажбурий конвекциясидан (оқишидан), табиий конвекциядан фойдаланиб, газсимон фазадан кристаллар ўстириш тезли-

гини ошириш мумкин.

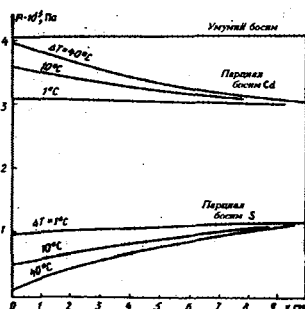
Кристалларни буғ (газсимон) фазадан ўстиришда унинг тезлигини буғнинг концентрацион тарзда совиб кетишини чеклаб қўяди. Масалан, бир таркибловчили буғ ўтирганда, (конденсирланганда) кристалл-буғ ажралиш сиртининг барқарорлиги чегара яқинидаги соҳада конденсирланаётган модданинг P парциал босими ва тўйинган буғнинг P_0 босими орасидаги муносабат билан аниқланади.

Агар температура градиенти ва y билан боғланган P_0 босим градиенти $x \geq 0$ қийматлар учун мавжуд бўлса, бу ҳолда **кристалл ўсади**. Бунда конденсирланиш (кристалланиш) P босим қийматлари градиентини ҳосил қилади. Фазалар ажралиш чегарасида $P = P_0$ деб фарз қилинади. Агар $x = 0$ учун $P < P_0$ бўлса, ажралиш чегараси барқарор, $P > P_0$ бўлса, бу чегара барқарормас. Расмлардан: агар $dP_0|dx|_{x=0} \geq dp|dx|_{x=0}$ бўлса, барқарор ўсиш юз беради.

Газсимон фазадан кристалларни ўстириш жараёнларини таҳлил қилишдан келиб чиқадиган хулосалар:

1. Бирор модда кристалларини муайян температуралар оралиғида ўстириш мумкин, бунда ҳар бир температурада ΔT градиентни ва массалар кўчирилиши механизмини ўзгартириш йўли билан ўсиш тезлигини ўзгартириш мумкин. Бу монокристаллар олиш технологик шароити етарлича кенг бўлиши имконини беради.

2. Ўстириш температураси ва кристалл ўсиши тезлигини ўзгартирганда икки ҳол бўлиши мумкин:



II.47-расм. Ностехиометрик CaS таркибловчиларнинг парциал босимларни ҳисобланган қийматларининг (турли ΔT лар учун) манбагача масофага боғланиши.

да кристалл стехиометрияси адсорбцион ва кинетик шартлар билан аниқланади, ўсиш тезлиги ва кристаллографик йўналишига боғлиқ бўлади.

3. Кристалл кўп ёқлама ўсганда асосий таркибловчилар, хусусий нуқтавий нуқсонлар ва легирловчи киришмалар тақсимооти секториал характерга эга бўлади.

Бу хусусиятларни ҳисобга олган ҳолда газсимон фазадан керакли хоссали монокристаллар олишни йўлга қўйиш мумкин.

9.5.КЕРАКЛИ ШАКЛДАГИ МОНОКРИСТАЛЛАРНИ ЎСТИРИШ

Қуйидаги мақсадларда монокристалларни керакли шаклларда ўстирилади:

1. Қимматбаҳо ва камёб материалларни асбоблар тайёрлашда кесиш. Силлиқлашда исрофланишни камайтириш зарур. Масалан, яримўтказгичлар кристалларига механик ишлов беришда исроф 70-90% ни ташкил қилиш мумкин.

2. Кристалларга механик ишлов беришни осонлаштириш керак.

3. Кристаллар асосида тайёрланадиган асбобларга нисбатан қўйиладиган талабларга мувофиқ келадиган электрофизик хоссаларга ва геометрик ўлчамларга эга бўлган кристаллар ўстириш зарур.

а) газсимон фаза ўсаётган кристалл ҳажми билан мувозанатда бўлган ҳол (v ўсиш тезлиги v кристалл таркибловчилари ўз диффузияси v тезлигидан кичик, яъни $v < v_g$). Бу ҳолда кристаллнинг таркибий тузилиши (стехиометрияси), хусусий нуқтавий нуқсонлар зичлиги газсимон фазادا температура, парциал босимларга боғлиқ, аммо ўсиш кинетикаси ва кристаллографик йўналишига боғлиқ эмас.

б) юқорида айтилган мувозанат йўқ бўлган ҳол ($v > v_g$)

4. Материалларни ва улар асосида асбобларни ишлаб чиқариш жараёнларини автоматлаштириш ва узлуксиз олиб боришни ташкил қилиш шароитини барпо қилиш керак.

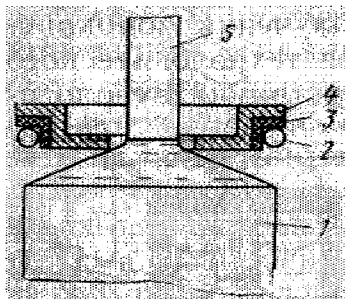
5. Материалдан тежамли фойдаланиш туфайли ва муайян шакл берилган кристалларнинг янги хоссалари намоён бўладиган қўлланиш соҳаларини аниқлаш лозим.

Бундай кристалларни қаттиқ фазалараро ўтишлар усули билан, суюлмалардан, суюқ эритмалардан ва газсимон фазадан ўстириш мумкин. Биринчи усул кам қўлланади.

Кристалларни пластина ёки игналар шаклида суюқ эритмалардан ва газсимон фазадан ўстирилиши мумкин. Аммо бу усулларнинг баъзи камчиликлари ҳам бор.

Газсимон ва суюқ фазадан монокристалл тагликда яримўтказгич пардаларни (юпқа қатламларни) эпитаксиал ўстириш керакли шаклли кристалл қатламларни олиш усули турли яримўтказгичли асбоблар ва интеграл схемалар тайёрлаш техникасида кенг қўлланилади.

Кристалларнинг керакли шаклини ҳосил қилиш қондаси куйидагича: ҳосил қилиш хоҳланган шакл ёки шакл элементи турли эффектлар эвазига суюқ фазда пайдо қилинади ва шаклланган суюқлик ҳажмини, муайян кристалланиш шароитини танлаган ҳолда, қаттиқ ҳолатга ўтказилади.



II.48-расм. Муайян шаклли кристалларни тагликдан ўстириш:

- 1-дастлабки модда; 2-индуктор;
- 3-изоляцияловчи қатлам; 4-электромагнетик энергия йиғувчи;
- 5-ўстирилаётган шаклли кристалл.

А.В. Степанов (1938 й) махсус шакллантивувчилар ёрдамида керакли шаклдаги кристалларни суюлмалардан ўстириб олиш усулини таклиф қилган. Уни юпқа ва узун таёқчалар ва тасмалар, шунингдек, турли шаклдаги монокристаллар, хусусан, йўғон монокристалларни ўстиришда қўллаш мумкин. Кремний ва баъзи $A^{III}B^V$ бирикмалар монокристалларини ўстиришда суюлмани ҳўлловчи шакллантивувчилар қўлланади. Кремнийнинг тасмасимон кристалларини ўсти-

ришда графитдан ёки кремний карбидидан тайёрланган шаклантирувчи ишлатилади.

Керакли шаклдаги кремний кристалларини тигелсиз усулда тагликдан ўстириш мумкин (П.48-расм). Кремний таглик цилиндрсимон бўлиб, у ичида юқори частотали энергияни графит йиғувчи жойлашган индуктор билан ўралган. Йиғувчи (концентратор) нинг тузилиши ўстирилувчи кристалл геометриясини аниқлайди. Кристалл шаклининг ҳосил бўлиши концентратордаги токнинг суюлмадаги индукцион ток билан ўзаро таъсири эвазига амалга оширилади. Бунда шакланган суюлма устунидан шаклли кристалл-ни контактсиз тортиб олиш мумкин.

Назорат саволлари

1. Кристаллар қаттиқ фазадан қандай ҳосил қилиниши мумкин?
2. Кристаллар суюқ фазадан қандай ҳосил қилиниши мумкин?
3. Кристаллар суюлмалардан қандай ҳосил қилинади?
4. Нормал йўналган кристалланиш усуллари тавсифланг.
5. Суюлмадан кристалларни тортиб олишнинг қандай усуллари бор?
6. Зонавий суюлтириш усулида кристаллар қандай ўстирилади?
7. Кристаллар эритмалардан қандай ўстирилади?
8. Кварц монокристаллари қандай ўстирилади?
9. Кристалларни газсимон фазадан ўстирса бўладими?
10. Керакли шаклдаги монокристаллар қандай усулда ўстирилади?

10-БОБ. ЯРИМЎТКАЗГИЧ МОНОКРИСТАЛЛАРНИ ЎСТИРИШ

Монокристалларни у ё бу усул билан олишдан аввал маълум тайёргарлик кўрилади. Бу босқичларда бир неча муҳим тадбирлар амалга оширилади.

Киришмаларни кристалл ўстириладиган суюлмага қаттиқ ҳолатда киритилади. Айрим ҳолларда эса киришмаларни суюлмага газсимон фазадан киритилади.

10.1. КИРИШМАЛАР ҲИСОБИ

Олдиндан тайин (талаб) қилинган хоссаларга эга бўлган монокристалл ўстириладиган суюлмага киритиладиган киришма ҳисоб қилинади. Бу ҳисоб қуйидаги маълумотларни ўз ичига олиши керак:

а) кристаллдаги киришманинг талаб қилинадиган зичлиги;

б) эффектив тақсимот (сегрегация) коэффиценти;

в) монокристаллда тайинли электрик хоссаларни олиш учун суюлмага киритиш керак бўлган киришманинг зичлиги ва массаси;

г) контейнердан суюлмага беихтиёр киришма ўтиб қолиши оқибатида ҳосил бўладиган заряд ташувчиларни компенсирловчи легирловчи киришманинг массаси;

д) буғланиш оқибатида киришма исрофини тўлатадиган учувчан легирловчи киришманинг массаси;

е) лигатура массаси.

Лигатуралар монокристаллар ёки поликристаллар шаклидаги кўп киришма киритилган (кучли легирланган) ва суюлмага киритиладиган яримўтказгичлардир. Умумий ҳолда монокристаллик лигатурадан кучсиз легирларган (кам киришмали), юқори омли яримўтказгич монокристалларини олиш учун, поликристаллик лигатурадан кучли легирланган, паст омли монокристаллар олиш учун фойдаланилади.

10.2. КОМПАНОВКА

Хом ашёни синтез ёки кристаллаш жараёнларига тайёрлаш босқичи **компановка** дейилади. У қуйидагиларни ўз ичига олади: хом ашёни майдалаш, тарозида тортиш, едириш, сўнг уни тайёрлаб қўйилган контейнерга жойлаш.

10.2.1. ДАСТЛАБКИ ХОМ АШЁНИ МАЙДАЛАШ

Жуда тоза яримўтказгичларни турли усулларда майдаланади. Поликристаллик кремнийни механик прессда парчаланади. Мўрт моддалар (Sb , B_2O_3) болға ёки қис-қич билан майдаланади. Юмшоқ металлларни молибден пичоқ билан кесилади.

Яримўтказгичли поликристаллар ва яроқсиз деб топилган монокристаллар махсус арра билан майда бўлакларга бўлинади.

Энг яхшиси, яримўтказгич кристалларнинг хом ашёсини механик прессда парчалашдир.

Галлий ва индий металлари фторопласт тигелда суюлтирилиши ва шу моддалардан ясалган қолипларга қўйилиши мумкин. Бунда металлни оксидлардан тозалаш амали ҳам бажарилади.

10.2.2. ОРАЛИҚ ТЕХНОЛОГИК БОСҚИЧЛАР

Бунда яримўтказгич монокристаллар сирти оксидланади ва ташқи муҳитдан қириндилар кириб қолади. Шунинг учун навбатдаги босқичда дастлабки яримўтказгичларни ва ишлаб чиқариш чиқиндилари ювилади ва кимёвий едирилади.

Яримўтказгичларни эритмаларда ювиш (ёғсизлантириш) уларнинг сиртидаги ёғлар, мойлар, елимланган материалларни бартараф қилиш мақсадида бажарилади.

Бу масалалар бўйича III қисмда анча батафсил тўхтаб ўтамиз.

10.2.3. КИМЁВИЙ ЕДИРИШ

У яримўтказгич сиртини оксидлаш ва кейин оксидни эритиб юборишдан иборат. Шунинг учун едирувчи оксидловчи, эритувчи ва бу жараёни тезлатгич ёки секинлатгичдан иборат бўлади.

Едириш амалидан кейин яримўтказгич сиртида едириш маҳсулотлари ва едирувчи излари қолиши мумкин. Уларни бартараф қилиш учун едирилган моддани сувда (олдин дистилланган, кейин ионсизланган сувда) ювилади.

Ювилган маҳсулотни икки босқичда қуригилади:

1) 100°С да тоза ҳаво оқимида термостатда (қуритиш шкафида) қуригиш ёки спиртда чайқаш йўли билан ҳавода қуригиш,

2) вакуумда, 300–400°С дан ошмаган температураларда (яримўтказгич бирикмалар парчаланмайдиган температураларда) қуригиш.

10.2.4. БИРИКМАЛАР СИНТЕЗИ ҲИСОБИ

Масалан, $A^{III}B^V$ яримўтказгич бирикмаларда B^V таркибловчининг стехиометрик миқдори ушбу

$$M_{B^V}^{CT} = A_{B^V} M_{A^{III}B^V} / A_{A^{III}B^V} \quad (II.54)$$

ифода бўйича аниқланади. Бунда $M_{B^V}^{CT}$ ва $M_{A^{III}B^V}$ — B^V таркибловчининг ва синтезланувчи $A^{III}B^V$ бирикманинг массалари, A_{B^V} ва $A_{A^{III}B^V}$ — B^V таркибловчининг ва $A^{III}B^V$ нинг атом ва молекуляр массалари. Агар B^V таркибловчи учувчан (фосфор ёки арсений) бўлса, унинг массасини $M_{B^V}^{\delta}$ қадар кўпроқ олинади. Реакторнинг эркин (бўш) ҳажмини тўлатиш учун

$$M_{B^V}^{\tau \text{ўл}} = P V A_{B^V}^{\delta} / [0,082(273 + t)] \quad (II.55)$$

яна B^V — таркибловчи массаси (г) керак. Бунда P — унинг реактордаги босими, атм; V — реактор ҳажми, л; t — реактор деворлари ўртача температураси, °С; $A_{B^V}^{\delta}$ — B^V нинг атом массаси, г.

Демак, B^V — таркибловчининг массаси

$$M_{B^V}^{\tau \text{ўл}} = P V A_{B^V}^{\delta} / [0,082(273 + t)] \quad (II.56)$$

бўлиши керак.

A^{III} таркибловчининг массаси:

$$M_{A^{\text{III}}} = M_{A^{\text{III}}B^v} - M_{B^v}. \quad (\text{II.57})$$

10.2.5. ТОВАР МОНОКРИСТАЛЛАРИНИ ЎСТИРИШ КОМПАНОВКАСИ

Бу иш хом ашёнинг ҳисобланган миқдорини тортиш, уни едириш, қуритиш ва тигелга жойлашдан иборат. Кейин тигелга легирловчи моддалар бўлаги жойланади, унинг устига едирилган хамиртуруш қўйилади. Бунинг ҳаммасини полиэтилен пакетга тахланади ва монокристалл ўстириладиган жойга жўнатилади. Ўстирилган монокристалл қўймасидан ўлчамлари (диаметри ва узунлиги) бўйича техник талабларни қаноатлантирадиган қисми кесиб олинади.

Электрофизик параметрлари ўлчанган монокристалл-нинг харидорбоп қисми кесиб олиниб, теқширилиб, тайёр (товар) маҳсулот омборига жўнатилади. Монокристаллнинг қолган қисмлари (қийқимлари), тигелда суюлманинг кристалланиб қолган қолдиқлари (қайтмалар дейилади) яна дастлаб-ки хом ашё сифатида ишлатилади.

Тайинли электрофизик хоссали монокристаллар олиш учун компановкада фақат маълум параметрли хом ашёдан фойдаланиш зарур.

10.3. КИРИШМАЛАР ТЕКИС ТАҚСИМЛАНГАН МОНОКРИСТАЛЛАР ОЛИШ

10.3.1. БИР ТЕКИС ТАҚСИМЛАНИШНИ (БИР ЖИНСЛИКНИ) БАҲОЛАШ

Бир жинслик тушунчаси нисбийдир. Уни баҳолаш учун тўғри (бевосита) ва билвосита усуллар қўлланади.

Тўғри (бевосита) усулларга кимёвий, спектрал, масса-спектрал, рентгеноспектрал, активацион усуллар мансуб. Билвосита усулларга физик (солиштирма қаршилиқни, Холл доимийсини, термоэюк, оптик ўтказишни ўлчаш ва б.) усуллар, тузилишни тадқиқлаш (рентгенография, электронография ва б.) усуллари, металлографик (танловчан, ано-

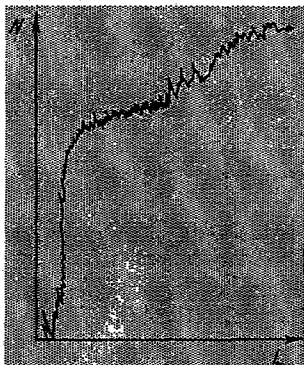
дий, кимёвий ва термик едириш, электролитик ўтқазиш ва б.) усуллари киради.

Яримўтказгичларда бир жинсликни баҳолаш учун электрик хоссаларни (масалан, солиштирма қаршиликни) ўлчаш усуллари кенг қўлланади.

Ўлчанадиган параметрнинг бир жинсмаслиги ўлчови унинг қийматлари сочилишини % ларда ифодалайдиган

$$\Delta = \pm [(Y_{\text{макс}} - Y_{\text{мин}}) / (Y_{\text{макс}} + Y_{\text{мин}})] \cdot 100\% \quad (\text{II.58})$$

катталиқ орқали ифодаланади.



II.49-расм. Зонавий суюлтириш усулида ўстирилган кристаллнинг L узунлиги бўйлаб киришманинг N зичлигининг ҳақиқий тақсимоти.

Кристаллнинг узунлиги ва қўндаланг кесими бўйича бир жинсмасликлар сабаблари ҳар хил. Улар икки гуруҳни ташкил этади. Биринчи гуруҳга йўналган кристалланиш жараёнларида киришмаларнинг қонуний бир жинсмас тақсимланиши билан боғлиқ заминий (асосий) сабаблар киради. Иккинчи гуруҳга технологик сабаблар киради.

Ҳақиқий ҳолларда киришмалар тақсимоти одатда II.49-расмдагидек бўлади, заминий сабаблар тақозо қилган асосий эгри чизик устига технологик сабаблардан келиб чиққан тақсимот тебранишлари қўшилади.

Бундай нобиржинсликларни **маҳаллий (локал)** дейилади. Биринчи гуруҳ нобиржинсликлари қиймати иккинчи гуруҳникидан анча катта.

10.3.2. УЗУНЛИК БЎЙИЧА КИРИШМАЛАР БИР ТЕКИС (БИР ЖИНС) ТАҚСИМЛАНГАН МОНОКРИСТАЛЛАРНИ ЎСТИРИШ УСУЛЛАРИ

Киришмалар узунлик бўйича бир текис (бир жинс) тақсимланиши даражаси олдиндан тайинланган монокрис-

таллар кристалланиш жараёнига қанақадир ўзаришлар киритмасдан, пассив йўл билан ва шунингдек, **актив (фаол)** йўл билан олиниши мумкин. Биринчи ҳолда, оддий усул билан суюлмадан ўстирилган монокристаллнинг тақрибан бир жинсли қисмидан фойдаланилади.

а) **кристаллнинг тақрибан бир жинсли қисми** унинг учларидан бирига туташган бўлади. Маҳсулотнинг назарий миқдори ($G\Delta\%$) назоратланадиган параметрнинг Δ сочилиши орқали

$$G_{\Delta} = [1 - (1 - \Delta)^{1/k-1}] \cdot 100 \quad (\text{II.59})$$

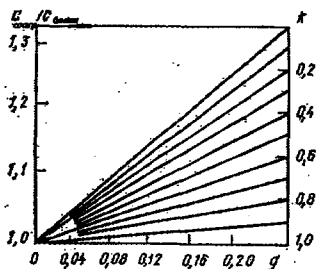
ифода бўйича аниқланади. «+» белги $k < 1$, «-» белги $k > 1$ ҳолларга тўғри келади.

Учмовчан киришма кристалл узунлиги бўйича тайинли тақрибан бир жинс тақсимланган монокристалл кўринишида қотган суюлманинг g улуши II.50-расмдаги номо-грамма ёрдамида ҳисобланади. Номограмма эса

$$C = C_0(1 - g)^{k-1} \quad (\text{II.60})$$

тенглама асосида ясалган.

М и с о л. Кристалл кўринишида (фосфор киришма киритиб) қотган германий суюлмасининг g улушини топиш керак (жараён шароити: $k=0,2$; $\Delta=\pm 10\%$, $\Delta_{\Delta x} - \Delta_{\Delta y} = 20\%$, C_0 хир/ $C_{\text{боши}} = 1,20$).



II.50-расм. Чохральский ёки

Брижмен усулида суюлмадан ўстирилган кристаллнинг таркиби бир жинс қисмини аниқлаш учун номограмма (g -мазкур кристалл қисмини ҳосил қилувчи суюлма улуши, k -тақсимот коэффициенти).

Чапки ординатада 1,2 нисбий концентрациянинг қиймати 1,2 бўлган нуқтани топиб, абсциссалар ўқиға параллел чизиқ ўтказамиз, у $k=0,2$ график билан кесишади. Кесишиш нуқтасидан абсциссаға перпендикуляр туширамиз ва унда $g=0,2$ қийматни оламиз.

б) актив усуллар икки асосий гуруҳға бўлинади. Биринчи гуруҳға кристалланиш жараёнини программалаштиришға асосланган усуллар киради. Кристалланиш жараёнини программалаштириш учмовчан ёки султ

учувчан киришмаларга нисбатан қўлланади, кристалланиш тезлиги, кристалл ва тигелни айлантириш тезлигини ва ҳ.к. муайян қонуният бўйича ўзгартириш шароитида кечади. Бунинг оқибати-к эффектив тақсимот (сегрегация) коэффициентининг қонуний ўзгариши бўлиб, у $СК=const$ кўпайти-мани сақлаш учун зарур.

Кристалланиш жараёнини программалаштиришдан фойдаланувчи усуллар **афзаллиги** уларни Чохральский, Брижмен ёки зонавий суюлтиришдек оддий усулларда яримўтказгичлар монокристалларини ўстириш учун қўлланадиган стандарт аппаратураларда амалга ошириш мумкинлигидир.

Бу усуллар **камчилиги** — олинадиган монокристаллар тузилишининг унча мукаммал бўлмаслиги бўлиб, бунинг сабаби кристалл ўсиши суюлмадан кристалланиш тезлиги, унинг ҳажми ва аралаштириб туриш мароми узлуксиз равишда ўзгариб туриши шароитида кечади. Аммо бу усуллар учмовчан киришмалар билан легирланган кристалларни ўстиришда энг самарали бўлиши мумкин.

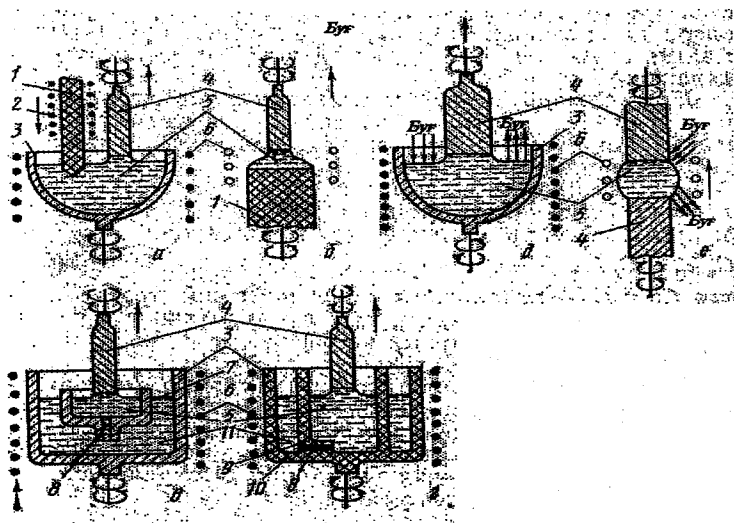
Кристалланаётган **суюлмани озиқлантириш**—суюлмага унинг асосий таркибловчисини тоза ёки легирланган кўринишда қонуний киритишдан, ёинки легирловчи киришмани унга киритиш ёки ундан чиқариб юборишдан иборат. Ҳар қандай озиқлантириш амалининг натижавий мақсади суюлмада легирловчи киришма зичлигини ўзгармас тутиб туришдир, яъни $C=const$ ни сақлашдир.

Озиқлантиришнинг бир неча усуллари бор. Киришма зичлигини ошириш учун кристалланувчи суюлмага озиқа ёки элемент, ёки унинг бирикмаси буғлари кўринишида (II.51, д,е-расм), ё асосий таркибловчидаги киришма эритмаси қаттиқ (II.51, а,б-расм), ёинки суёқ (II.51, в,г-расм) кўринишда киритилади.

Киришма зичлигини камайтириш учун озиқани буғлантириш йўли билан чиқариб юборилади (II.51, д,е-расм). Шу мақсадда кристалланувчи суюлмага тоза асосий таркибловчидан қаттиқ ёки суёқ ҳолатда қўшимча қилинади (II.51, а,г-расм).

Озиқлантириш амали қўлланиб олинган кристаллар тузилиши юқори даражада мукаммал бўлади.

Узунлиги бўйича бир текис легирланган кристаллар ўстириш усуллариининг (уларга озиқлантириш ҳам киради) асосий камчиликларидан бири — аппаратуранинг муҳим дара-



II.51-расм. Узунлиги бўйича бирдай легирланган кристалларни ўстиришда кристалланувчи суюлмани қаттиқ (а, б), суюқ (в, г) ва буг (газ) (д, е) фазалардан озиклантиришдан фойдаланадиган асосий усуллар: 1-озиклантирувчи кристалл (таглик); 2-қўшимча иситтич; 3-тигел; 4-ўстириляётган кристалл; 5-кристалланувчи (ишчи) суюлма; 6-асосий юқори частотали ёки резистив иситгич;

7-сузувчи тигел; 8-капилляр канал; 9-қўш тигелнинг ишчи қисми; 10, 11-озиклантирувчи суюлма.

жада мураккаблашишидир. Уларнинг фазилатлари ҳақида бир неча марта тўхталиб ўтдик. Бу фазилатлар фақат катта қўламли ишлаб чиқаришда тўла намоён бўлади.

Кўрилган усуллардан бошқа яна икки асосий гуруҳни бирлаштириб фойдаланадиган қўшма усуллар ҳам мавжуд. Бундай усуллар учувчан киришма билан легирланган ($\alpha > 0$) суюлмаларни кристаллашда содда равишда қўлланилади (Чохральский усулига дахлдор). Учмовчан киришмалар учун қўшма усул бошқа баъзи усуллар билан кристалл ўстириш ҳолларида қўлланиши мумкин.

Озиклантириш ва кристалланиш жараёнини дастурлаш усуллари орқали бириктириш эффектив тақсимот k коэф-

фициенти кичик бўлган киришмалар билан легирланган бир жинс монокристаллар олишда айниқса яроқлидир.

Кристаллаш жараёнини программалаш ҳисоби кристалланиш ва кристалл айланиши тезликлари ўзгаришининг кристаллни ўстириш вақтига, бинобарин, кристалл узунлигига боғланишини аниқлашдан иборат.

Бундай программалар графиклар—номограммалар кўринишида тасвирланиши қулай (II.52-расм).

Маълумки, доимий диаметрли кристаллни ўстиришдан олдин унинг конуссимон қисми ўстирилади. Шунинг учун конуссимон қисм ҳосил бўлиши учун суюлмага қўшимча микдорда модда киритиш зарур.

Кристалланувчи суюлмани озуқага тўйинтириш кристалланиш жараёни пайтида амалга оширилади.

Узунлиги бўйича учувчан киришма билан бир текис легирланган кристалл ўстиришнинг умумий шартлари

$$K = k + \frac{\alpha F}{f \cdot S} = \frac{C_{кр}}{C_{ст}} (1 - A) + \frac{C_0 \alpha F}{C_{ст} f S} + A \quad (II.61)$$

тенглама орқали ифодаланади, бунда, $C_{ст}$ ва C_0 — суюлмадаги киришманинг стационар ва мувозанатий зичликлари, атом/см³; $C_{кр}$ — қаттиқ ёки суюқ озиклантирувчи моддада киришма зичлиги, атом/см³; A — озиклантириш параметри; қолган белгилар олдин ишлатилган.

Озиклантириш параметри A кристалланиш жараёнида кристалланувчи (ишчи) суюлма ҳажмининг ўзгаришига олиб келади:

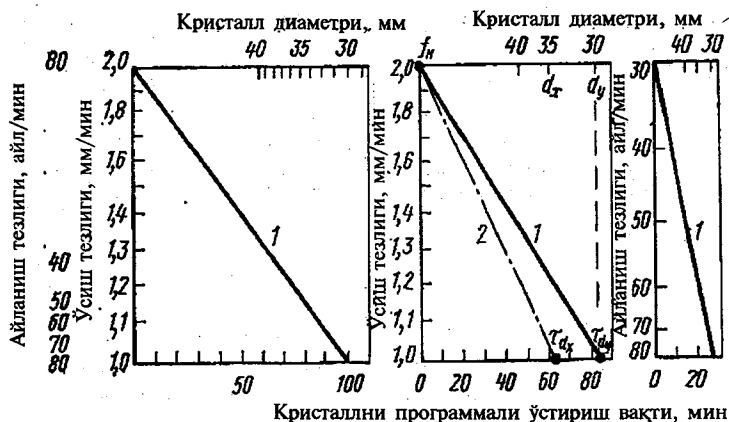
$$A = g V_c / V_{кр} = (V_{кр} - V_{оз}) / V_{кр} \quad (II.62)$$

бунда, V_c — ишчи суюлманинг, $V_{оз}$ — озиклантирувчи модданинг, $V_{кр}$ — ўстирилаётган кристаллнинг ҳажмлари, кристалланган суюлмани.

Суюлма ҳажми ўзгармас бўлган йўналган кристалланиш усуллари учун $V_c = const$, бинобарин, $V_{кр} = V_{оз}$, бундан: $A = 0$ бўлиши келиб чиқади.

Чохральский ва Брижмен усулларида озиклантириш йўқ. Шунинг учун $V_{оз} = 0$, суюлма массаси ўсган кристалл масса-сига тенг, яъни $g V_c = V_{кр}$ ёки $A = 1$.

Йўналган кристалланиш бошқа усуллари учун $V_{оз} < V_{кр}$, яъни бу ҳолларда $0 < A < 1$ бўлади.



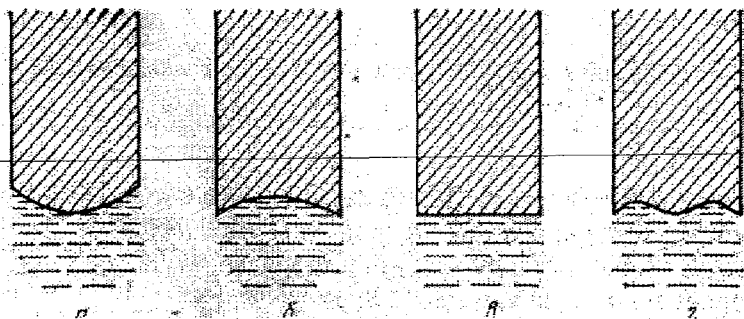
II.52-расм. Бирдай легирланган монокристаллар ўстириш программасини тузишда фойдаланиладиган номограммалар.

10.3.3. КўНДАЛАНГ КЕСИМИ БЎЙИЧА КИРИШМА БИР ТЕКИС (БИР ЖИНС) ТАҚСИМЛАНГАН МОНОКРИСТАЛЛАРНИ ЎСТИРИШ УСУЛЛАРИ

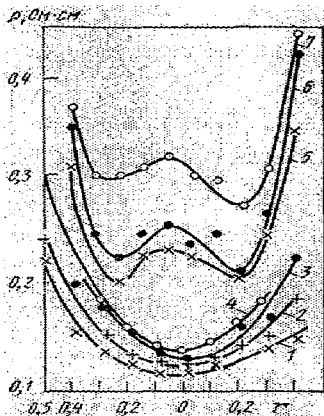
Кристалларни ўстиришда киритилган киришмалар кўндаланг кесим бўйича нотекис тақсимланган бўлиши мумкин. Бунинг ҳақиқий сабаби кристалланиш фронтига тегиб турган суюлмада суюқлик оқимларининг нотекис тақсимланишидир. Оқибатда кристалланиш фронти сиртидаги диффузион қатлам қалинлиги унинг турли нуқталарида ҳар хил, бу эса кристалл кесими бўйича киришма тақсимотини нотекис қилади (II.53-расм).

Кристалланувчи суюлма ҳажми етарлича катта бўлганда ва кристалл ҳамда суюлмали тигел айлантирилмаганда суюлмада (тигелнинг қизиган деворидан суюлманинг совуқроқ марказий қисмига йўналган) конвекцион суюқлик оқимлари вужудга келади, диффузион қатлам марказда қалинроқ, четда эса юпқароқ бўлади, марказда киришма миқдорини оширади. Солиштирма қаршилиқ кўндаланг кесим бўйича ҳамма жойда бир хил бўлмайди (II.54-расм).

Агар тигел айлантириб турилса, марказдан қочирма кучлар суюлмани тигел деворига томон суради, бу эса иссиқлик



П.53-расм. Чохральский (а-б) ва тигелсиз зонавий суюлтириш (2) усулларида кристалланиш фронти шакли; а-суюлма томонга қавариқ; б-кристалл томонга ботиқ; в-текис (ясси); г-S-симон.



П.54-расм. Алюминий киришмаси киритилган кремний монокристалларнинг кўндаланг кесими бўйича солиш-тирма электрик қаршилик тақсимо-ти: 1-7 монокристаллар рақами; г-монокристалл марказидан саналган масофа.

(конвекцион) оқим билан бир хил йўналган оқим ҳосил қилади. Оқибатда кесим бўйича киришма тақсимо-ти янада нотекис бўлиб қолади.

Агар кристалл айлан-тириб турилса, суюлмада суюқликнинг вертикал оқимлари ҳосил бўлади. Бу оқимлар иссиқлик кон-векцион оқимларга теска-ри йўналган. Бу эса диф-фузион қатлам қалинли-ги нотекислигини, бино-барин, кристаллнинг кўндаланг кесими бўйича киришмалар тақсимо-ти нотекисли-гини камайти-ради.

Тигел ва кристалл бир вақтда айлантириб турилса, суюл-мада суюқликнинг мураккаб оқимлари вужудга келади. Но-биржинсликни камайтириш учун кристаллни катта тезлик билан, тигелни кичик тезлик билан айлантирмоқ зарур.

Монокристаллнинг кўндаланг кесими бўйича киришманинг нотекис тақсимланиши **канал нобиржинслик** деб аталадиган ҳажмий нобиржинсликни пайдо қилади. Бундай нобиржинслик яримўтказгичларда кўп учрайди. У одатда кучли легирланган кристалларда вужудга келади. Устун ёки най шаклидаги канал соҳасида киришма зичлиги кристаллнинг бошқа қисмидагидан бир неча марта ортиқ бўлади.

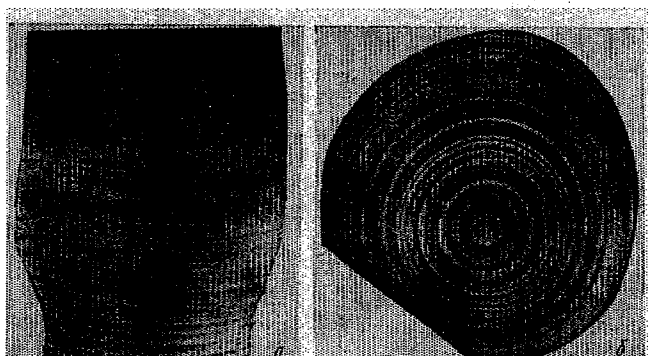
Канал нобиржинслигига турли ёқлар бўйича ўсиш механизми ва тезликлари турлича бўлиши (**ёқлар эффекти**) асосий ҳисса қўшади.

Кристаллда дислокациялар миқдори камайса, канал бир жинсизлиги ҳосил бўлиши имкони ортади.

Канал нобиржинслиги ҳосил бўлишига йўл қўймасликнинг **асосий чоралари**: кристаллни $\langle 111 \rangle$ йўналишдан анча четланган кристаллографик йўналишларда ўстириш; текис ёки озгина эгилган кристалланиш фронти бўлиши учун су-юлмани яхшилаб аралаштириб туриш керак.

Канал нобиржинслигига ўхшаш макронобиржинсликлардан бошқа яна микронобиржинсликлар ҳам учрайди. Улардан энг кўп тарқалгани даврий, қатламдор нобиржинсликдир.

Кристаллнинг бўйлама кесимида даврий нобиржинслик кристалланиш фронтига параллел тасмалар кўринишида (II.55, а-расм), кўндаланг кесимида эса ҳалқалар, спираллар ёки бошқа ҳалқасимон шаклларда (II.55, б-расм) учрайди. Ўсиш

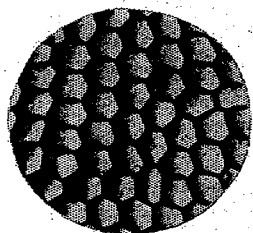


II.55-расм. Чохральский усулида ўстирилган галлий арсениди монокристаллари бўйлама (а) ва кўндаланг (б) кесимларида киришма тақсимотининг қатламдор бир жинс эмаслиги.

қалин тасмалари оралиғи 50-150 мкм. Улар орасида бир-бири-
дан 3-50 мкм масофада ўсиш юпқа тасмачалари жойлашган.
Юпқа тасмачалар вужудга келиши сабаби суюлмадан кри-
сталл ўсиши тезлигининг даврий ўзгариб туришидир. Қалин
ўсиш тасмаларини ҳосил қилиниши сабаблари суюлмада тем-
пературанинг даврий ўзгаришидир. Бу ўзгариш кристалланиш
фронти вазиятини тебрантиради. У суюлма томонга силжиб,
кристаллга киришмага бойиган диффузион қатламни жалб
қилади, оқибатда киришма тақсимоги қатламдор нобиржинс-
лиги вужудга келади.

Яна бирмунча технологик сабаблар ҳам нобиржинслик-
лар келтириб чиқаради. Бундай канал нобиржинсликларни
энг кам қилиш чоралари ҳам ишлаб чиқилган.

Яримўтказгичларнинг кучли легирланган монокристал-
ларида вужудга келадиган маҳаллий нобиржинсликларнинг
яна бир кўриниши—киришмавий субтузилишлар катак-ка-



II.56-расм. Равшан катаксимон
тузилишли кристалланиш
фрон-

ти сиртининг ташқи кўрини-
ши (қалай-кўрғошин тизими).

так субтузилишлар ва иккинчи
фаза қириндилари кўринишида
намоён бўлади. Иккала ҳолда ҳам
уларнинг вужудга келиш сабаби
кристалланиш фронти силлиқли-
ги бузилиши ва унинг катакси-
мон бўлиб қолишидир.

Кристалланиш фронтида олти
ёқли призмалар кўринишидаги
катаклар пайдо бўлади (II.56-
расм). Кўп сонли бундай катак-
лар катаксимон кристалланиш
фронтини ҳосил қилади.

Катаксимон субтузилишлар
катаклар гардиши бўйлаб ки-
ришманинг уюлиши натижасида вужудга келади. Бу ҳажм
бўйича нотекис тақсимогни келтириб чиқаради.

Иккинчи фаза қириндилари яримўтказгичларни $k < 1$
бўлган киришма билан кучли легирлаганда вужудга келади.
Уларга кремнийдаги алюминий, сурма, $A^{III}B^V$ бирикмалар-
даги теллур ва рух мансуб.

$A^{III}B^V$ бирикмаларда киришмавий субтузилишлар ву-
жудга келиши сабаби стехиометрик таркибдан четланиш-
дир. У кристалланиш фронти силлиқлигини бузади. Де-

мак, стехиометрик таркиби сақланса, мазкур нуқсонлар пайдо бўлмайди.

10.4. МУКАММАЛ ТУЗИЛИШЛИ МОНОКРИСТАЛЛАР ЎСТИРИШ

Яримўтказгичлар поликристаллик қуймаларида айрим доналар орасида фазавий чегаралар бўлиши ва уларнинг икки томонида турли кристаллографик йўналишли яримўтказгич ҳажмлари мавжудлиги, шунингдек, чегаралар бўйлаб кичирималар йиғилиб қолиши туфайли поликристаллар кўпчилик яримўтказгичли асбоблар тайёрлашга ярамайди. Тузилиш нуқсонлари монокристаллдан тайёрланган асбоблар параметрларини ёмонлаштиради. Шунинг учун, яримўтказгич моддалар ишлаб чиқаришнинг энг муҳим масаласи мукамал монокристаллар ўстиришдир. Улар муайян кристаллографик йўналганликли бўлиши, уларда дислокациялар энг кам бўлиши ёки ҳажм бўйича муайян равишда ва текис тақсимланган бўлиши, кичик бурчакли чегаралар, эгизаклар ва бошқалар бўлмаслиги керак.

9-бобда монокристалларни қаттиқ, суюқ ва фазадан ўстириш усулларини умумий тарзда кўрдик. Энди кўп қўлланиладиган айрим усулларни алоҳида қараб чиқамиз.

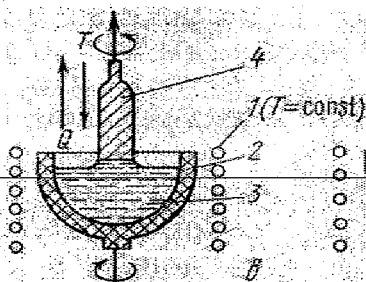
10.4.1. ЧОХРАЛЬСКИЙ УСУЛИДА МОНОКРИСТАЛЛАР ЎСТИРИШ

Бу усулнинг схемалари II.57-расмда тасвирланган. Бу усул кремний, германий, парчаланадиган ва парчаланмайдиган $A^{III}B^V$ типдаги ва бошқа яримўтказгичлар монокристалларини ўстиришда энг кўп қўлланиладиган усулдир. Технологик жиҳатдан у жуда қулай—тигел ёки иситиш тизими тузилишини ўзгартириб, мукамал тузилишли монокристаллар олиш имкониятларига эгадир.

Чохральский усули билан монокристаллар ўстириш жараёни қуйидаги босқичлардан иборат:

1) монокристалл хамиртуруш учини суюлма билан ўраш—хамиртурушлаш ва унда суюлманинг биринчи улушларини кристаллаш;

2) диаметрغا чиқиш — хамиртурушда ўстирилган бўйин ўлча-мидан то керакли диаметрغا монокристаллни ўстириб бориш;



II.57-расм. Чохральский усулида яримўтказгичларни тозалаш ва уларнинг монокристалларини ўстириш чизмаси: 1-иситгич; 2-контейнер (тигел, қайиқча); 3-кристалланидиган суюлма; 4-суюлманинг кристалланган қисми; Q -иссиқлик кетказиш йўналиши стрелка билан кўрсатилган.

3) доимий диаметрли монокристалл цилиндрик қисмининг ўсиши;

4) тескари конус деб аталган кристалл учининг ҳосил бўлиши ва монокристаллнинг суюлмадан узилиши;

5) ўстирилган кристаллни совитиш.

1) хамиртурушлаш. Хамиртурушда, имкони борича, дислокациялар миқдори кам бўлгани маъқул. Хамиртуруш сиртидаги бузилишларни механик ва кимёвий ишлов бериб бартараф қилинади.

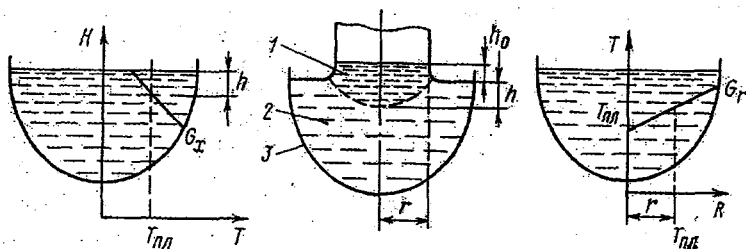
Суюлмага хамиртуруш учи туширилгандан ва уни суюлма билан ўралгандан кейин бўйинни ўстириш амалига ки-

ришилади. Бўйиннинг узунлиги унинг бир неча диаметри чамасида бўлиши керак. Бўйин катта чизиқли тезликда ўстирилади. Хамиртурушдан бўйинга ўсиб кирган дислокациялар вакансиялар билан таъсирлашиш оқибатида қисман ёки тамомила сиқиб чиқарилади.

2) диаметрга чиқиш. Бунда дислокациялар зичлиги ортиб кетмаслиги учун асосий шарт термик кучланишларни камайтирувчи ҳар тарафга ўсиш бурчаги кичик бўлиши керак. Масалан, кремний монокристаллининг ҳар тарафга ўсиш бурчаги 60° С бўлганда унда дислокациялар зичлиги 10^5 см^{-2} , бу бурчак 10° С бўлганда дислокация зичлиги 10^3 см^{-2} бўлади.

3) монокристалл цилиндрик қисмининг ўсиши. Доимий диаметрли монокристалл ўсиши босқичида монокристаллни шакллантиришда жараённинг иссиқлик шароити етакчи рол ўйнайди. Улар кристалл ва суюлмадаги ўқ бўйлаб ва радиус бўйлаб температура градиентларини пайдо қилади. Буларга эса кристалланиш фронти шакли ва монокристаллдаги термик кучланишлар, шунингдек, кристалланиш фронти яқинида суюлманинг ўта совиган соҳаси ўлчамларига боғлиқ бўлади.

Суюлмада температура тигел деворидан унинг маркази томонга, тигелнинг тубидан суюлма сирти томонга камайиб боради. Оқибатда ўқ бўйлаб G_x ва радиус бўйлаб G_r темпера-



II.58-расм. Ташқаридан унга иссиқлик келтириб туриладиги тигелдаги суюқликда ўта совиган соҳанинг вужудга келиш чизмаси: 1-суюлманинг ўта совиган соҳаси; 2-унинг асосий ҳажми; 3-тигел; H-суюлма баландлиги координатаси; R-тигелдаги суюлма радиуси координатаси; T-температура; r ва h-мос равишда, суюлмадаги ўта совиган соҳанинг радиуси ва чуқурлиги; h_0 -суюлма устуни баландлиги.

тура градиентлари вужудга келади. Уларнинг T_c суюлиш температураси изотермаси билан кесишиши суюлманинг ўта совиган соҳасини ҳосил қилади (II.58, 1-расм).

Суюлманинг ўта совиган соҳаси диаметри суюлма устуни диаметрини аниқлайди. Суюлма устуни баландлиги суюлманинг сиртий таранглик коэффициентига тўғри пропорционал, унинг зичлигига, ўстириляётган кристалл радиусига тескари пропорционал бўлиб, эдатда у 3-5 мм ни ташкил этади.

4) ўсаётган монокристалл диаметри биринчи навбатда суюлмадаги температура градиентларига боғлиқ.

Иситгичнинг температураси ошганда ўта совиган соҳа ўлчами кичраяди. Унда ва устунда температура ортиб кристалланиш фронти кўтарилади, устун баландлиги ошади, оқибатда монокристалл диаметри камаяди.

Иситгич температураси пасайиши ёки кристалланиш тезлиги камайиши, аксинча, суюлмадаги ўта совиган соҳа ўлчамини оширади, устун баландлигини камайтиради ва уни қарши томонга эгилишга олиб келади. Монокристалл диаметри ортади.

Суюлмадаги температура градиентлари кристалл ва тигел айланишлари нисбий тезлигига ҳам боғлиқ. Кристалл-нинг айланиши нисбий тезлиги ошганда ўта совиган соҳа ўлчами камаяди, унинг температураси ошади, кристалл остидаги суюлма устунни кўтарилади, монокристалл диаметри камаяди. Аксинча, кристаллнинг айланиши нисбий тезлиги камайганда монокристалл диаметри ортади.

Суюлма устунни баландлиги кристалланиш жараёнида иссиқлик тенглиги (баланси) бузилишига ҳам сезгир бўлади.

5) монокристаллнинг узунлиги бўйича ва кўндаланг кесими бўйича температуранинг нотекис тақсимланганлиги натижасида унинг совитилиши ҳам нотекис боради. Бунинг оқибатида кристаллда термик кучланишлар вужудга келади. Улар дислокациялар ҳосил бўлиши критик кучланишидан ортганда монокристаллда дислокациялар пайдо бўлади. Мазкур критик кучланиш (суюлиш температурасида), масалан, кремний учун 130, германий учун 15, галлий арсениди учун 7 ге/мм^2 температура пасайганда у ортиб боради: 930°C да кремний учун — 220 , 830°C да— 330 , германий учун, мос равишда 40 ва 88 ге/мм^2 .

Баъзи киришмалар дислокациялар ҳосил бўлиши критик кучланишини кескин ошириб юборади (масалан, германийдаги фосфор). $A^{III}B^V$ бирикмаларнинг баъзиларида олтингурт (S), теллур (Te), рух (Zn) шундай таъсир қилади.

Юқорида келтирилган маълумотдан кўринадики, кремний 150 мм дан ортиқ диаметрли дислокациясиз монокристалларини осон ўстириладиган ягона яримўтказгичдир. Германийда критик кучланиш 4 марта кичик, унинг ҳатто 30 – 40 мм диаметрли дислокациясиз монокристалларини ўстириш қийин масаладир.

Монокристалл ўстириш жараёнида хамиртурушни кўтариш тезлиги, унинг ва тигелнинг айланиш сони ўзгариши кристалланиш fronti шаклига, дислокациялар зичлигига ҳам таъсир қилади.

Термик кучланишлар ўстирилаётган монокристалл марказида ва четларида кучланишлар йўқ соҳа бор. Шунга мувофиқ монокристалл кесими бўйича дислокациялар тақсимоти нотекис бўлади.

Дислокациялар тақсимотига монокристалл ҳажмида киришмаларнинг нотекис тақсимланиши ҳам таъсир қилади.

Кучланишлар ва температура градиентлари таъсирида дислокациялар ўз сирпаниш текислигида кўчади.

Олмос ва сфалерит панжараларида бундай текисликлар {111} текисликлардир. Монокристалл ўсиши йўналиши билан {111} текисликлар орасидаги бурчак қанча катта бўлса, монокристаллдан дислокацияларнинг тўла ва тез чиқиб кетиши эҳтимоли шунча катта бўлади.

Шундай қилиб, дислокациялар зичлигини камайтириш учун энг маъқул ўсиш йўналишлари [111] (унинг атрофида $19^{\circ}28'$ бурчак остида 6 та {111} текислик бор) ва [100]дир (унинг атрофида $35^{\circ}16'$ бурчак остида 4 та {111} текислик бор).

Агар суолманинг кристалланиш тезлиги дислокациялар ҳаракати тезлигидан анча катта бўлса, улар сирпаниш текисликларида юлдузсимон шаклларда тўпланиши мумкин. Дислокациялар тўпланадиган алоҳида жойлар кичик бурчакли чегаралардир.

Монокристалларда кичик бурчакли чегаралар ҳам кристалланиш жараёнида, ҳам қаттиқ ҳолатда ҳосил бўлиши мумкин. [111] йўналишда ўстирилган монокристалл кесимида бундай чегаралар ўсиш йўналишига параллел учта {110} текисликда кўпроқ жойлашади.

Дислокациясиз монокристалларнинг ташқи кўриниши дислокациялиларидан фарқ қилади. Кремний монокристалларида бу фарқ, айниқса, сезиларли: ён сиртдаги винтсимон ажинлар (тиришлар) дислокациясиз монокристалларда йирикрок, текис ёқлар, бўртма қирралар ва нотўғри шаклли чизиклар бўлади.

Яримўтказгичларда кўп учрайдиган тузилиш нуқсонларидан бири эгизаклар ҳақида олдин айтган эдик. Эгизак ўсётган кристалл йўналганлигини ўзгартириши мумкин.

«Тескари конус» ҳосил қилиш. Ўстирилган монокристаллни суолмадан ажратиб (узиб) олишдан олдин унинг диаметрини силлиқ равишда камайтирилади—тескари конус ҳосил қилинади. Бунинг зарурати шуки, тигелдаги суолма сиртидан монокристалл кесими тўла юзини ажратганда, дислокацияларни кўпайтириб юборадиган иссиқлик таъсирининг олдини олиш керак.

Ўстирилган монокристаллни совитиш. Ўстирилган монокристаллни, катта термик кучланишлар пайдо бўлмаслиги учун, секин совитилади. Бунинг учун суолмадан ажратилган-

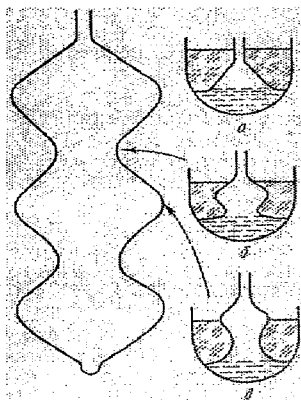
дан сўнг монокристаллни суюлмадан озгина баланд кўтарилади, бундан кейин қизиган тигелнинг температураси секин пасайтирилади. Бу монокристалл охирида дислокациялар зичлигини бошланиш қисмига нисбатан камайтиради. Кескин совитиш эса тескари натижага олиб келади.

10.4.2. СУЮҚЛИК ГЕРМЕТИЗАЦИЯ УСУЛИ

Бу усул оддий Чохральский усулининг энг кўп тарқалган кўринишларидан биридир. Уни парчаланувчи яримўтказгич бирикмалар монокристалларини ўстиришда қўлланилади. Бу усулда суюлмани жипс ёпадиган суюқлик қатлами билан қопланади, унинг устида эса инерт газ босими ҳосил қилиниб, бу босим бирикманинг суюлиш нуқтасида учувчан таркибловчи буғининг мувозанатий босимидан 1,5-2,0 марта юқори бўлиши керак. У арсенидлар учун 1,5-2,0 атм, индий ёки галлий фосфиди учун 60-80 атм бўлади. Жипс ёпувчи суюқлик (қопловчи флюс) сифатида шишасимон хоссали B_2O_3 бор ангидриди ишлатилади. Суюлган ҳолатда B_2O_3 жуда кам фаол. Аммо қаттиқ ҳолатда хона температурасида ҳаводан сувни кучли ютади. Ишлатишдан олдин уни вакуумда куриштилади.

Жараённинг бошланғич пайтида флюс тамомила шаффоф. Аммо у $1000^\circ C$ дан юқорида учувчан (As ёки P) таркибловчиларни ёки оксидларни ютиб ношаффоф бўлиб қолади. Монокристалл ўсишини кузатиш қийинроқ бўлади.

Флюс иссиқликни ўтказмаслик хоссасига эга бўлгани учун суюлма сиртидан иссиқлик кетишини кескин камайтиради. Флюснинг қалинлиги кам бўлса ва монокристалл диаметри кичик бўлса, бу эффект



И.59-расм. Парчаланадиган яримўтказгич бирикманинг қалин флюс остида ўстирлаётган йирик монокристаллнинг диаметри ўзгариши (суюлманинг ўсиши турли босқичларида унга ўзгармас катталикли қувват келтириб турилади).

кам сезилади, аммо флюс қатлами катта бўлса, катта диаметри монокристалл ўсиши барқарор бўлмай қолади. Монокристалл тайинли диаметргача ўсиб етганда, (II.59, а-расм) кристалланиш фронтида ажралган суюлиш яширин иссиқлиги сочилиб улгурмасдан суюлма устуниди тўпланади. Шунинг учун устун баландлиги ортади ва монокристалл диаметри камаяди (монокристалл «тагидан кесилди») (II.59, б-расм). Аммо монокристаллнинг бошлангич қисми флюс қатлами остидан чиққандан кейин қисилган газда иссиқлик кўтарилиб кетиши (конвенция) туфайли мазкур қисм тез совий бошлайди, кристалланиш фронтидан иссиқлик кетиши ошади ва монокристалл ҳар тарафлама ўса бошлайди (II.59, в-расм). Иссиқлик мувозанати ўрнашгач, ўсаётган монокристалл диаметри ўзгариши жараёни яна такрорланади.

Эҳтиёжга биноан флюснинг меъёрий қалинлиги 10-12 мм. Бундан кам бўлганда суюлмадан учувчан таркибловчи кўп кетиб қолади, ортиқ бўлганда диаметрни бошқариш қийинлашади.

Парчаланувчи яримўтказгич бирикмалар монокристаллар мукамаллигига суюлманинг стехиометрик таркибдан четланиши катта таъсир қилади. Шунинг учун суюлтириладиган бирикма таркиби стехиометрик таркибга жуда яқин бўлиши керак.

Суюлманинг стехиометрик таркибдан четланиши нақадар муҳим эканлигини қуйидаги маълумот тасдиқлайди: галлий арсениди (GaAs)да стехиометриядан четланиш то 10^{18} - 10^{19}см^{-3} гача зичликдаги нуқтавий нуқсонлар келтириб чиқаради.

Флюс остидан чиқаётган монокристалл температураси етарлича катта бўлса, флюс унинг сиртидан оқиб тушади, бирикма парчаланиб, сирт қатламидан учувчан таркибловчи учиб кетади, оқибатда сиртда дислокациялар вужудга келади. Бунинг олдини олиш учун мазкур усулда ўстириладиган монокристалларда флюс соҳасида температуранинг кичик градиентларини ҳосил қилиш зарур, сиртда температура 700 - 800°C дан юқори бўлмасин. Бу температурада флюснинг қовушқоқлиги монокристалл сиртида ҳимояловчи қатлам ҳосил қилиш учун етарли бўлади.

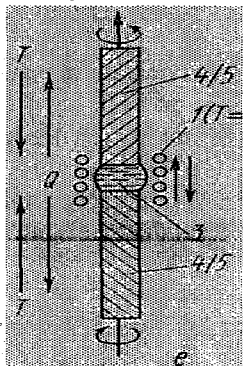
10.4.3.ТИГЕЛСИЗ ЗОНАВИЙ СУЮЛТИРИШ УСУЛИ

Яримўтказгич моддалар технологиясида тигелсиз зонавий суюлтириш жараёни фақат кремнийнинг килород миқдори кам ва ноасосий заряд ташувчилар яшаш вақти катта бўлган (10^3 мкс) монокристалларини олиш учунгина қўлланади. Электротехника саноати талабларига биноан, бу усулнинг қўлланиши кенгаймоқда.

Тигелсиз зонавий суюлтириш усули Чохральский усулига нисбатан кам унумли ва мураккаб, юқори частотали қиймат аппаратурада амалга оширилади.

Бироқ кварц тигелнинг ва графит иссиқлик шаҳобчасининг йўқлиги бу усул билан тозалик даражаси анча юқори кремний монокристаллари олиш имконини беради.

Дастлабки поликристаллик кремний стерженида (таёқчасида) суюлган зонани юқори частотали генератордан (5,28 МГц) таъминланадиган индуктор (печ) вужудга келтиради (II.60-расм). Бу усул жараёнини вакуумда ҳам, инерт газлар муҳитида ҳам ўтказиш мумкин.



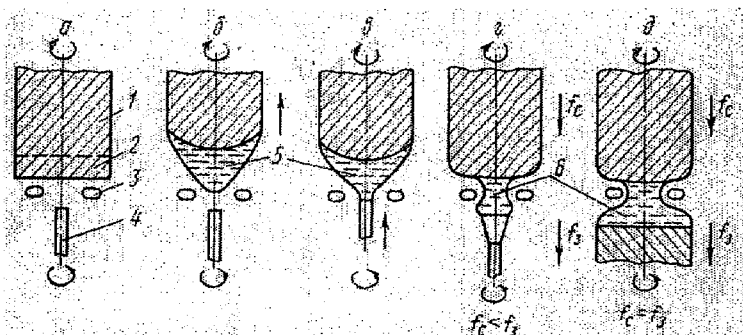
II.60-расм. Вертикал тигелсиз ўстириш усулида яримўтказгичларни тозалаш ва унинг монокристалларини олиш чизмаси: 1-иситгич; 3-кристалланаётган суюлма; 4, 5-суюлманинг кристалланган қисми; Q-иссиқликни кетказиш йўналиши стрелка билан кўрсатилган.

Турли тузилишли индукторлардан фойдаланиб, суюлмадаги ва ўстирилаётган монокристаллдаги иссиқлик майдонларини бошқариш мумкин.

Ҳозирги замон технологияси бўйича тигелсиз зонавий суюлтириш усулида диаметри $d \leq 100$ мм бўлган кремний монокристалларни ўстириш мумкин.

Иссиқлик майдонларини бу усул жараёнида бошқариш анча қийин, аммо муайян чоралар бу ишни амалга оширади.

Диаметри стержен диаметридан катта бўлган индуктор суолтирадиган стерженнинг кристалланиш fronti мураккаб тўлқинсимон шаклга эга (II.61-расм). Кичик диаметрли индуктор суолтирадиган ҳолда кристалланиш fronti янада нотўғри шаклга эга бўлади, оқибатда суолган зона марказий қисмига суолма ингичка оқим бўлиб қуйилади.



II.61-расм. Юқори частотали индуктордан фойдаланиб тигелсиз зонавий суолтириш жараёни босқичлари. Бунда индукторнинг диаметри поликристаллик кремнийнинг суоладиган стержени диаметридан кичик (f_c ва f_3 - мос равишда, стержен ва хамиртуруш кўчиши тезликлари); а-кремний стержени учининг қиздирилиши; б-суолган кремнийнинг осилган томчиси ҳосил бўлиши; в-хамиртуруш; г-суолган зона ҳосил бўлишнинг бошланғич босқичи; д-барқарор режимда суолган зона ўтиши; 1-стержен; 2-стерженнинг қизиган соҳаси; 3-юқори частотали индуктор; 4-монокристаллик хамиртуруш; 5-суолган томчиси; 6-суолган зона.

Ўқлар бўйича катта температура градиентлари монокристалларда катта термик кучланишлар пайдо қилади, бинобарин, дислокациялар зичлигини катта қилади ($>10^4 \text{ см}^{-2}$).

Шунинг учун мазкур усул билан мукамал (дислокациясиз) катта кремний кристаллари ($d > 60 \text{ мм}$) олиш учун қурилмага суолган зонадаги иссиқлик шароитларини фаол бошқарадиган қисмлар киритиш талаб қилинди. Бу фаол қисмлар: қўшимча иситгичлар киритилди, стержен ва монокристалл ўқлари бир-бирига нисбатан яқинлаштирилди. Бу ҳолда монокристаллар, Чохральский усулига нисбатан, камроқ микронуксонли бўлади.

Дислокациясиз кремний монокристалларида микро-нуқсонлар энг кўп ўрганилган. Уларнинг икки (А ва В) асосий турлари фарқ қилинади: 1) А ясси дислокацион сиртмоқлар, (букилган ҳалқалар шаклида), улар кристалл ҳажмида киришмалар тўпламлари сўрилиши оқибатида ҳосил бўлади, ўлчами катта, уларни едириш усуллари билан ошкорлаш мумкин;

2) В турдаги микронуқсонлар киришмалар ёки уларнинг бирикмалари (SiC ёки $\alpha\text{-SiO}_2$ тўпламларидан иборат.

Кремний кристалларида микронуқсонлар зичлиги уларни ўстириш усули ва шароитига боғлиқ.

Тигелсиз зонавий суюлтириш усулида ўстирилган монокристалларда А тур микронуқсонлар ўртача зичлиги 10^7см^{-3} , Чохральский усулида эса -10^9см^{-2} . В тур микронуқсонлар А турдан бир-икки тартиб қадар кўпроқ ($10^8 - 10^9 \text{см}^{-3}$).

Дислокациясиз кремний кристалларида микронуқсонлар ҳосил бўлишига йўл қўймаслик учун суюлмада кислород ва углерод киришмалари миқдорини камайтириш керак.

Бу мақсад учун аргон муҳити энг қулай бўлади. Агар унга кислородни боғловчи 10% водород қўшилса, натижа яна ҳам яхши бўлади.

Монокристаллни совитиш оптимал (мақбул) тезлигини танлаш, суюлмани кристалланиш фронти соҳасида тез-тез аралаштириб туриш яримўтказгичлар монокристалларида микронуқсонлар пайдо бўлишини бартараф қиладиган чоралардир. Тигелсиз зонавий суюлтириш усулида қўлланадиган юқори частотали қиздириш йўли билан аралаштириш Чохральский усулидаги конвектив аралаштиришдан кўп марта тезроқ ва самаралироқдир.

10.4.4. БРИЖМЕН ГОРИЗОНТАЛ УСУЛИ

Бу усул галлий арсениди технологиясида катта қўлланадиган эга. Ундан суюқлик билан жипс ёпиш усулида дастлабки модда бўладиган поликристаллик бирикмани синтез қилиш учун ҳам, монокристалл ўстириш билан бирлаштирилган синтез учун ҳам фойдаланиш мумкин. Бу усул қурилмаси етарлича содда ва Чохральский усулидаги каби мураккаб автоматланган бошқариш тизимини талаб қилмайди. Мазкур усул билан Чохральский усулида ўстирилганига нис-

батан биржинслироқ, кучли легирланган галлий арсениди монокристаллари олиш мумкин.

Брижмен горизонтал усули вакуумланган ва кавшарланган кварц ампулаларда амалга оширилади, ампулаларнинг бир четида арсенийли кварц қайиқчани, иккинчи четида галлий солинган қайиқчани жойлаштирилади (II.18, а-расм).

Ампулада талаб қилинадиган арсений буғи керакли босими унинг конденсирланган фазасини термостатга улаб тутиб турилади. Конденсирланган фазанинг (суюлманинг) мутлақ температураси (610°C – 625°C) жараённинг иссиқлик ша роитига, суюлманинг талаб қилинган таркибига ва кристалланиш тезлигига боғлиқ бўлади.

Усул қурилмасининг печлар бўлими (блоки) ампула узунлиги бўйича керакли температура тақсимотини таъминлайди ва электик қаршилиқ печларидан иборат.

(II.17,б-расм). Печлар блоки кузатиш деразаси билан таъминланган. Печлар блокини қўзғалмас ампулага нисбатан силжитиб бориш йўли билан галлий-арсений суюлмаси бўлган қайиқча бўйлаб кристалланиш фронти ҳаракатлантирилади.

Брижмен усулида монокристаллар ўстирилганда ўқлар бўйлаб температура градиенти унча катта эмас ($<10^{\circ}\text{C}/\text{см}$) уларда дислокациялар зичлиги суёқлик билан жипс ёпиш усулида олинган монокристаллардагидек ($\approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-2}$).

Шарсимон қайиқчаларда кичик температура градиентлари бўлганда унча катта бўлмаган кесимли дислокациясиз монокристаллар олиш мумкин.

Монокристалларнинг тузилиши мукамаллиги монокристалл хамиртуруш сифатига, кристалланиш тезлиги ва унинг фронтидаги температура градиенти орасидаги муносабатга боғлиқ. Агар кристалланиш тезлиги $0,25 \text{ мм/мин}$ дан катта бўлмаса, градиент $8\text{--}10^{\circ}\text{C}/\text{см}$ бўлса, кристалланиш фронти деярли ясси (эгри эмас) бўлади, бу эса кичик бурчакли чегаралар деб аталувчи нуқсонлар ҳосил бўлишини истисно қилади.

Галлий арсениди монокристаллари [013] йўналишда ўстирилса, уларда дислокациялар кам бўлади (бу йўналиш дислокациялар сирпаниши текислиги билан $\sim 27^{\circ}$ бурчак ташкил қилади), ваҳоланки, Чохральский усули учун мақбул йўналишлар [111] ва [100] эди.

Брижмен горизонтал усули амалда дислокациясиз монокристаллар олиш имконини беришлигини тажрибалар тасдиқлайди.

10.5. ЮҚОРИ ДАРАЖАДА ТОЗА МОНОКРИСТАЛЛАР ЎСТИРИШ

Яримўтказгич моддалар ва асбоблар ишлаб чиқаришда эпитаксиал технологиянинг ривожланиши ҳажмий монокристаллар тозаллигига қаттиқ талаблар қўйди, чунки улардан тағликлар тайёрлаш учун фойдаланилади. Шу тағликлар асосида газ ($\text{Ge}, \text{Si}, \text{GaAs}, \text{InAs}, \text{GaP}, \text{InP}$) ёки суюқлик ($\text{GaAs}, \text{InAs}, \text{GaP}, \text{InP}$) эпитаксия усуллари билан яримўтказгичли асбоб ёки интеграл схеманинг ишчи қатлами тайёрланади. Эпитаксиал технология ҳозир юқори даражада тоза қатламлар олиш имконини беради.

10.5.1. ЭЛЕМЕНТАР ($\text{Ge}, \text{Si}, \text{Te}, \text{Se}$) ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАРДА КИСЛОРОД

Элементар яримўтказгичларда асосий назорат қилинмайдиган киришма кислород бўлиб, унинг миқдори кўпчилик ҳолларда легирловчи киришма миқдоридан ортиқ бўлади. Германияда кислород сезиларли таъсир қилмайди.

Чохральский усули билан ўстирилган кремний монокристалларида кислород миқдори, айниқса, катта, у монокристаллнинг турли қисмларида солиштирма электрик қаршиликни камайтиради (**термодонор эффект**).

Хона температурасида ионланадиган термодонорлар — донор марказлар — кремний монокристалларига $400\text{--}600^\circ\text{C}$ да термик (иссиқлик) ишлов берилганда вужудга келади, бу ҳодиса кремнийда кислороднинг ўта тўйинган қаттиқ эритмаси парчаланishi оқибатидир. Суюлмадан ўстирилаётган кремний кристалли юқори температурада ортиқча миқдорда кислородни ютади. Унинг бир қисми SiO_2 оксид ҳосил қилади: бу оксид кремний ҳажмида $1\text{--}50$ мкм ўлчамли иккинчи фаза ажралмалари сифатида $1\cdot 10^7$ см³ зичлик билан текис тақсимланади. SiO_2 нинг яна бир қисми кремнийга механик йўл билан кириб олади.

Бироқ кислороднинг катта қисми $2\cdot 10^{18}$ атом/см³ зичликда кислород- кремний қаттиқ эритмаси таркибига киради. Бу ҳолатдаги кислород киришмаси кремний электрик ўтказувчанлигига таъсир кўрсатмайди. Лекин кремнийни $400\text{--}600^\circ\text{C}$ гача совитилгандан кейин шу температураларда уни

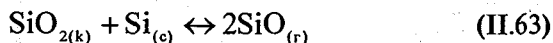
камида 1 соат тутиб турилса, қаттиқ эритма парчаланиб Si-O_n ($n=1-4$) турдаги бирлашма (комплекс) ажралади. Уларнинг баъзилари (Si-O_4) электрик жиҳатдан фаол бўлади. Баъзан улар 600°C дан юқорида ҳам ҳосил бўлиши мумкин.

Катта диаметрли ва катта массали кремний монокристаллари секин совитилади. Шунинг учун бундай монокристалларнинг юқориги қисми 2 соат чамасида термодонорлар ҳосил бўладиган температура оралиғида бўлади. Оқибатда монокристаллнинг бошланғич қисми кўпроқ юқори температурада туради, бу жойда термодонор эффект вужудга келади. Кремний монокристаллари кўндаланг кесимидаги термодонор эффект монокристалл четларидаги солиштирма қаршилиқни камайтиради.

Термодонор эффектни сусайтириш — асосан кремнийдаги кислород зичлигини камайтиришдир. Бундан ташқари, монокристаллнинг бошланғич қисми термодонорлар ҳосил бўладиган температурада жуда кам турадиган қилиш зарур. Яна бир чора — кремний монокристалларини 1 соат ёки ундан ортиқ $700-800^\circ\text{C}$ да тутиб турилади. Бунда фаол Si-O_n бирлашмалар (асосан, Si-O_n) парчаланиб, SiO_4 ҳосил бўлади (кислород боғланади).

Кислород кристаллда қандай пайдо бўлади?

Кислород кремнийда суюлманинг атмосфера билан ва яна контейнер кварц билан таъсирлашишдан, яъни



реакция оқибатида пайдо бўлади. SiO юқори температура-ларда учувчан бўлади. Унинг бир қисми суюлмада эриб, кремнийни кислород билан ифлослайди. Кислороднинг энг кўп зичлиги $4 \cdot 10^{18}$ атом/ см^3 бўлади.

Вакуумда ўстирилган кремнийда кислород зичлиги пастроқ.

Кремний монокристалларида кислород миқдори қандай бўлиши суюлмани аралаштириш шароитига ҳам боғлиқ. Тез аралаштириш кислородни кварц тигел деворидан (унинг пайдо бўлиш жойидан) кристалланиш фронти томонга кўчиради.

Натижада кислород ва у билан боғлиқ микронуксонлар зичлиги ортади. Монокристалл диаметри ошган сари кислород зичлиги ҳам ошади.

Шу сабабларга кўра, кам миқдордаги кислородли кремний ва германий монокристаллари олиш учун ўстириш жараёнини:

- юқори ($1 \cdot 10^{-6}$ мм сим.уст) вакуумда,
- контейнерсиз вариантда (тигелсиз зонавий суюлтириш ёки Чохральский гарниссаж усулида),

- тоза водород муҳитида,
- тоза аргонда олиб бориш керак.

Чохральский гарниссаж усулида ўстирилган кремний монокристалларида кислород зичлиги $5 \cdot 10^{15}$ атом/см³ гача пасайтирилиши мумкин.

Баъзи ҳолларда элементлар яримўтказгичлар монокристалларида кислород миқдорини камайтириш учун уларнинг кремний суялмаларига кислородга яқинлиги катта элементар (Ge, Sn, Pb, Ca, Al, баъзи СЕЭ) киритилади. Аммо бу киришмаларнинг монокристаллар хоссаларига таъсири эътиборга олинаши керак.

10.5.2. ЭЛЕМЕНТЛАР (Ge, Si, Te, Se) ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАРДА УГЛЕРОД

Углерод ҳам назорат қилинмайдиган киришма бўлиб, унинг зичлиги $2 \cdot 10^{18}$ атом/см³ га етади. Унинг яримўтказгичларга кириб қолиш йўллари:

- ёмон тозаланган германий тетрахлориди ва хлорсиланлардан;

- графит қайиқчаларда GeO_2 оксидни водород билан тиклаш жараёнларидан;

- Чохральский усулида ёки тигелсиз зонавий суюлтириш усулида монокристаллар ўстириш жараёнида углеводород ва СО шаклида қурилма камерасининг печлар бўлимига киришдан.

Элементар яримўтказгичларда углерод электрик жиҳатдан нейтрал киришмадир. Кремнийнинг углерод билан бойиган суялмаси кристалланишида монокристалларда а-SiC ажралмалари пайдо бўлиши мумкин. Улар кремний панжарасида маҳаллий кучланишлар, В тур микронуксонлар ҳосил қилади ҳамда дислокациялар пайдо бўлишига ёрдамлашади.

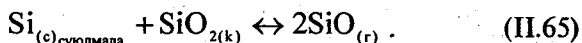
Углерод элементар яримўтказгичлардаги кислород билан бирга модданинг электрик хоссаларига ҳам таъсир қилиши

мумкин. Масалан, кўп миқдордаги кислород бўлган кремнийга киритилган углерод кислород билан боғланиб комплекслар ҳосил қилади ва шу билан термодонорлар пайдо бўлишига йўл қўймайди. Бу комплексларнинг баъзилари донор, баъзилар эса нейтрал бўлади.

Углерод кремний монокристаллари асосида тайёрланган асбоблар хоссаларига ҳам таъсир қилади. СО оксид қўшилган аргон муҳитида ўстирилган монокристалларни тадқиқлаш кўрсатишича, монокристалларга термоишлов берилгандан сўнг углерод ўта тўйинган эритмадан ажралиб чиқади. Ажралиб чиққан углерод миқдори ошган сари р-п-ўтишнинг тешилиш кучланиши пасайиб боради, сирқиш токи ошиб боради.

10.5.3. ЯРИМЎТКАЗГИЧ БИРИКМАЛАРДА КРЕМНИЙ

Галлий арсениди ва фосфиди (GaAs, GaP) монокристалларида асосий назорат қилинмайдиган киришмалар кремний ва кислород бўлади. Улар асосан кварц контейнерлар (қайиқчалар ва реакторлар) дан суюлмага кириб қолади. Кремний билан бир вақтда эриётган кварцдан суюлмага бошқа киришмалар ҳам киради. Масалан, GaAs кристалига синтетик кварцдан $\text{Na} \cdot 5 \cdot 10^{13}$, $\text{Cu} \cdot 2 \cdot 10^{13}$, $\text{Sb} \cdot 5 \cdot 10^{12}$, $\text{Au} \cdot 3 \cdot 10^{10}$ атом/см³ зичликда ўтиб олади. Бу ҳолда юз берадиган реакциялар:



Реакция хонасидан кетаётган учувчан Ga_2O оксид уни ўнгга силжитади, оқибатда суюлма кремний билан бойийди. Иккинчи реакция оқибатида реакция зонасидан учувчан SiO оксид реакцияни ўнгга силжитади, галлий суюлмасида кремний камаяди.

Кремнийнинг GaAs суюлмасидаги зичлиги галлий ва кремний оксидларининг парциал (улуший) босимлари катталигига боғлиқ. Улар қанча юқори бўлса, галлий суюлмасида кремний шунча кам бўлади. Парциал босимлар Ga ва Si жойлашган контейнернинг эркин ҳажмига боғлиқ, бу ҳажм

қанча катта бўлса, парциал босимлар шунча кам ва галлий суюлмасида кремний шунча кўп. Агар эркин ҳажм кам бўлса, парциал босимлар катта ва суюлмада кремний оз бўлади. Бунинг учун эркин ҳажм кам ҳосил қилиниши керак. Флюс қатлами остидан монокристаллар ўстириш усулида суюлма устида эркин (газ) ҳажм нолга тенг, унинг вазифасини бажарадиган флюс оксидларни ютиб юқоридаги реакцияларни ўнгта силжитади. Бундан ташқари, флюс сифатида ишлатиладиган бор ангидриди B_2O_3 кварц билан таъсирлашади. Галлий арсениди монокристалларини кварц тигелларда (флюс остидан) ўстирилгандан сўнг флюсдаги кремний зичлиги (масса бўйича) 0,2 % ни ташкил қилади. Бу кремний қисман галлий суюлмасига ўтади. GaAs ва GaP юқорида айtilган флюс остидан кварц тигелларда ўстирилганда кремний зичлиги $1 \cdot 10^{16}$ атом/см³ тартибида бўлади.

GaAs монокристалларини Брижмен горизонтал усулида ўстирилганда **суюлмада кремний миқдорини** Ga₂O оксиднинг суюлма атрофидаги муҳит босимини орттириш йўли билан, шунингдек, унинг реактор совуқ қисмида конденсацияланишини бартараф қилиш билан **камайтирилади**. Бунинг учун реакторга етарли миқдорда кислород киритилади. У реакторга Ga ва Ga₂O₃ аралашмаси кўринишида киритилиши мумкин, уни қиздирганда учувчан Ga₂O оксид ҳосил бўлади (унинг буғ босими катталашади):



Кичик ҳажмли реакторларни қўллаб, деворлари температурасини 1000°C гача кўтариб ва кристалланиш зонасини қолган ҳажмдан капилляр тўсиқлар билан ажратиб (бу Ga₂O кўчишини тўхтатади), GaAs даги кремний киришмаси миқдорини бир тартибдан кўпроқ пасайтириш мумкин бўлади.

Бу шартлар бажарилганда GaAs да Si зичлиги 10^{15} атом/см³ дан кам ва электронлар ҳаракатчанлигини 8000 см²/В·с даражага олиб келиш мумкин. (300 K).

10.5.4. ЯРИМЎТКАЗГИЧ БИРИКМАЛАРДА КИСЛОРОД

Галлийли яримўтказгич бирикмалар суюлмасига кислородни ҳар қандай шаклга киритилса ҳам, у галлийнинг кварц

билан таъсирлашишини босади, демак, бирикмада кремний ва бошқа баъзи киришмалар (агар уларнинг кислородга яқинлиги галлийга нисбатан яқинликдан юқори бўлса) миқдорини камайтиради. Бундай киришмалар — углерод, темир, хром ва мисдир.

Брижмен усулида GaAs монокристаллар ўстирилганда, уни контейнерга (ампулага) элементар шаклда ёки оксидлар шаклида (Ga_2O_3 , As_2O_3 ва б.) киритиб, унинг тозалаш таъсиридан фойдаланилади, Чохральский усули қўлланилганда эса кислород бевосита флюсга киритилади ва ўша натижага эришилади.

Яна бир нарсага эътиборни жалб этамиз. Агар GaAs ва GaP суюлмасида кислород ортиқча миқдорда бўлса, кристаллар қаршилигини оширади. Агар бу миқдор кам бўлса, юқори температурада кристаллга ишлов берилгач, унинг қаршилиги кескин камаяди. Агар кислород миқдори кўп бўлса, термоишлов кристаллнинг солиштирма қаршилигига сезиларли таъсир қилмайди.

Мазкур бирикмалардаги кислород кристалланиш жараёнига таъсир қўрсатади. Масалан, контейнернинг (қайиқчанинг) суюлма томонидан ҳўлланиши кучли даражада ортиб кетади, монокристалл ўсиши бузилади.

Кислород юқори температуралар соҳасида галлийли бирикмаларнинг пластиклик хоссаларини кескин пасайтиради. Шунинг учун Брижмен ва Чохральский усуллари билан ўстирилган кристаллар осонликча ёрилиб кетади.

Умуман айтганда, GaAs ва GaP монокристалларида кислород зарарли киришма ҳисобланади. Унинг тозаловчи киришма сифатида қўлланиши анча чекланган. Шунинг учун GaAs ва GaP яримўтказгич бирикмалар тозалигини кўтариш учун, энг аввало, дастлабки моддалар тозалигини кўтариш; кварц контейнерларни, масалан, алюминий ва бор нитридларидан ясалган контейнерлар билан алмаштириш; жараёнга киритиладиган барча моддаларни синчиклаб сувсизлантириш ва газсизлантириш зарур.

10.6. ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАРНИНГ ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯСИ

Кувватдор лазерлар яримўтказгичли асбоблар ишлаб чиқаришда кенг қўлланилади. Ионлар киритилгандан сўнг пла-

стиналарни қиздириш (куйдириш) ва поликристаллик кремнийда доналар ўлчамини катталаштиришда стабилитронларни тайёрлашда, металл контактлар яратишда лазерлардан фойдаланилади. Масалан, юқори энергияли ионлар киритилганда кремнийнинг монокристаллик тузилишининг бузилиши, уни тиклаш учун бериладиган термий ишлов 1000°C да 30 мин давом этади. Лазер бу ишни 10 марта тез бажаради.

Лазер билан самарали ишлов бериладиган яримўтказгичлар технологияси соҳалари ҳақида тўхталиб ўтамиз.

10.6.1. СИРТНИ ТОЗАЛАШ ВА РЕЛЬЕФНИ ЯХШИЛАШ

Лазер ёрдамида тозалашда яримўтказгич сиртидаги ифлосликлар кетказилади, аммо сиртнинг ўзи зарарланмайди. Ишлов бериладиган сиртга ёт атомлар кирмайди, вакуум шароити бузилмайди. Лазер вакуум камерасидан ташқарида бўлади, унинг нури шаффоф дераза орқали киритилади, бунда бир жараёнда бир неча амаллар, масалан, тозалаш, металлни ёки эпитаксиал пардани вакуумга ўтказиш, ток келтирувчи йўлчалар (тасмалар) ҳосил қилиш ва ҳ.к. амаллар бажарилади.

Тозалаш учун нурининг диаметри 3,5 мм бўлган рубин лазер ишлатилади. Кремний сиртида углерод ва кремний диоксиди пардаларини куйдириб юбориш учун ҳар бирида 2 Ж/см^2 бўлган бешта кетма-кет импульслар энергияси кифоя бўлади. Сиртни 16 нс давомийликли икки-уч (2 Ж/см^2) импульс билан нурлантирилса, сиртнинг монокристаллиги тикланади (у аргон ионлари киришидан бузилган) ва бир вақтда аргон ионларидан сиртни тозалайди.

Металл пардалари сиртини текислаш учун уларни 1 мкс давомида лазер нурланиши билан қиздириш кифоя. Бу текислаш жараёнини вакуумда, ҳавода ёки инерт газ муҳи-тида ўтказиш мумкин. Кремнийнинг эпитаксиал қатламлари сиртидаги ўткир чизикларни бартараф қилиш учун лазер ишловдан фойдаланилади, агар кремнийни ($0,2\text{--}0,8 \text{ Ж/см}^2$) энергияли импульслар билан нурлантирилса, мазкур нуқсонлар (суюлиб) тўла йўқ бўлиб кетади.

10.6.2. КИРИШМАЛАР КИРИТИШ ВА УЛАРНИ ҚАЙТА ТАҚСИМЛАШ УСУЛЛАРИ

Сиртий қатламлардан диффузиялаш усули. Бу усул сиртий манбадан диффузиялаш усулига ўхшайди, аммо бунда легирловчи киришмани лазер нурланиши қиздирилади. Сирт қатлами суюлади ва киришма суюлган модда ичига диффузияланиб киради. Ана шу усул билан кремнийга донорлар ва акцепторлар (бор, фосфор, сурьма ва б.) киритилади.

Юпқа яримўтказгич пластиналар сиртига омик контактлар ўтказиш худди шу усулда амалга оширилади. 100 мм диаметри ва 0,2 мм қалинликдаги пластиналарни лазер билан қиздириш термик кучланишларга боғлиқ бузилишлар қолдиради. Оддий технологияда эса кўп контактлар шундай кучланишлар сабабидан бузилиб кетади.

Суюқ ёки газсимон манбадан диффузиялаш усули. Рубин лазер нурланишини р-Si пластинаси сиртига ўтказилган этанолдаги сурьма трихлориди эритмаси орқали ўтказиб сиртдан 190 нм ичкарида р-п-ўтиш ҳосил қилинади.

Газсимон манба ($10\% \text{PH}_3 + 90\% \text{Ag}$ газлар аралашма) муҳитига пластина жойланади. Александрит асосидаги лазер ($\lambda = 0,73$ мкм) билан ишлов берилади. Унинг нури диаметри ~3мм.

Лазер ёрдамида фотолитик легирлаш. Бу усул яримўтказгич сиртига киришма ўтказиш ва уни пластина ичига жойлаш жараёнларини биргаликда олиб бориш имконини беради. Биринчи босқичда газ лазер нурланишини ютади, диссоциацияланади, киришмани озод қилади (фотолитиз). Киришма ўша нурланиш таъсирида сиртга ўтира бориб, пластина ичига киради.

Лазер ёрдамида ионлар киритиш. Таркибида киришма бўлган нишон қувватдор CO_2 — лазер нурланиши таъсирида буғлантирилади, киришма ионлари яримўтказгичга киради.

Яримўтказгичларда киришмани қайта тақсимлаш. Яримўтказгичга жойлаштирилган киришма пластиналар сиртини лазер ёрдамида қуйдириш йўли билан қайта тақсимланиши мумкин. Бу эса асбоблар тавсифларини яхшилаш имконини беради.

10.6.3. НУҚСОНЛАРНИ КУЙДИРИШ

Яримўтказгичлар технологиясида қўлланиладиган термодиффузия жараёнларида электрик жиҳатдан нофаол ки-

ришмалар уюмлари, преципитатлар ҳосил бўлади. Улар яримўтказгичлар ва улар асосидаги асбоблар хоссаларини ёмонлаштиради.

Лазер ишлови преципитатларни «эритиб» юборади, киришма атомларни фаоллаштиради.

Импульслари давомийлиги 50 нс ва энергия зичлиги 1,5–1,8 Ж/см² бўлган рубин лазери билан ишлов берилганда дислокациялар ва дислокацион сиртмоқлар (улар кремнийга бор, фосфор ионлари ва бошқа ионлар киритилганда ҳосил бўлади) баргараф қилинади. Кейинги даврда керакли хоссали ўта катта интеграл схемаларни ҳосил қилишда ионлар киритиш усули асосий бўлиб қолган. Аммо катта энергияли ионлар (200 кэВ гача) яримўтказгичнинг сиртий қатламини зарарлайди, баъзан уни аморф ҳолатга келтиради. Лазер билан куйдириш сирт қатламини қайта кристаллайди.

Лазер куйдиришнинг икки усули мавжуд: 1) бир неча см² юзали сиртни қисқа импульс (100 нс) билан нурлантириш; 2) кичик юзага (доғга) фокусланган узлуксиз лазер нуруни материал сирти бўйича силжитиб бориш. Узлуксиз лазер билан куйдириш шароити шундай танланадики, бунда сирт қизийди, аммо суялмайди. Демак, қайта кристалланиш қаттиқ фазада юз беради. Бунда киритилган ионларнинг пластина қалинлиги бўйича тақсимоли ўзгармас сақланади. Бир мисол келтирамиз.

$5 \cdot 10^{14}$ см⁻² зичликли ва 100 кэВ энергияли арсений (As) ионлари киритилган кремний қатламларини куйдириш. Куйдиришгача қатлам аморф тузилишда 7 Вт ли аргон лазери куйдириш ўтказилади, Si пластинкадаги лазер доғининг диаметри ~25 мкм, нурнинг силжиш тезлиги 2,7 см/с. Куйдиришдан сўнг қатлам мукамал кристаллик тузилишга эга бўлиб қолади. Ваҳоланки, термик куйдириш (1000°C, 30 мин) аморф қатламда дислокацион сиртмоқлар кўринишида кўп нуқсонлар (~ 10^{10} см⁻²) қолдиради.

Лазер билан куйдириш афзалликлари:

1) киришманинг диффузион қайта тақсимланиш сезилмайди, мураккаб бирикмаларда (масалан, $A^{III}B^V$ да) таркиб сақланади;

2) термик куйдиришга нисбатан лазер куйдиришда легирлаш самарадорлиги юқори бўлади;

3) заряд ташувчилар фаоллиги бир неча марта ортиқ бўлади.

10.6.4 КИРИШМАЛАРНИ ГЕТТЕРЛАШ

Геттерлаш деб асбобларнинг фаол соҳаларидан тез диффузияланадиган металл киришмаларни (олтин, кумуш, мис ва б.) кетказиш жараёнига айтилади, чунки бу киришмалар асбоблар сифатини пасайтиради.

Одатда, геттерлаш соҳаларини пластинанинг нотекис томонида ҳосил қилинади, бунда муайян нуқсонлар кириптилиб, улар юқорида айтилган нокерак киришмаларни ўзига бириктириб олади.

Лазер ишлови оқибатида ҳосил бўлган нуқсонлар осон назорат қилинади, ифлослик киритмайди ва барқарор бўлади. Улар киришмаларни технологик жараёнлар ўтказилганда ҳам ушлаб тура олади.

Геттерлаш самарадорлигини ноасосий заряд ташувчилар яшаш вақти бўйича баҳоланади. Металл киришмалар қанча кам бўлса, яшаш вақти шунча катта бўлади.

10.6.5. ПОЛИКРИСТАЛЛИК КРЕМНИЙ ҚАРШИЛИГИНИНГ ЎЗГАРИШИ

Яримўтказгичли асбоблар ва ИМС ларда металл ўтказгичлар ўрнига кўпинча легирланган поликристаллик кремний (ПК) пардалардан фойдаланилади. ПК пардаси донаси ўлчами қанча катта бўлса, ўтказгичнинг қаршилиги шунча кичик бўлади. Лазер билан куйдириш доналар ўлчами катталаштиради, бинобарин, пиролиз ёрдамида (620°C ва паст босимда) ўстирилган ПК пардалари қаршилигини камайтиради.

Лазер тизими 30 нс давомийликли ва энергия зичлиги 2- 59 мВт/см² бўлган импульслар ҳосил қилади. Рубин лазердан фойдаланилган ҳолда тўлқин узунлиги 0.6943 мкм ёки неодим лазер бўлганда — 1,06 мкм бўлади, намунада ёруғлик доғи 5 см.

Легирлаш дозасига қараб ПК парда қаршилиги турлича бўлади, доза ортиши билан камайиб боради. Аммо қувват зичлиги катта бўлганда ПК пардалари қатламланиб, уларнинг қаршилиги ортади. Арсений(As) билан легирланган ПК пардалари ўлчами куйдиришгача ~ 30 нм, термик куйдиришда у 40 нм га етади, лазер билан куйдиришда 150 нм гача етади. Мос равишда, қаршиликлар нисбати $15 \cdot 10^3:890:360$. Тер-

мик куйдиришдан сўнг фаоллашган киришма атомлари ҳиссаси 39%, лазер билан куйдиришдан сўнг 93%. Импульс режимида пластина сирти бўйича силжиётган лазер нури поликристаллик кремний қатламини қайта кристаллайди. Бу қаршилиқнинг яна ҳам камайишига олиб келади.

10.6.6. АМОРФ ВА ПОЛИКРИСТАЛЛИК ҚАТЛАМЛАРНИНГ ҚАЙТА КРИСТАЛЛАНИШИ

Эпитаксиал технология яримўтказгичли асбоблар яратишда катта ўзгариш қилди. Аммо унинг баъзи камчиликлари бор. Бу жараёнларда юқори температура тутиб турилиши зарур, у эса пардадан (эпитаксиал қатламдан) тагликка ва аксинча киришмалар қайта тақсимланишига олиб келади, оқибатда киришма зичлиги чегараси кескин бўлмайди. Бундай камчиликлар лазерлар ёрдамида бартараф қилиниши мумкин.

Поликристаллик ёки аморф қатламларни қайта кристаллаш йўли билан эпитаксиал пардалар олиш технологиясининг келажаги бор. Бу усулга кўра, дастлаб паст температурада «тайёрлама» қатламлари ўтказилади, кейин эса **қаттиқ фазали кристаллаш** орқали монокристаллик қатламлар шаклланади. Оқибатда парда — таглик чегаралари кескинлашиб қаттиқ фазали қайта кристаллаш барча босқичларда ўта юқори вакуум бўлишини талаб қилади.

Агар лазер нурланиши қуввати ва унинг нурини силжитиб бориш тезлиги аморф қатламни монокристаллик тагликкача суолтиришга етарли бўлса, бу жараён нормал шароитда кечиши мумкин. Юқори частотада чанглаб ўтқазилган 440 нм қалинликдаги аморф германий қатламини **суюқ** фазадан қайта кристаллаш йўли билан юқори сифатли монокристаллик қатлам ҳосил қилинади. Бунда ишлатиладиган аргон лазер нурланиши қуввати 9 Вт, силжиб бориш тезлиги 200 см/с. Жараён вақти кичик бўлгани натижасида киришмалар пардадан тагликка ва аксинча ўта олмайди.

Импульсли лазерлардан фойдаланганда вакуумда қатламларни (чанглатиб) ўтқазгандан кейин оқ ҳавода қайта кристаллаш йўли билан юқори сифатли кремний автоэпитаксиал қатламлари ҳосил қилинади.

Лазер ишлови туфайли германийнинг кремний тагликда ва кремнийнинг сапфир тагликда **гетерозиттаксиал** қатламларини олиш мумкин.

10.6.7. ПОЛИКРИСТАЛЛИК КРЕМНИЙ ТАСМАЛАРИНИ КРИСТАЛЛАШ

Кремний тасмаларини (ленталарини) ўстириш арзон кремний пластиналарини олиш усулларида биридир. Бу усул кесиш, едириш ва силлиқлашдан амалларсиз бажарилади. Бу амалларга эса дастлабки материал 75% гача исроф бўлади.

Даставвал, кремнийни буғ фазасидан (паст босимда) вақтинча тагликка ўтқазилади. Кейин кремний қатлами ажратиб олинади, тагликдан эса кейинги жараёнда яна фойдаланилади. Бу усул билан 100мкм ва ортиқ қалинликдаги кремний пластиналари олинади. Ўстирилган тасма лазер билан керакли ўлчамли пластиналарга ажратилади. Бироқ бу пластиналар майда донали поликристаллик тузилишга эга, амалда улардан фойдаланиб бўлмайди. Уларни ишлатишга яроқли қилиш учун қуйидаги амаллар бажарилади:

Поликристалл доналарини йириклаш учун лазерга ишлов берилади. Лазер нури, масалан, 7,5 см/мин тезликда силжиб бориб тасманинг торгина қисмини суюлтиради. Қайта кристаллашдан сўнг поликристаллик кремний йирик дондор тузилишга эга бўлиб қолади. Юқори сифатли тасмаларнинг сирти ялтироқ, майда панжаравий рельеф-ефга эга. Рельеф даври 4,5 мкм. Аргонда куйдирилганда силлиқ кўзгусимон сирт ҳосил бўлади. Бундай тасмасимон материалларда ноасосий заряд ташувчилар яшаш вақти катта ва тузилиш нуқсонлари кам.

Қайта кристалланган тасмасимон яримўтказгичлар қуёший элементлар ишлаб чиқаришда кенг қўлланилади.

10.6.8. «ДИЭЛЕКТРИК УСТИДА КРЕМНИЙ» ҚАТЛАМИНИ ҚАЙТА КРИСТАЛЛАШ

Лазер ёрдамида қайта кристаллаш усули билан аморф моддалар сиртида шакллантирилган «диэлектрик устида кремний» қатламлари бошқа усуллар билан ўстирилган қат-

ламларга хос камчиликлардан халос. Бу ҳолда тузилманинг асоси кремний таглик бўлади. Қайта кристаллаш импульсли ёки узлуксиз лазер ёрдамида амалга оширилади. Барча ҳолларда кремний бутун қалинлик бўйича суюлади ва суюлмадан қатламлар қайта кристалланади.

Мазкур тузилмалар кетма-кет ўтказиладиган амаллар натижасида олинади: кремний таглик термик (қиздириш) йўли билан оксидланади ёки тагликка кремний нитриди ўтказилади (диэлектрик қатлам ҳосил қилинади; бунинг устига кремний қатлами ўтказилади — газсимон фазадан (паст босимда) ПК ўстирилади; ионлар киритиш усули билан ПК легирланади; ПК қатламни лазер қайта кристаллайди.

Яхлит кремний қатламларига лазер ишлов берилганда улар поликристалликлигича қолади, аммо доналар ўнлаб мкм гача каттаради. Лазер ёрдамида қайта кристаллашда кремнийнинг бир неча ўн квадрат мкм ли юзали монокристаллик доналари олинади. Шундай усул билан тайёрланган «диэлектрик устида кремний» қатламлари асосида МОЯ—транзистолар, катта интеграл микросхемалар (КИМС) тайёрланади.

10.6.9. ЕДИРИШ

Ультрабинафша спектр соҳасида нурланиш чиқарадиган лазерлардан полимер ва металл пардаларни бевосита едириш учун фойдаланилади. Едиришнинг бир неча усуллари мавжуд: қаттиқ фазадан буғлантириш йўли билан едириш, лазер рағбатлантирган едириш. Бу амаллардан интеграл схемалар ҳосил қилишда кенг фойдаланилади.

Назорат саволлари

1. Киритиладиган киришмалар қандай ҳисоб қилинади?
2. Компановка нима?
3. Оралиқ технологик жараёнлар қандай бўлади?
4. Кимёвий едириш амалларини тавсифланг.
5. Яримўтказгич бирикмаларни синтезлашга тайёргарлик қандай бўлади?

6. Товар монокристаллар қандай ўстирилади?
7. Монокристалларда текис тақсимланган киришмалар ҳосил қилиш чоралари қандай?
8. Мукамал тузилишли монокристаллар олиш усуллари қандай?
9. Чохральский усулини тавсифланг.
10. Зонавий суюлтириш усулини тавсифланг.
11. Брижмен усулини тавсифланг.
12. Яримўтказгичларда кислород ва углерод киришмалари қандай аҳамиятга эга?

УЧИНЧИ ҚИСМ

ЯРИМЎТКАЗГИЧЛИ АСБОБЛАР ТАЙЁРЛАШ ТЕХНОЛОГИЯСИ

11-БОБ. ЯРИМЎТКАЗГИЧ МАТЕРИАЛЛАРГА МЕХАНИК ИШЛОВ БЕРИШ

11.1. УМУМИЙ МАЪЛУМОТЛАР

Ҳар қандай яримўтказгичли асбобни тайёрлаш жараёни яримўтказгич материал қуймаси электрик ўтказувчанлигининг тури, узунлик бўйича солиштирма қаршилигининг тақсимооти характери ва қийматини, заряд ташувчиларнинг яшаш вақти ёки диффузион узунлигини, дислокация зичлигини аниқлаш амалларидан иборат.

Кейинги йилларда яримўтказгич асбоблар тайёрлашда эпитаксиал қатлам вужудга келтирилган яримўтказгичли пластинкалар кенг қўлланилмоқда. Бунда эпитаксиал қатламнинг қалинлиги, солиштирма қаршилиги, қатламнинг қалинлик ва солиштирма қаршилиқ бўйича бир жинслиги, дислокация ва нуқсонларнинг жойлашиш зичлиги назорат қилинади.

Механик ишлов натижасида яримўтказгичли пластинкалар аниқ геометрик ўлчовга, керакли кристаллографик йўналганлик ва сирт тозалик синфига эга бўлади. Бу пластинкалар кейинчалик асбоб тайёрлаш учун хизмат қилиши ёки эпитаксиал қатлам олиш учун таглик вазифасини бажариши мумкин.

11.2. ПЛАСТИНКА ВА КРИСТАЛЛАРГА ҚЎЙИЛАДИГАН ТАЛАБЛАР

Кўпчилик яримўтказгичли асбобларни тайёрлашда монокристалл қуймаларнинг диск кўринишида кесилган пластинкалари ёки улардан кесиб олинган квадрат, тўғри тўртбур-

чак, доира ёки мураккаб кўринишдаги кристалллардан фойдаланилади.

Тайёрланадиган асбобларга қўйиладиган талабларга асосан, пластинкаларнинг қалинлиги 0,2-0,7 мм гача, кристалл юзаси эса 0,1дан 25-30 мм² гача бўлиши мумкин.

Механик ишловнинг асосий вазифаси талаб даражадаги сиртли пластинка ёки кристаллни керакли ўлчам, шакл ва кесимда тайёрлашдан иборатдир. Бу вазифа қўймани пластинкаларга кесиш, у пластинкаларни текислаш ва силлиқлаш билан амалга оширилади.

Яримўтказгичлар технологиясида пластинкалар ва кристаллар сирти сифатига жуда қаттиқ талаб қўйилади. Буларга қуйидагилар киради:

1) қалинлиги ўртача 200 мкм пластинканинг қалинлиги номиналдан ± 3 мкм дан ошмаслиги керак;

2) пластинкаларни кристаллографик текислиги йўналганлиги аниқлиги 3'-6' атрофида бўлиши керак. Оксидлаш, диффузия, киришмалар киритиш ва бошқа жараёнларнинг қайта такрорланиши шунга боғлиқ. Кўпинча (111) текисликда кесилган кристалллардан фойдаланилади;

3) пластинкаларнинг ясси параллеллиги диаметри бўйича ± 1 мкм дан ошмаслиги керак. Албатта, бу талабни пластинка диаметри 80-110 мм дан юқори бўлганда бажариш қийин;

4) механик бузилган қатламни энг юпқа ҳолга келтириш ёки умуман йўқотиш керак. Бу талаб, айниқса, ўта юқори такрорийликли асбоблар учун муҳим бўлади;

5) сирт шакли чуқурлиги $\pm 0,025$ мкм дан ошмаслиги талаб қилинади ва у сиртнинг 14-синфига тўғри келади.

11.3. МОНОКРИСТАЛЛАРНИ ЙЎНАЛТИРИШ УСУЛЛАРИ

Яримўтказгичли асбоблар тайёрлаш технологиясида қуйма монокристалларни пластинкаларга айлантиришдан олдин кристаллографик йўналиши аниқланади. Чунки танланган кристаллографик йўналиш асбобларнинг юқори сифатли чиқишида катта аҳамиятга эга.

Монокристалларни ўстириб олишда, асосан (111) йўналиш танланади. Бироқ монокристаллни ўстириш жараёнида танланган йўналишдан бироз оғишлар бўлиши мумкин. Шунинг учун

барча қуйма монокристалларнинг кристаллографик йўналишлари рентгенографик ёки оптик усул билан аниқланади.

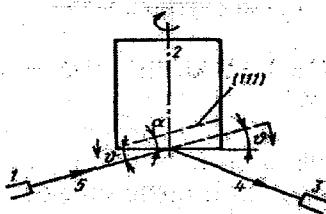
Рентгенографик усул кристалл текисликларидан қайтган рентген нурларининг сочилиш интенсивлигини ҳар бир текисликдаги атомлар жойлашиш зичлигига боғлиқлигига асосланган. Анча юқори зичликка эга бўлган (111) текислик учун сочилиш интенсивлиги бошқаларга нисбатан юқори бўлади. Шу билан бирга ҳар бир модда учун характерли рентген нурлари кристаллографик текисликка мос аниқ бурчак остида қайтади.

III.1-жадвал

Модда	Текисликлар учун сочилиш бурчаклари		
	(111)	(110)	(100)
Германий (Ge)	17°14'	28°56'	43°10'
Кремний (Si)	17°56'	30°12'	45°23'

Яримўтказгич қуйма монокристаллини рентгенографик усулда йўналтириш III.1-расмда кўрсатилган.

Қуймани йўналтиришдан олдин унинг учи қуйма ўқига тик ҳолда кесилиб, кесим (ёқ) текисланади. Шу текисланган ёқни нурланиш оқимига қаратиб кристалл столчага ўрнатилади. Столчага ўрнатилган қуйма йўналганлигини бошқариш имконияти бўлиб, унга рентген нурлари оқими g бурчак остида йўналтирилади. Тушувчи нур текислигидан қайтувчи нурни кузатиш учун 2g бурчак остида қабул қилгич (3) ўрнатилади. Столча қуйма билан биргаликда вертикал

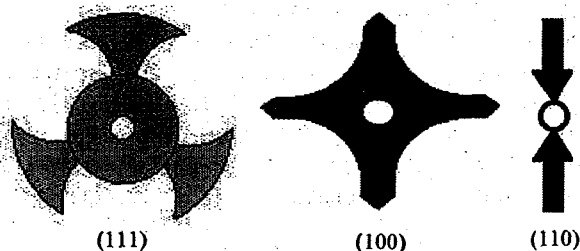


III.1-расм. Қуйма йўналишин рентген усули схемаси:
1-рентген най; 2-қуйма; 3-нур қабул қилгич; 4-қайтган нур; 5-тушувчи нур.

ўққа нисбатан огдириб, қабул қилгичга қайтган нур энг катта равшанликка эга бўлишига эришилади. Шундан сўнг қуйма столчага шу йўналишда маҳкамланади ва ўз ўқи атрофида 180° айлантирилиб, яна энг катта равшанликка эришилади. Шунда (111) текислик аниқланган бўлади. Қуймаларни йўналтириш усулининг аниқлиги $\epsilon(3\epsilon 5)F$ бўлиб, уни аниқлаш учун 15-30 минут-гача вақт сарфланади.

Оптик усулда қуйма монокристаллнинг кристаллографик текисликлари (111), (100) ва (110) ни аниқлаш учун, қуйма учи танловчан едиргичлар ёрдамида едирилади ва уч сиртларида кристаллографик тузилиш қирралари юзага чиқарилади. Бу қирраларни юзага чиқариш асосий кристаллографик текисликларга мос келиб, қуйма сирти текислигига нисбатан улар турли огтан бурчакларда бир-биридан фарқ қилади.

Агар едирилган қуйма учи сиртига ёруғлик нури туширилса, бу сиртдан нурнинг қайтган бурчаги катталигига ва сиртдан қайтган нурнинг шаклига қараб, қуйма йўналганлиги тўғрисида хулоса чиқарилади. Чуқур қирралардан қайтган нур экранга туширилса, у ҳолда экранда ўзига хос қоронғи шакллар ҳосил бўлади. Бу шакллар кўриниши III.2-расмда кўрсатилган.



III.2-расм. Қуйма монокристалларда йўналишларнинг кўриниши.

Қуйманинг геометрик текислигини ўзгартирсак, у ҳолда кўрилатган кристаллографик текисликдаги қайтган нур ҳосил қилган соя шакли ўзгаради. Шакл маълум бурчакка сиқжийди ва кўриниши бузилади. Оптик усулда йўналганлик аниқлиги едиргич сифатига боғлиқ бўлиб, ҳозирги кунда у кремний учун $\pm 3'$, германий учун эса $\pm 15'$ га етказилган. Йўналганлик аниқлигини лазердан фойдаланиб ошириш мумкин. Оптик усулнинг рентгенографик усулга нисбатан афзаллиги шундан иборатки, қурилма содда, тезкор ва хавфсиз.

11.4. ҚҰЙМА МОНОКРИСТАЛЛАРНИ ПЛАСТИНКА ВА КРИСТАЛЛАРГА КЕСИШ УСУЛЛАРИ

Яримўтказгичли асбобларни тайёрлаш технологиясида яримўтказгич қуймаларни пластинкаларга кесишнинг бир қанча усулларидан фойдаланилади:

- 1) қирраси ташқи ёки ички олмосли дискда кесиш;
- 2) абразив суспензия ёрдамида пўлат тасма ёки ингичка симда кесиш.

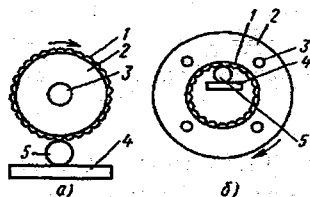
Пластинкаларни кристалларга кесишда эса ультратовуш; ингичка сим; олмос кесгич ва бошқа усуллардан фойдаланилади.

Турли усулларни солиштириш учун бир қанча мезонлар мавжуд бўлиб, уларга унумдорлиги (кесиш тезлиги); механик бузилган қатлам чуқурлиги; фойдали материалнинг чиқиши; яримўтказгич материал чиқиндисидан қайта фойдаланиш; турли кўринишдаги кристалларни тайёрлаш кабилар киради.

Юқоридаги усулларни кетма-кет кўриб чиқамиз.

1. Олмосли дискда кесиш махсус қурилмалар ёрдамида амалга оширилади. Бу усул кенг тарқалган. Олмосли диск юпқа пўлат диск бўлиб, ташқи ёки ички чети ўлчамлари 20-40 мкм ли донатор олмос билан сингдирилган.

Ташқи қиррали қиркувчи дискнинг диаметри 50 мм, қалинлиги 0,1-0,2 мм. Бундай дисклар ёрдамида диаметри 10 мм ли қуймаларни кесиш мумкин (III.3, а-расм).



III.3-расм. Ташқи (а) ва ички (б) олмосли дисклар ёрдамида қуймани кесиш схемаси: 1-олмос қиррали диск; 2-пўлат диск; 3-маҳкамловчи тирқиш; 4-қуймани маҳкамловчи пластинка; 5-қуйма.

Ички кескич олмос қиррали дискнинг ички диаметри 50-60 мм ва ташқи диаметри 100-150 мм бўлиб, қалинлиги 0,1-0,15 мм. Бу дисклар махсус қурилмага маҳкамланади ва унда тепкили тебранишлар бўлмайди. Кесиш катта айланишда (8000-12000 айл/мин) олиб борилади. Дискнинг бундай катта бурчак остида айланишида кесишнинг чизигий тезлиги 20 м/с га етиши мумкин. Кесиётган жой сув билан совити-

лади. Пластинкалар қалинлиги бўйича бир-биридан фарқ $\pm 0,03$ мм дан ошмаслиги керак. Бу усулда кесилиш кенглиги диск қалинлигидан 2,5–3 марта катта, шунинг учун материал чиқиндиси 40–45% ни ташкил қилади.

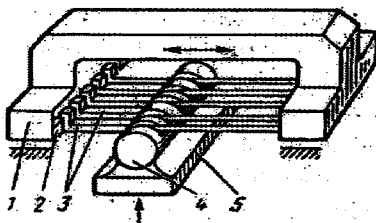
Ички кескич олмос қиррали дискда кесишнинг бир қанча афзалликлари бор. У унумдор ва чиқинди кам. Усулнинг камчиликлари: механик бузилган қатламнинг қалинлиги, қурилманинг мураккаблиги ва уни созлаш қийинлиги ва бошқалар.

2. Абразив суспензия (майда донатор қаттиқ материал + сув) ёрдамида пўлат тасмада қуймаларни кесиш саноатда олмосли кескичлар пайдо бўлмасдан олдин қўлланила бошлаган. Қалинлиги 0,05–0,1 мм ва кенглиги $5 \div 10$ мм пўлат тасмалар махсус пўлатларни қайта термик ишлов бериш натижасида олинади. Тасмалар махсус кассетага тартиб билан жойлаштирилади. Тасмаларни кесиш жараёнида эгриланишидан сақлаш мақсадида, улар анча қаттиқ таранг тортиб маҳкамланган бўлади. Қурилмага ўрнатилган кассета қуйма билан туташтирилади ва илгариланма-қайтма ҳаракатга келтирилади. Кесиш зонасига узлуксиз равишда абразив суспензия қуйилиб турилади.

Тасманинг қуймага солиштирма босими $(7 \div 9) \cdot 10^3$ Н/м². Кесиш тезлиги 10–15 мм/соат.

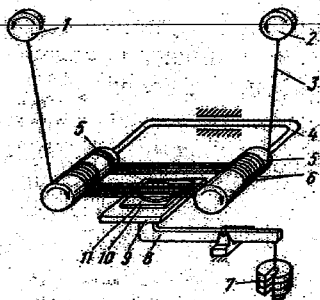
Усулнинг асосий афзаллиги: кесишнинг кичик кенгликда бўлишидир. Кесишлишнинг сифати тасманинг ҳаракат тезлиги, тасмага бўлган босим, абразивнинг донаторлик ўлчами ва қаттиқлиги, абразив суспензия концентрацияси, ишлов берилаётган материал хусусиятига боғлиқ. Масалан, кремнийнинг кесиши германийга қараганда 2 марта кам. Камчилиги: қурилманинг мураккаблиги ва тасманинг хизмат вақти кичиклигидир.

Абразив суспензия билан симда қуймани кесиш усули худди тасма билан кесиш усулига ўхшаб кетади. Фарқ: тасма ўрнига ингичка сим қўлланилади.



III.4-расм. Абразив суспензияли тасма ёрдамида қуймани пластинкаларга кесиш схемаси: 1-кассета асоси; 2-ажратувчи қистирма; 3-тасма; 4-қуйма; 5-қуймани маҳкамлаш учун таглик.

Сим вольфрам ёки вольфрам-молибден (50%W+50% Mo) қотишмадан тайёрланади, унинг диаметри 0,1-0,15 мм (III.5-расм).



III.5-расм. Абразив суспензия

билан симда қуймани кесиш
схемаси: 1-узатувчи ғалтак;
2-қабул қилувчи ғалтак;
3-сим; 4-рама; 5-ғалтак-кас-
сета; 6-тартиб билан ўралган
сим чулғамлари; 7-посанги;
8-пластинкани қиспиш учун ри-
чаг; 9-маҳкамланувчи плита;
10-шиша пластинка; 11-ярим-
ўтказгич пластинка.

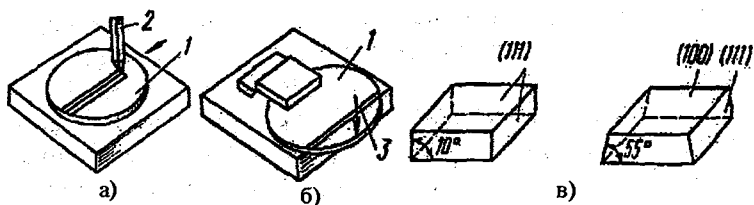
Чулғам симлар ўралган ғалтак қуймага қўйилади ва у илгари-ланма-қайтма ҳаракати туфайли кесишни амалга оширади. Бир вақтнинг ўзида кесувчи симлар сони 25-40 та бўлади.

Сим билан кесиш усули афзаллиги — кесилиш кенгли-гининг юқоридаги усуллардан яна ҳам кичик ва юқори унум-дорли бўлишлигидир.

Катта чуқурликда кесиш имконияти йўқлиги усулнинг асосий камчилигидир. Шунинг учун бу усул асосан плас-тинкани кристалларга кесишда қўлланилади. Диаметри 30-40 мм ли пластинкаларни 0,1 мм ли симларда 10-15 мин да кесиш мумкин.

Қуймаларни кесишда уларни пўлат тагликка эпоксид компаунд ёки абразив қўшилган елим билан маҳкамланади, пластинкалар эса шеллак, пицеин, смола ва бошқалар билан ёпиштирилади.

Скрайбирлаб чегара чизиш усули саноатда пластинкалар-ни кристалларга кесишда кенг қўлланилади. Скрайбирлаш(-инглизча сўздан олиниб, *scribe* — тирнамоқ, тирнаб чизмоқ маъносини англатади) асосида уч ёки тўрт қиррали пирами-да кўринишидаги олмос кескич билан пластинкада параллел чизилган кичик ариқчалар ҳосил қилиш ётади. Улар қолдир-ган излар бўйича квадрат ёки тўғри бурчакли кристаллар синдириб ҳосил қилиш мумкин (III.6-расм).

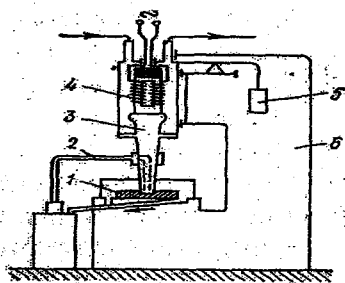


III.6-расм. Скрайбирлаш (а), пластинкани синдириш (б), кристалл олиш (в) схемаси.

Скрайбирлаш усули юқори унумдорли ва кесилган чи-зиқнинг кенглиги кичик, яъни материал исрофи жуда оз, шу афзалликлари билан у бошқа усуллардан ажралиб туради. Шу билан бирга, скрайбирлаш сифати пластинкалар қалин-лигига, кесувчи олмос шаклига ва кристаллографик йўна-лиш бўйича кесилишига боғлиқ.

Скрайбирлаш махсус яримавтомат дастгоҳларда амалга оширилади. Курилма қадамли ҳаракатлангич билан таъмин-ланган бўлиб, кесишни 0,01 мм ораликда 0,01 мм дан то 9,99 мм гача скрайбирлаш амалга оширади. Скрайбирлаш тезлиги 2-3 м/мин.

Скрайбирлашдан сўнг пластинкаларни синдириш турли усул-ларда олиб борилиши мумкин. Буларга юмшоқ тагликда валик-ни юргизиш; эластик мембрана ёрдамида ва бошқалар киради. **Юмшоқ тагликда пластинкаларни синдириш** қуйидагича олиб бори-лади: скрайбирланган пластинка юмшоқ таглик сиртига қўйилиб, чизиқ тортилган томони орқаси-дан куч қўйилади. Кучлар билан пластинкани икки чеккасида кет-ма-кет босиб борилади.



Ультратовушли абразив иш- III.7-расм. Ультратовушли кесиш-лов бериш турли геометрик шак-қурилмасининг тузилиши:
 ладаги кристалларни кесиш учун 1-яримўтказгич пластинка;
 саноатда кенг қўлланилади. Ун-2-абразив суспензия бериш
 дан ташқари, бу усул ёрдамида механизм; 3-концентратор;
 пластинка ва кристалларни те-4-вибратор; 5-юк; 6-корпус.
 кислаш мумкин. Курилманинг

ишлаши III.7-расмда кўрсатилган. Ультратовуш генератордан (4) вибраторга берилади. Натижада магнитстрикцион эффект туфайли (3) концентратор 10 мкм амплитуда билан тебранади. Концентратор учига кесувчи ускуна маҳкамланган бўлади. Ускуна (1) яримўтказгич пластинка билан контактда бўлганлиги учун унга узлуксиз абразив суспензия (2) куйилиб туради ва тебранишлар натижасида пластинка кесилади.

Унча катта бўлмаган 1-1,5 мм чуқурликда сиртга ишлов бериш натижасида ускуна билан ёнлаб кесишида кристаллнинг тўғри тўртбурчак, квадрат ва бошқа кўринишларини ҳосил қилиш мумкин. Ультратовуш билан ишлов бериш натижасида пластинка сиртининг эришилган сифати абразивнинг дондорлик ўлчами ва ускунанинг тебраниш амплитудасига боғлиқ.

Ультратовуш билан ишлов бериш усули унумдорлиги бир қанча омилларга (генератор қуввати ва такрорийлиги, вибраторнинг ф.и.к. га, концентраторнинг трансформация коэффициентига, суспензияга ва яримўтказгич материалнинг механик тавсифномаларига) боғлиқ.

11.5. ПЛАСТИНКАЛАРНИ ТЕКИСЛАШ ВА СИЛЛИҚЛАШ

Яримўтказгичли асбоблар, айниқса, интеграл микросхемалар тайёрлаш технологиясида текислаш ва силлиқлаш амаллари катта аҳамиятга эга. Бу амаллар пластинкаларда механик бузилган қатлам ва нотекисликларни олиб ташлаш, керакли қалинликка келтириш, пластинкаларнинг ясси параллеллигини яхшилаш, сирт тозаллигини талаб даражасидаги синфда олиш учун бажарилади.

Яримўтказгич пластинкаларни текислаш ва силлиқлаш учун турли абразив материаллардан фойдаланилади.

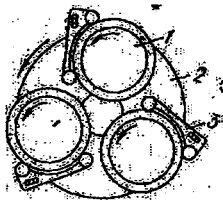
Яримўтказгич пластинкаларни текислашда текисловчи қаттиқ диск (чўян, пўлат, жез, шиша ва бошқа материаллар) ва абразив микрокукунлар (дондорлиги ўлчамлари 5 мкм-220 мкм) дан фойдаланилади. Абразив микрокукун материалларга олмос, кремний карбиди SiC , бор карбиди B_4C , корунд а- Al_2O_3 ва бошқалар киради. Текислаш натижасида сирт тозаллиги С9ч С12 синфларга тўғри келади.

Текислаш жараёни технологик белгисига қараб, олд ва охирги; конструктив белгисига қараб, бир томонлама ва икки томонлама; фойдаланиладиган материаллар турига қараб, эркин ва боғланган абразивли силлиқлаш жараён-ларига бўлинади. Олд ва охирги ишлов беришлар иккита жараёндан иборат бўлиб, улар мақсадлари, режими ва қўлланиладиган материаллари билан фарқланади. Олд те-кислашнинг мақсади пластинкалар сирт текислигини тез равон қилиш, ифлосликларни кетказишдан иборат.

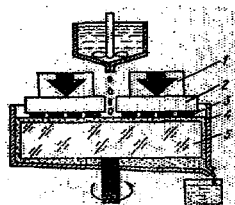
Жараёни ўтказиш режимида текислагичнинг айланиш такрорийлиги юқори бўлади ва пластинка сиртига абразив қум босим бериб турилади. Олд текислаш учун М14 ва М10 абразив қумдан фойдаланилади. Охирги текислаш анча юмшоқ режимда ўтказилади, бунда М7 ва М5 абразив қум-ларидан фойдаланилади. Охирги текислашнинг асосий мақсади пластинка сиртига яхшироқ ишлов бериш ва унинг геометрик параметрларини янада сифатли қилишдир.

Яримўтказгич пластинкаларини бир ва икки томонлама аниқлаш қонуниятлари бир хил, фарқи текисловчи қурилмалар-нинг конструктив тузилишига боғлиқ, холос. Бир томонлама силлиқлашда яримўтказгич пластинкалар махсус тагликка ёпиштирилади. Шундан сўнг пластинка сиртига айланувчи силлиқловчи мослама тегизилади. Силлиқлаш зонасига сувга аралаштирилган абразив суспензия бериб турилади.

III.8-расмда текисловчи қурилманинг кинематик схе-маси берилган.



III.8-расм. Текисловчи дастгоҳнинг кинематик схемаси: 1-планшайба; 2-текислагич; 3-ростлагич.



III.9-расм. Текислашда ярим-ўтказгич пластинкаларнинг жой-лашиши: 1-юк; 2-планшайба; 3-яримўтказгич пластинкалар; 4-абразив суспензия; 5-текислагич.

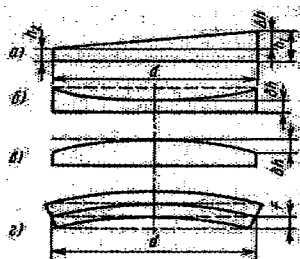
III.9-расмда текислаш жараёнида яримўтказгичли пластинкалар жойлашиши кўрсатилган.

Силлиқлаш. Пластинкаларни силлиқлаш 3 дан 0,25 мкм абразив ёгли пасталар сингдирилган юмшоқ тагликлар (фетр, велюр ёки батист матолари) ёрдамида амалга оширилади. Бундай пластинкаларнинг сирт тозалиги V_{14} ва ундан юқори синфларга тўғри келади. Яримўтказгичли пластинкаларни силлиқлашда олмос кумлар ва кум паста, кубик бор нитриди, алюминий оксиди, церий оксидлари, хром ва кремний асосидаги пасталардан фойдаланилади. Силлиқлаш учун олмосни қўллаш ҳамма вақт ҳам яхши натижалар бермайди, чунки сиртда микроскопик шакл — олмос доғи қолади. Юмшоқ абразивлардан, масалан, хром, цирконий ёки кремний оксидидан фойдаланиш унумдорликни камайтирса-да, бироқ юқори синф тозалигидаги сиртни олиш имконини беради.

11.6. МЕХАНИК ИШЛОВДАН СЎНГ ПЛАСТИНКАЛАР ВА КРИСТАЛЛАР СИФАТИНИ НАЗОРАТ ҚИЛИШ

Механик ишловдан сўнг пластинкалар ва кристаллар сифатини баҳолаш қуйидаги асосий меъёрлар билан аниқланади: геометрик шаклнинг такомиллиги (нопараллеллик, пластинкалар эгилиш даражаси); механик бузилган қатлам қалинлиги, сирт ғадур-будурлиги; рухсат этилган чегарадаги қалинликка мослиги.

Пластинкалардаги асосий нуқсонлар кўриниши III.10-расмда кўрсатилган.



III.10-расм. Пластинкалардаги асосий нуқсонлар кўринишлари.

Пластинка сирт текислиги оғиши δh бу ҳақиқий сирт нуқтасидан ўтказилган тўғри чизик ёки текисликкача бўлган энг катта масофа (III.10, б, в-расм). Пластинкаларнинг эгрилиги f -радиал кесимда ҳақиқий шакл нуқтасидан сиртда ётувчи тўғри чизиккача бўлган масофа (III.10-расм, г). Пластинкаларнинг эгриланиши қолдиқ механик кучланишлар фарқидан

ва бир томонлама ишлов бериш натижасида пайдо бўлиши мумкин.

Пластинкалар ва кристаллар нуқсонларини назорат қилиш амалларни бажариш оралигида ва асбобнинг охириги ишловидан сўнг қилинади. Механик ишловларнинг охирида сиртда бузилишлар ҳосил бўлмаслиги учун контактсиз оптик ёки фотоэлектрик усулларда нуқсонлар назорат қилинади. Механик бузилган қатлам қалинлиги рентгенографик ёки электронографик усулда юпқа қатламини кетма-кет электрохимийёвий усулда олиш билан монокристалл учун тўғри келадиган рентгенограмма (электронограмма) олгунгача аниқланади.

13-14 синф тозаллигидаги сиртлар интерференцион усулда Линник микроскоплари ёрдамида назорат қилиш мумкин.

Назорат саволлари

1. Монокристалларни кесишнинг қандай усуллари бор? ҳар бир усулнинг афзаллиги ва камчиликларини айтинг.
2. Ультратовуш кесиш механизми қандай ишлайди?
3. Пластинкаларни текислаш нега керак? Силлиқлаш-чи?
4. Сирт сифатини назорат қилишнинг қайси усуллари биласиз?
5. Кремний пластинкаларга қандай талаблар қўйилади?
6. Абразив материаллар нима ва абразив ишлов нимадан иборат?

12-БОБ. ЯРИМЎТКАЗГИЧ ПЛАСТИНКАЛАР ВА КРИСТАЛЛАРГА КИМЁВИЙ ВА ЭЛЕКТРОКИМЁВИЙ ИШЛОВ БЕРИШ

12.1. УМУМИЙ МАЪЛУМОТЛАР

Яримўтказгичли асбоблар ишлаб чиқаришда кимёвий жараёнлар намуналарни кристаллографик йўналтиришдан бошлаб то тайёр асбобнинг корпуси занглашига қарши қоплама ўтказишгача деярли барча технологик босқичларда қўлланилади.

Кимёвий ишлов асбобнинг тури ва технологик жараёнинг боришига қараб турли усуллар билан бажарилади. Кимёвий ишлов механик ишловдан сўнг амалга оширилади. Унинг натижасида яримўтказгичнинг механик ишловда бузилган қатлами кетказилади ва сирт тозалигига эришилади. Баъзи бир ҳолларда кимёвий ёки электрокимёвий ишлов пластинкалар сиртида турли геометрик рельеф (андозалар) олиш учун ҳам қўлланилади.

Кимёвий қайта ишловларни бажариш ва тугатиш диққат билан назорат қилинади. Айниқса, асосий диққат кимёвий реактивларга берилиши керак, уларнинг тозалиги яримўтказгич материалларнинг тозалик синфидан кичик бўлмаслиги зарур.

Кимёвий ва электрокимёвий ишловни қўллаш билан қуйидаги вазифалар бажарилади:

- 1) сиртни тозалаш ва турғунлаштириш;
- 2) сиртни шакллантириш;
- 3) яримўтказгич материал ёки *p-n*-ўтиш сифатини назорат қилиш;
- 4) яримўтказгич сиртига турғунловчи, ҳимояловчи ёки контакт ҳосил қилувчи қопламалар ўтқизиш.

Биринчи гуруҳга яримўтказгич сиртини оксид пардалар ва турли хилдаги четки ифлосликлардан тозалаш; механик бузилган қатламни кетказиш; сиртни турғунлаш; тайёр ас-

боб тавсифларини ўзгартириш мақсадида *p-n*-тузилмаларни едиришлар киради.

Иккинчи гуруҳга механик бузилмаган қатлам қалинлигидаги кристалл ва пластинкалар олиш учун бошқарувли кетказиш, сиртда талаб даражасидаги шаклни олиш, қуймаларни пластинкалар ва кристалларга ажратиш киради.

Учинчи гуруҳга кристалл тузилмалар нуқсонларини ошкор этиш: дислокациялар, блок ва донадорлик чегаралари, эгизаклик чегаралари ва бошқалар; киришмалар тақсимидаги нотекисликларни, *p-n*-ўтиш чегарасини, преципитатлар ва бошқаларни ошкор этиш амаллари киради.

Тўртинчи гуруҳга сирт хоссаларини барқарорлаш, уни ҳимоялаш мақсадида қопламалар (оксидлар, фосфатлар, хроматлар) ўтказиш; контактлар ҳосил қилиш учун металл қопламаларни кимёвий ёки электрокимёвий ўтказиш киради.

Юқорида санаб ўтилган ишларни фақат кимёвий ёки электрокимёвий йўл билан бажариш мумкин.

Яримўтказгичлар асбоблар ишлаб чиқаришда едириш, одатда ёғсизлантиришдан сўнг амалга оширилади. Чунки, бу ҳолатда едиргич пластинка сиртини тўла ҳўллайди ва ташқи қатлам текис емирилади.

Биз едириш жараёнини тавсифлашдан олдин кимёвий тозалаш тўғрисида тўхталиб ўтамиз.

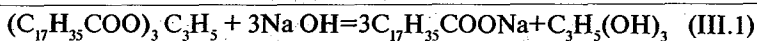
12.2. ЯРИМЎТКАЗГИЧ ПЛАСТИНКАЛАРНИ ОРГАНИК ЭРИТМАЛАРДА ТОЗАЛАБ ЮВИШ

Бу кўринишдаги ишлов бериш — кимёвий реакциялар натижасида сиртдаги ифлосликларни парчалаш йўли билан тозалашдан иборат.

Кимёвий ёғсизлантириш деганда ишлов берилувчи материалга таъсир қилмайдиган, бироқ ёғ молекулаларини парчаловчи жараёни бажарувчи таркиб тушунилади. Бу жараёнда тескари ифлосланиш рўй бермай, барча ёғ молекулалари эритмага ўтади.

Ювувчи кукун эритмаларда ёғсизлантириш, асосан елимланган пластинкаларни механик силлиқлангандан сўнг тўғридан-тўғри дастлабки тозаловни бажариш учун қўлланади. Ёғсизлантириш жараёнида сувда туз эритмасидан иборат бўлган совун пластинка сиртидаги совунли ёғлар эритмасига ўтади, сўнг сувда ювиб тозаланади.

Совунланиш ёғларига мураккаб эфирлар, глицерин ва юқори молекулали органик кислоталардан (стеарин, олеин, пальмитин ва бошқалар) таркиб топган ўсимлик ва ҳайвон ёғлари киради. Масалан, стеариннинг совунланиш жараёнини қуйидаги тенгламадан кўриш мумкин.



бу ерда $C_{17}H_{35}COONa$ -натрий стеарати (совун); $C_3H_5(OH)_3$ -глицерин. Иккала модда сувда осон эрийди.

Ишқорларда ёғсизлантириш кимёвий реакция (12.1) асосида рўй беради. Бунда совунланмайдиган ёғлар парчаланмайди, бироқ сирт — фаол моддага ишқорни киритилишида эмульсия ҳосил бўлиши мумкин. Тозаланувчи сиртга ифлосликларнинг қайта ўтиришига эмульсия тўсқинлик қилиб, ифлосликларни ювувчи эритма ушлаб қолади. Эритмада ишқорнинг доимий зичлигини ушлаб туриш учун ишқорий металл тузлари қўшиб турилади, улар сув билан ўзаро таъсир қилиб, ишқор ҳосил қилади.

Ёғсизлантириш жараёни турли усулларни қўллаш (бо-тириш, пуркаш ва ультратовуш ванналарда) билан 70-90°C температураларда олиб борилади.

Пероксид аммиакли ёғсизлантирувчи эритмалар водород пероксид, аммоний гидроксид ва сувдан ($H_2O_2:NH_4OH:H_2O = 1:1:4$) ташкил топиб, яримўтказгичли асбоблар ва интеграл микросхемаларни тайёрлашнинг турли босқичларида кенг қўлланилади. Бундай эритманинг ёғсизлантириш хосса-си органик эритувчиларга нисбатан яхши бўлиб, универсал ҳамдир. Чунки, улар совунланадиган ва совунланмайдиган ёғларни, ноорганик ифлосликларни ҳамда натрий, мис, қумуш ва бошқа металллар ионларини кетказди.

Ёғсизлантириш жараёнида водород пероксид атомар кислород чиқариш билан парчаланади:



Атомар кислородни ажралиб чиқиши температурага бог-лиқ бўлганлиги учун жараён 80-90°Cда олиб борилади. Ато-мар кислород органик ва ноорганик ифлосликларни оксид-лайди. NH_4OH ишқор переоксидни ажралиш реакция-сини

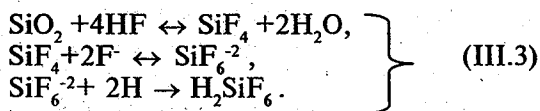
тезлаштиради. Натижада совунланиш ёки ёғларнинг эмульсияси ҳамда Менделеев даврий системасидаги биринчи ва иккинчи гуруҳ элементларини эритиб яхши эрийдиган комплексларни боғлайди. Жараён органик ифлосликлар оксидланишида карбонат газини жадал ажралиб чиқиши кўпиксимон кўринишда ўтади.

12.3. КИСЛОТАЛАРДА ЮВИБ ТОЗАЛАШ

Бу усул сиртни ёғ атомлар ва металл ионлари, ёғли ифлосликлар ҳамда оксидлар, нитридлар, сульфидлар ва бошқа кимёвий бирикмаларда тозалашда қўлланилади. Металл ионларни узоқлаштириш уларни водород ионлари билан ўрин алмаштириши кўринишида боради. Металл атомларини кетказиш учун металлларни эритувчи кислоталар ишлатилади. Тозаланувчи сиртда металл атомларини қайтадан адсорбциясини бартараф қилиш учун комплекс ҳосил қилувчилар қўлланилади. Улар металл ионлар билан турғун бирикмалар — комплекслар ҳосил қилади ва эритмада қолади.

Кремний пластинкалар сиртидан оксид пардаларни кетказиш учун водород фториди кислотанинг ацетондаги эритмаси 1:15 (ҳажмий) нисбатда қўлланилади.

Бу ишда ацетон қўлланилишига сабаб, у кремний пластинка сиртини фторли кислота билан ифлосланишини камайтиради ва бу ҳолда реакция қуйидагича кетади:



12.4. СУВ БИЛАН ЮВИБ ТОЗАЛАШ

Сув билан ювиш, мойсизлантиришдан сўнг, кутбли эритма қолдиқларини, едиргич қолдиқларини, флюсларни, кислоталарни, ишқорларни, тузларни ва бошқа ифлосликларни кетказиш мақсадида қўлланилади.

Сувда кўпчилик тузлар, кислоталар ва ишқорлар эрийди. Юқори температураларда сув кўпчилик металллар билан таъсирлашади. Табиатда сув турли киришмалар, чанглар, газлар,

кимёвий элементлар, микроорганизмлар билан ифлосланади. Шунинг учун ҳам табиий сув яримўтказгичли асбоблар ва ИМСларни тайёрлашда умуман қўлланилмайди.

Яримўтказгичли асбобларни тайёрлаш жараёни дастлабки босқичларида дистилланган сув ва кейинги босқичларида эса ионсизлантирилган сувдан фойдаланилади.

Тоза сувни олишда аввало табиий сувни механик киришмалардан тозалаш учун, қум ва майда шағал қатламлари орқали филтрланади, микроорганизмлар эса хлорлаш билан тозланади. Сувни кейинги тозалаш кўп мартабала ҳайдаш билан бажарилади. Уни **дистилланган сув** деб аташади.

Дистилланган сувда етарли катта миқдорда киришмалар бўлади. Киришмалар миқдори 1 мг/л да ўлчаниб, улар сульфатлар, хлоридлар, кальций нитрати, оғир металллар ва бошқалар бўлиши мумкин. Шундай қилиб, дистилланган сувни р-п-ўтишларни ва яримўтказгичли тагликларни ювиш учун ишлатиш мумкин эмас. Одатда уни яримўтказгичли асбобнинг корпус ва қисмларини ювишда ва маҳсулотни кимёвий едиришдан олдин қўллаш мумкин.

Ўта юқори тозаликдаги, яъни ионсизлантирилган сувни олиш учун дистилланган сув қўшимча тозаланadi. Бунинг учун дистилланган сувда мавжуд бўлган ноорганик киришмалар: катионлар Fe^{2+} , Cu^{2+} , Na^{+} , ва анионлар NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} ва бошқалардан тозалаш зарурдир. Тоза сувни олиш учун ион алмаштириш усулидан фойдаланилади, яъни гетероген системада сув ва ионит ўртасида ионлар алмашинуви рўй беради. Ионитлар сифатида одатда турли ҳилдаги ион алмаштирувчи смолаларда фойдаланилади. Смолалар, икки хил катион $[\text{R}-\text{H}]$ ва анионларга $[\text{R}-\text{OH}]$ бўлинади. Бу ерда R-смоланинг полимер асоси, H, OH актив ҳолатда комплекс ҳосил қилувчи гуруҳлар. Смолалар шарча кўринишида бўлиб, уларнинг ўлчами 1-5 мм ни ташкил қилади.

Агарда дистилланган сув олдин катионит смолалар тўлдирилган идиш орқали ўтказилса, унда смолалар мусбат зарядланган металл катионларни ушлаб қолади.

Агарда шу жараёндан сўнг анионит смола тўлдирилган идиш орқали сув ўтказилса, унда сув таркибидаги манфий зарядланган анионларни ушлаб қолади.

Яримўтказгичли асбоблар ишлаб чиқариш саноатида ионсизлантирилган сувларни икки хили А ва В маркалари қўлла-

нилади. Тозаланган сувларнинг тавсифий параметрлари III.2-жадвалда кўрсатилган.

III.2-жадвал

Марка	300 К да солиштирма қаршилиги, Ом см	Оксидланиш мг/л дан катта эмас	Кремний кислотасининг мавжудлиги, мг/л
Дистилланган сув	$1 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^5$	12,0	10,0
Ионсизлантирилган сув (Б марка)	$1 \cdot 10^6$ дан кичик бўлмаган	2,5	1,0
Ионсизлантирилган сув (А марка)	$7 \cdot 10^6$ дан кичик бўлмаган	1,3	0,2

Ювиб тозалаш жараёни $50-60^\circ\text{C}$ гача иситилиб ионсизлантирилган сувда амалга оширилади. Бу жараённи паст температураларда олиб боришнинг самарадорлиги кам, юқори температураларда эса ишлов берилаётган сиртга баъзи бир чўкмалар ўтириб қолиши мумкин. Масалан, ишқор тузлари гидролизи натижасида ишқорий эритмалар қолдиқлари юзага келиши мумкин.

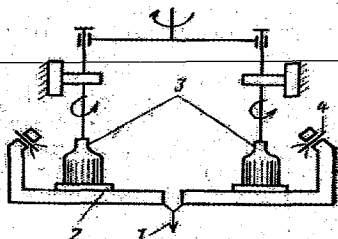
Сув билан ювиб тозалаш кўп каскадли ванналардан ўтказиш, кичик оқим, гидромеханик усул, ультратовуш ванналарда ва бошқаларда билан бажарилади.

Ботириш билан ювиш ўта ифлосланган пластинкаларни тозалаш учун лаборатория шароитида қўлланади. Бу жуда содда усулдир.

Кўп каскадли ванналардан ўтказишда ювиб тозалаш пластинкалардан ифлосликларнинг узлуксиз кетишини таъминлайди. Пластинкали кассеталар бир ваннадан иккинчи ваннага сув оқимига қарама-қарши ҳаракатлантирилади.

Кичик оқимда ювиб тозалаш сув айланиш ва сувни иситиш қурилмаларида бажарилади. Центрафуга дискида ҳаракатланаётган пластинкаларга $50-200$ кПа босим остида форсунка орқали сув берилади. Центрафуганинг айланиш частотаси $200 \dots 600$ айл/мин. Кичик оқимда ювиб тозалаш афзаллиги шундаки, сувнинг узлуксиз алмашилиши ва оқимнинг гидромеханик таъсири пластинкалар сиртидан ифлосликларни самарали кетишини таъминлайди.

Гидромеханик ювиб тозалаш мураккаб ҳаракатланувчи сунъий ёки ҳайвон жунларидан тайёрланган чўткалар ёрдамида бажарилади (III.11-расм).



III.11-расм. Гидромеханик ювиб тозалаш жараёнининг схемаси:
1-сўвни тўкиш; 2-ишлов берилувчи пластинка; 3-чўткалар; 4-сўвни бериш.

Бу усул пластинка сиртига сўвнинг ёпишқоқлигини ошириб ифлосликни механик кетказишга олиб келади. Пластинкалар вакуум усул билан маҳкамланади. Ионсизлантирилган сўв босим остида берилади. Чўтканинг тезда ифлосланиб қолиши бу усулнингасосий камчилиги ҳисобланади, шу боис ҳам чўткани даврий тозалаб туриш зарур бўлади.

12.5. ЕДИРИШ

Яримўтказгичли тагликларга кимёвий ишлов бериш жараёни кислотали ёки ишқорий едиргичларнинг сирт қатламига таъсир этишга асосланган. Ушбу жараён яримўтказгич материал билан едиргич орасида икки турдаги муҳит чегараси оралиғида: қаттиқ таглик ва суюқ едиргич бўлади. Таглик билан едиргич кимёвий ўзаро таъсирининг бошқача хусусияти шундан иборатки, едириш жараёни мувозанатли бўлмай ювилган яримўтказгич материалнинг ҳажми едиргичникидан кам. Едиргичнинг ортиқчалиги ва унинг температураси ўзгармас бўлиши туфайли кимёвий ишлов жараёнини ўзгармас тезликда олиб бориш мумкин. Натижада яримўтказгич материалдан кетказилаётган қатлам қалинлигини аниқ ҳисоблаш мумкин. Бироқ шуни ҳисобга олиш керакки, едириш тезлиги яримўтказгич пластинкани механик бузилган қатламдаги билан бузилмаган қатламда бир хил эмас. Бу механик бузилган қатламда яримўтказгич материал билан едиргич ўртасидаги ўзаро таъсир жадал майдонини катталиги билан тушунтирилади. Демак, механик бузилган қатламда едириш тезлиги катта бўлади.

Яримўтказгич материалларни ўз-ўзидан эритилишининг иккита назарияси — кимёвий ва электрокимёвий назариялари мавжуд. Кимёвий назарияга асосан яримўтказгич материални эритиш икки босқичда рўй беради: олдин материал оксидланади, ҳосил бўлган оксид эритмага ўтади (эрийди).

Электрокимёвий назарияга асосан, яримўтказгич материал билан едиргич орасидаги ўзаро таъсир оксидланиш ва оксид эритилиши кимёвий жараён билангина чегараланмайди, у анод ва катод жараёнлардан иборат. Бунда яримўтказгич пластинкани турли қисмлари орасида маҳаллий тоқлар ўтиши билан кузатилади. Едиргичга яримўтказгич тағликларни ботиришда тағлик-едиргич оралик сиртида қўш электрик қатлам ҳосил бўлади, электролит ва тағлик орасида потенциал фарқ вужудга келади ҳамда яримўтказгични эритилишининг электрокимёвий жараёни бўлишига олиб келади.

Яримўтказгичларни суюқ едириш учун турли таркибдаги едиргичлар мавжуд. Ҳар қандай едиргичда иккита мажбурий таркибловчи- оксидловчи ва оксидни эритувчи бўлиши керак.

Оксидловчи сифатида HNO_3 , H_2SO_4 минерал кислоталар, H_2O_2 , Na_2O_3 пероксидлар, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, KMnO_4 , NaClO комплекс тузлардан фойдаланиш мумкин.

Оксидни эритувчилар сифатида галоид таркибли HF , HCl кислоталар, KOH , NaOH гидроксидлар ва бошқа бир қанча моддалардан фойдаланилади. Сув, қўлланилиш шароитга қараб, оксидловчи ва комплекс ҳосил қилувчи вазифаларини бажариши мумкин.

Ундан ташқари, едиргичлар таркибидаги асосий таркибловчилардан ташқари едириш тезлигини бошқарувчи-секинлаштиргичлар ёки тезлаштиргичлар қўшилади. Секинлаштиргичлар орасида анча кенг тарқалгани карбонат кислоталар, яъни улардан бири сирка кислота ишлатилади.

Тезлаштиргичлар кўп ҳолларда яримўтказгични қўшимча фаол оксидловчи бўлиб, едириш жараёни тезлигини орттиради. Тезлаштиргичлар сифатида оғир галогенлар (Br_2 , I_2), унга мос кислоталар (HBr , HI) ёки тузлар (KBr , NaI) дан фойдаланилади. Булардан энг кўп қўлланиладигани бромдир.

Германийни едириш. Германийга кимёвий ишлов бериш учун турли таркибли едиргичлар ишлатилади. Германий учун асосан азот кислота (HNO_3) ва водород фториди (HF) ҳамда

водород гидроксида (H_2O_2) каби едиргичлардан фойдаланилади. Азот кислота германийни кучли оксидловчи бўлса, ўткир кислота (HF) германий икки оксидини осон эритади. Водород пероксидини германий учун едиргич сифатида ишлатганда кимёвий жараён $70-80^{\circ}C$ температурада олиб борилади. Кимёвий реакцияни тезлаштириш учун бром, секинлаштириш учун эса, сирка кислота қўшиш мумкин.

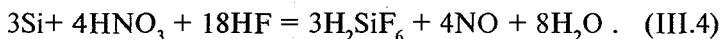
Кимёвий ишловнинг асосий параметри германийни едириш тезлигидир. Турли таркибдаги едиргичлар ва турли кристаллографик йўналишга едириш тезлиги бир-биридан фарқ қилади. Германийнинг эриш тезлигидаги фарқлар кристалл панжарадан атомларни ажратиб олиш учун керак бўлган энергияни бир хил бўлмаслигидан келиб чиқади.

Германий учун энг кўп қўлланиладиган едиргичларга қуйидагилар киради (12.2-жадвал);

III.3-жадвал

Едиргич тури	Таркиби	Қўлланилиши
Едиргич N:2	1мл H_2O_2 ; 1мл HF ; 4мл H_2O	(100) сирт учун
Ишқор-пероксидли	8г $NaOH$; 100мл 30%ли H_2O_2	Турли кристаллографик текисликлар учун
Cr-4	25мл HNO_3 , 15мл HF , 15мл CH_3OOH , 0,3мл Bz	Барча кристаллографик йўналишлар учун
Кукунли едиргич	1г HNO_3 ; 22 HF ; 2г 50% $AgNO_3$ эритма	Дислокацияларни аниқлаш учун

Кремнийни едириш. Кремний учун едиргичларни танлаш германийга нисбатан чегараланганлиги кремний сиртининг доимо турғун оксид SiO_2 бўлишлиги билан аниқланади. Шунинг учун кремний учун асосан ишқорлар ва кислоталардан фойдаланилади. Кислотали едиргичлар сифатида азот ва ўткир кислоталарнинг турли аралашмалари қўлланилади. Кремнийни едириш жуда катта тезлиги $HNO_3 : HF = 1:4.5$ мол нисбатда бўлади. Бундай таркибли едиргичда кремний эриши қуйидаги реакция бўйича кетади.



Ишқорий едиргичлар сифатида KOH ва $NaOH$ нинг (10-20%) сувли эритмаларидан фойдаланилади. Ишқорий

таркибда кремнийни едириш 90-100°C температурада ўтказилади. Ишқорий едиргичларда ишлов бериш кремний сиртини талаб даражасидаги силлиқлигини бермайди. Шунинг учун бу едиргич саноатда кенг қўлланилмайди. Бироқ анизотроп едиришда, яъни сиртда қандайдир шакл ҳосил қилишда (V кўриниш) қўллаш мумкин.

Ишқорий едиргичнинг камчилиги ишқорий металл ионлари билан кремний сиртини ифлосланиши бўлиб, уни кетказиш анча қийин. Бундай едиргичда ҳосил қилинган сирт шакли нотекис ва у механик ишлов бериш сифатига кучли боғлиқ.

12.3-жадвалда Si учун HNO_3 -HF асосидаги асосий едиргичлар берилган.

III.4-жадвал

Едиргич тури	Таркиби	Қўлланилиши	Оптимал иш вақти
Ср-8 .	HNO_3 -2, HF-1	Кимёвий силлиқлаш	1-2 мин
Ср-4А	HNO_3 -5, HF-3 CH_3COOH -3	Кимёвий силлиқлаш, р-п-ўтиш чегараси пайдо қилиш.	2-3 мин
Уайт едиргич	HNO_3 -3, HF-1	(111)текислик бўйича силлиқлаш	15 с
Дэш едиргичи	HNO_3 -3, HF-1 CH_3COOH -8	Барча текисликлар бўйича секин кимёвий силлиқлаш	1дан 16 соатгача

Кремнийда асосий кристаллографик текисликлар бўйича едириш тезлиги қуйидаги муносабатларда бўлади: (110)>(100)>(111)-кислотали едиргичлар учун ва (100)>(110)>(111)-ишқорий едиргичлар учун.

Кремний карбидини едириш. Кремний карбиди (SiC) бир қанча юз градус (°C) температураларда кимёвий таъсирларга ўта чидамли. Юқорида кўрилган едиргичларни бирортаси ҳам карбид кремнийдан тайёрланган таглик сиртини ишловдан ўтказолмайди.

Кремний карбиди учун едиргичлардан тўғри келадигани таркибида эриган тузлар ва ишқорлар бўлади. Мисол тариқасида карбид кремний учун бир қанча едиргичларни 900°C темпе-

ратураларда эриган NaOH (KOH); 1000°C температурада эриган туз K_2CO_3 ; 1000°C температурада 3:1 муносабатда олинган эриган тузлар Na_2CO_3 ва K_2CO_3 ни кўрсатиш мумкин.

Галлий арсенидини едириш. Галлий арсениди ишқорий ва кислотали едиргичларда едирилади. Тажрибада 5% ли сувли эритма NaOH ва 30%ли водород пероксиди 5:1 муносабатда олинган ишқорий едиргичдан $40\text{--}60^\circ\text{C}$ температурада тагликка кимёвий ишлов бериш учун фойдаланилади.

Азот ва хлорид кислота ва сув аралашмасидан 1:2:2 муносабатда олинган кислотали едиргич $25\text{--}30^\circ\text{C}$ температурада (111) текисликда йўналган галлий арсениди тагликни едириш учун фойдаланилади.

Галлий арсенидни таглик учун жилвирловчи сифатида таркибида азот ва водород фториди, кислота ва сув 3:1:2 муносабатда олинган едиргичдан фойдаланилади.

Маҳаллий эпитакия учун ҳамда яримўтказгич тузилмаларни алоҳида соҳаларда ажратиш учун галлий арсениди тагликни тайёрлашда анизотроп едириш анча қизиқиш уйғотади. Галлий арсенидини анизотроп едириш учун сув, водород пероксид ва олтингугуртли кислота 1:8:1 муносабатда олинган аралашмадан фойдаланилади. Тагликда яхши едирилган уяни олиш учун едиргич аралашма таркибида олтингугурт кислотанинг ҳам бўлиши билан амалга оширилади.

Умуман олганда, юқоридаги GaAs га қўлланилган едиргичларни, $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ ва $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ яримўтказгич бирикмаларни едиришда ҳам қўллаш мумкин.

12.6. ЯРИМЎТКАЗГИЧ ПЛАСТИНКА ВА КРИСТАЛЛАРНИ ЕДИРИШ УСУЛЛАРИ

Яримўтказгич пластинка ва кристалларни едириш жараёни махсус идишларда ўтказилиб, идиш материал бир қанча талабларга жавоб бериши керак. Асосийлардан бири, идиш материали ҳатто эритма-едиргични қайнаш температурасида ҳам ўзаро таъсирлашиши керак эмас.

Агар едириш температураси $150\text{--}200^\circ\text{C}$ дан кичик бўлса, уни фторопласт материалидан тайёрланган идишларда амалга оширилади. Бу материал кенг температуралар оралиғида минерал кислота ва ишқорий эритмаларга нисбатан етарлича кимёвий чидамли. Фақат ишқор металллар эритмасида

ва юқори миқдорда мавжуд бўлган элементар фтор ва хлор муҳитида қизиш туфайли фторопластининг жадал ажралиши кузатилади.

Агар едириш жараёни 200°C температурадан юқорида ўткир муҳитда олиб борилса, унда платина пиролитик бор нитриди, лейкосапфир, юқори зичликли пиролитик графит ва бошқалардан тайёрланган идишлардан фойдаланилади.

Едиришнинг биринчи усули, яъни кимёвий жараёни тагликни қўзғалмас ҳолда олиб бориш, уни ясси параллеллиги кескин бузилишига ва чекка қирғоқларида уюмлар ҳосил бўлишига олиб келади.

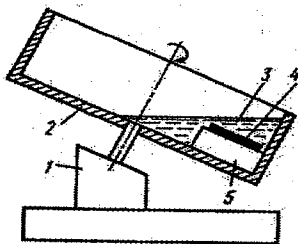
Шунинг учун ҳозирги пайтда юқоридаги камчиликларни йўқотиш мақсадида яримўтказгичли тагликларни кимёвий-динамик ишлов бериш қондасига асосан, тўғридан-тўғри таглик сиртида едиргичнинг жадал аралашishi ва тагликнинг ўзгармас тезликда айланиб туришидан фойдаланилади.

Маълумки, яримўтказгич материални едириш тезлиги биринчи ўринда, таглик сиртидан реакция маҳсулотларининг кетиши ва таглик-едиргич чегарасида янги едиргич эритманинг келиш тезлигига боғлиқ. Едиргичнинг узлуксиз аралаштирилиши едириш камераси ҳажми бўйича едиргич таркиби тезда тенглашиб туриши имконини беради ва натижада яримўтказгич тагликка кимёвий ишлов бериш жараёни текис ўтишига олиб келади.

Кимёвий-динамик ишлаб бериш жараёни таглик сиртининг юқори даражада ясси параллеллигини таъминлайди, кам вақт сарфланади ва кам реактивлар кетади ва бу жараёни автоматлаштириш мумкин бўлади.

Ҳозирги пайтда яримўтказгичлар технологиясида кимёвий-динамик ишлов бериш қурилмаси қўлланилмоқдаки, унинг ёрдамида 14-синфга тўғри келувчи тозаликдаги силлиқ сиртга эга бўлган яримўтказгичли таглик олинмоқда.

Кимёвий-динамик едириш қурилмасининг схемаси III.12-расм-



III.12-расм. Пластикаларни кимёвий-динамик едириш учун қурилма схемаси:

1-ҳаракатлантиргич; 2-фторопласт идиш; 3-едиргич; 4-пластинка; 5-диск.

да кўрсатилган. Бу ерда едиргич аралашини 45°С бурчак остида фторопласт идиш (2) ичига жойлаштирилган диск (5) га пластинкалар маҳкамланган ва идиш двигатель ёрдамида айланма ҳаракатга келтирилади. Ҳаракатлангич айланиш такрорийлиги ва едиргич (3) ёпишқоқлигини ўзгартириш билан пластинка сиртини текислаш, яъни жилвирлашни юқори тезликда бажариш мумкин.

12.7. СИРТГА ЭЛЕКТРОКИМЁВИЙ ИШЛОВ БЕРИШ

Яримўтказгичлар технологиясида кимёвий ишлов бериш билан бирга электрокимёвий ишлов бериш ҳам кенг қўлланилади. Бу ишлов р-п-ўтиш чегарасини очиш, киришма тақсимоти шаклини, электрокимёвий жилвирлашни, электролитик кесишни, локал шакллашни, алоҳида соҳаларда кристаллнинг ўта юпқа қатламларини олиш, гальваник қопламалар ўтказиш ва бошқа мақсадлар учун ишлатилади.

Яримўтказгич тагликларга электрокимёвий ишлов бериш иккита жараён — электролитик анод эритиш ва яримўтказгичли материалларни механик силлиқлашдан иборат.

Электролитик анод эритиш жараёни ишлов берувчи яримўтказгич материалга мусбат потенциал бериш билан амалга оширилади. Электролитга чўктирилган таглик ва металл электрод орқали ток ўтказилса, унда электролиз жараёни бошланади. Бунда электролитлар кимёвий парчаланиши юз беради.

Барча жараён оксидлаш-тикланиш реакцияларидан иборат бўлиб, анод оксидловчи сифатида электронларни қабул қилади. Катод эса тикловчи, чунки у электронларни беради. Шундай қилиб, яримўтказгичли материалларни электролитик едириш иккита электролитик жараёнлардан: анодли эритиш ва катодли тикланишдан иборат. Анионлар ва катионлар электродларда ўз зарядларини йўқотиб, электродлар эритмалар билан қайтадан яна иккиламчи ўзаро таъсирлашишга киришади.

Кремнийни электролитик анод эритиш, асосан водород фториди (HF) кислота эритмаларда ўтказилади. Амалда таркибида водород фториди, фторид аммоний ва глицерин бўлган электролит кенг қўлланилмоқда. Кремнийни анод эриш жараёни ўзи кичик ток зичликларида ўтказилади.

Анод ток зичликлари ($20-50\text{mA}/\text{cm}^2$) кичик бўлган ҳолларда кремнийнинг эриши жараёнида фторли икки валентли кремний бирикмасининг қалин аморф пардаси ҳосил бўлиши кузатилади. Бу пардани таркибига фтор-кремнийли комплекс Si F кириб, водород ажралиб чиқиши билан сувда эрийди.

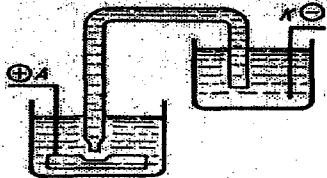
Катта ток зичликларида ($50-70\text{mA}/\text{cm}^2$) анод оксидланиш жараёни тезлашади ва электролит орқали оқаётган ток камаяди. Бироқ оксидланиш жараёни тезланиши электролит ҳажмидан водород фторид кислота молекулаларининг диффузияси билан чегараланган. Бу ўз навбатида фторли бирикмалар ҳосил бўлишини қийинлаштиради ва тўрт валентли шаклда кремний анод эриши янги электролитик жараённи бошлаб беради. Бу жараён кремний-фторли кислота маҳсулотини беради.

Янада юқори ток зичликларида ($80-150\text{mA}/\text{cm}^2$) кремний икки оксиди пассивловчи пардаси, яъни анод оксидланиши бошланади, кремний анод эриш жараёни тўхтайд.

Кремнийнинг электролитик анод эриш жараёни бир қанча афзалликларга (пластинка четларида дўнгликлар бўлмаслиги, пластинкалар юқори ясси параллеллиги ва ишловнинг юқори синфдаги тозаллиги) эга, қайсики бу жараёндан тағлиқни тайёрлашда фойдаланиш имконини беради.

Электролитик усуллардан яна бири яримўтказгич сиртининг чекланган жойига электролитик таъсир қилдириш бўлиб, у турли хилдир. Улардан бири **виртуал катод усули** бўлиб, сиртда турли шакл ҳосил қилишда қўлланилади (III.13-расм).

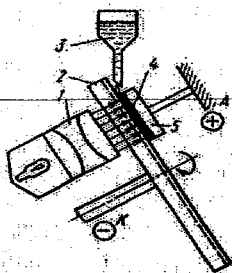
Электролит билан тўлдирилган ваннага яримўтказгич пластинка жойлаштирилган. Катод ячейка аноддан ажралган ҳолда электролитли най билан боғланган. Шундай қилиб, анод ва катод ячейкалар электролит орқали гальваник боғланган.



III.13-расм Виртуал катоддан фойдаланган ҳолда сиртда электрохимёвий шакллантириш қурилма схемаси.

Агар электролит солиштирма қаршилиги яримўтказгич солиштирма қаршилигидан етарли даражада катта бўлса, унда эриш фақат виртуал катод яқинидагина рўй беради. Катод найли чиқиш тирқишларини ўзгартириб ва маълум дастур асосида кўчириш

билан яримўтказгич сиртида жуда катта аниқликда ҳар қандай шаклни 400 мкм чуқурликда ҳосил қилиш мумкин.



III.14-расм. Яримўтказгич сир-

тини жилвирлашнинг анод-механик схемаси: 1-махсус ёритгич системаси; 2- металл катод диск; 3-томчилагич; 4-яримўтказгич пластинка; 5-металл анод диск; 6-анод; 7-катод. Катод диск махсус суъний то- лали қоғоз билан ўралган бўлиб, томчилагич (3) ёрдамида у электролит билан ҳўлланилиб турилади.

Яримўтказгич тагликларни **анод-механик едириш** жараёни бирданига иккита усулни: элек- тролитда яримўтказгич матери- алнинг анод эриши ва жилола- нишга механик таъсирдан фой- даланишга асосланган.

Амалда яримўтказгич плас- тинкалар сиртини анод-механик жилолаш катта қизиқиш ўйго- тади (III.14-расм). Яримўтказгич пластинка (4) металл анод диск (5)га ёпиштирилади ва плас- тинка сиртида ариқчалар кўри- нишида кесилган металл катод диск (2) билан туташтирилади.

Катод диск махсус суъний то- лали қоғоз билан ўралган бўлиб, томчилагич (3) ёрдамида у электролит билан ҳўлланилиб турилади.

Катод диск 20-30° оған ва у минутига 100 – 200 $\frac{\text{айл}}{\text{мин}}$

частотада айланади. Электрик ўтказувчанлиги п-турдаги яримўтказгичга ишлов берганда пластинкада ковакларни ге- нерациялаш учун махсус ёритгич системаси 1 орқали плас- тинка ёритилади. Яримўтказгичга нисбатан нурланиш акт- нич бўлиши керак, яъни яримўтказгични чегара ютишга тўғри келувчи тўлқин узунликка нисбатан кичик бўлиши керак. Яримўтказгични эритиш ишловида сиртга механик таъсир билан пластинка сиртидан оксидни узоқлашиши тез- лашади ва пластинканинг бутун юзи бўйича юқори синфда- ги сиртга эга бўлиш мумкин.

12.8. БУҒ- ГАЗЛИ ЕДИРИШ

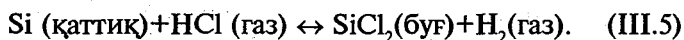
Яримўтказгичли асбоблар ва ИМС ишлаб чиқариш учун планар-эпитаксиал жараёнлар технологияси ривожланиши би- лан кремний, галлий арсениди ва фосфида ва бошқа яри-

мўтказгичларнинг буғ-газ аралашмаларида юқори температурали едириш усули кенг қўлланилмоқда. Газли едириш юқори даражада сирт тозалигини таъминлашдан ташқари, битта реактордан пластинкаларни чиқармасдан эпитаксиал ва оксидлаш жараёнларини қўшган ҳолда бажариши мумкин. Бу усулнинг сирт юқори тозалигини таъминлашига асосий сабаб ташувчи газ оқими яримўтказгич сиртидаги барча чўкма ва яримўтказгичнинг ўзидаги енгил учувчи бирикмаларни қўшиб олиб чиқиб кетади.

Реагентлар сифатида галогенлар F_2 , Cl_2 , Br_2 , водород галогенлар HF , HCl , HBr , HJ , водородли олтингугурт H_2S , олтингугурт гексафторид, турли фреонлар (CCl_nF_{4-n}) ва бошқа актив муҳитлар қўлланилади. Бу реагентлар водородга, аргонга ёки гелийга 1-5% миқдорда қўшилади ва зангламас пўлат баллонларда 100-150 атм босимда сақланади.

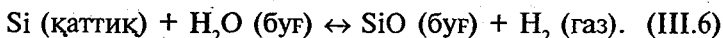
Ушбу ишлов беришнинг бир қанча усулларини кўрамыз.

$HCl + H_2$ аралашмага ишлов бериш. Жараён $1200^\circ C$ температурада герметик камерада ўтказилади. Кремний пластинкалар реакторнинг ишчи камерасига жойлаштирилади ва тозаланган водород оқимида қиздирилади. Ундан сўнг ҳажми бўйича 0,5-2% сувсиз водород хлорид водород оқимида қўшилиб биргаликда оқади. Бунда қуйидаги реакция юз беради:

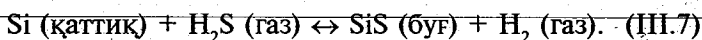


Бу реакциядан кўриниб турибдики, осон учувчи бирикма $SiCl_2$ ёки $SiCl_4$. Худди шунга ўхшаш натижани бошқа аралашмалар ($HBr + H_2$) ва ($HJ + H_2$) дан фойдаланган ҳолда ҳам олиш мумкин. Агарда ишловни юқоридаги аралашмалар учун ҳам ($HCl + H_2$) аралашма учун қўлланган температуралар ва концентрацияларда ўтказилса бир хил натижа олинади.

$(Cl_2 + H_2)$, $(Br_2 + H_2)$ ва $(J_2 + H_2)$ аралашмаларда ишлов. Сув буғида кремнийга ишлов бериш юқори $1250-1270^\circ C$ температурада олиб борилади. Ишчи камерага 0,02-0,1% сув буғи қўшилган водород оқими берилади. Бунинг натижасида сув буғи кремний билан ўзаро таъсир реакцияси қуйидаги кўринишга эга бўлади:



(H₂S+H₂) аралашмага ишлов бериш. Олтингугуртли водороднинг кремний билан ўзаро таъсири юқори ишчи температураларда (1200°С тартибда) юз беради. Реакция кўриниши қуйдагича:



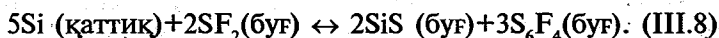
Кремнийга ишлов бериш учун 0,5%ли водород сульфиднинг олтингугурт водород оқимидан фойдаланилади. Бу ишлов (HCl+H₂) ва (H₂O+H₂) да ишлов беришдан анча яхши.

Водород сульфиднинг асосий камчилиги заҳарлигидир.

Буғ-газ аралашма (H₂S+H₂) да ишлов берилган кремний тагликда устирилган эпитаксиал қатламларда жойлашиш нуқсонлар миқдори ва қўшимча уланишлар кам бўлади.

(SF₂+H₂) аралашмага ишлов бериш. Олтингугурт гексафториди водород сульфидга нисбатан заҳар эмас. Олтингугурт гексафторидидан фойдаланиб кремнийга буғ-газ ишлови учун ишчи температурани 1000°С гача тушириш мумкин.

Кремнийнинг олтингугурт гексафторид билан ўзаро таъсир реакцияси қуйдагича:



SF₆+H аралашмага ишлов бериш жараёнида кремнийни маҳаллий (локал) едириш учун фойдаланилади. У ясси чуқур ва ён қирраларига тик чуқурларни олиш имконини беради.

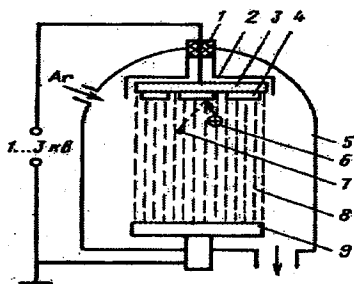
Умуман олганда, буғ-газ ишловда едирилган кремний қатлами 10-15 мкм дан ошмайди. Буғ-газ ишлов беришда ишчи температурани камайтириш учун хлор ва гелий газ аралашмаси ҳамда анча мураккаб таркибли газ аралашмалар, масалан, водород, гелий, водород йодид (HJ) ва водород фторид (HF)дан қуйдаги 80:20:0,5:0,01 нисбатда фойдаланиш мумкин.

12.9. ТАГЛИКЛАРГА ИОН-ПЛАЗМА ИШЛОВ БЕРИШ

Яримўтказгичлар микроэлектроникасида махсус жараёнлардан бири тагликларга ионли-плазма ишлов беришдир, бу жараёнда суюқ едиргичлардан фойдаланилмайди. Жараён моҳияти таркибида актив газлари бўлган тезлаш-

тирилган инерт газ ионлари оқимининг ишлов берилаётган таглик сирти билан ўзаро таъсирига асосланган.

Бу жараёни амалга ошириш учун инерт газ босими вужудга келтирилган ишчи камерага таглик яримўтказгич жойлаштирилади. Ундан ташқари, камерага жойлаштирил-



III.15-расм. Вакуум камерада ион-плазма едириш жараёни схемаси: 1-изоляция; 2-экран; 3-катод; 4-пластинкалар; 5-вакуум камера; 6-бомбардимонловчи аргон иони; 7-пластинкадан сочилган зарра; 8-биқсима разряд плазмаси; 9-анод.

ган электродлар (улар тагликка яқин) ёрдамида турғун биқсима разрядга эришилади. Биқсима разряд фазаси квазинейтрал электрон-ион плазма билан тўлади. Плазмага нисбатан яримўтказгичли тагликка етарли катта манфий кучланиш (1-3 кВ) берилади (III.15-расм).

Натижада плазманинг зарядланган ионлари таглик сиртини бомбардимонлайди ва сиртидан қатлам-қатлам атомларни узиб чиқаради, яъни унга ишлов беради (едиради).

Едириш жадаллиги сочилиш коэффициенти билан характерланиб, у сон жиҳатидан битта бомбардимон қилган ион билан сочилган модда атомларининг миқдорига тенг.

Сочилиш коэффициенти S ишлов берилаётган модда массаси m_1 га, ионнинг массаси m_2 га, энергияси E ва тушиш бурчаги q га боғлиқ. Албатта, у ишлов берилаётган тагликнинг сирт ҳолатига ҳам боғлиқ:

$$S = k m_1 m_2 E / \lambda (m_1 m_2). \quad (\text{III.9})$$

Бу ерда, k — сирт ҳолатини характерловчи коэффициент, λ — θ бурчакка боғлиқ бўлган ионнинг ўртача эркин югуриш узунлиги.

Ионларнинг тушиш бурчаги ошиши билан сочилиш коэффициенти ортади. Бунга сабаб ионларни сиртда кўчиш йўли ошиши натижасида нишонда атомлар билан учрашиш эҳти-

моли ортади. Бурчак ошиши билан сочилиш энг катта қий-матта етади ва сўнг камайиш бошланади. У сиртда ионларни қайтиши билан изоҳланади.

Юқорида биз кўрган қурилма схемаси диодли камерада едирилиш дейилади. Ҳозирги пайтда диодли камерадан ташқари триодли камера ҳам мавжуд.

12.10. ТАГЛИКЛАРГА ПЛАЗМА-КИМЁВИЙ ИШЛОВ БЕРИШ

Плазма-кимёвий ишлов бериш қаттиқ фазада турувчи тагликни сирт қатламини олиб ташлаш жараёнларида таг-ликнинг актив газлар ёки газ аралашмалар билан ўзаро таъ-сиридан фойдаланилади. Бу ҳолда таглик материални реак-тив едириш жараёни ўтади.

Плазма-кимёвий ишлов бериш жарёни ион-плазма жа-раёнидан шу билан фарқ қиладики, таглик сиртидан мод-дани узоқлашиши, фақатгина плазманинг мусбат заряд-ланган ионларини бомбардимон қилиши билангина эмас, тагликлар билан плазма актив реагентларининг кимёвий ўзаро таъсири натижасида ҳам юз беради. Шундай қилиб, тагликка плазма-кимёвий ишлов беришда плазманинг юқори кимёвий реакция имконияти катта аҳамиятга эга.

Тагликка плазма-кимёвий ишлов бериш усули бир қанча афзалликларга эга. Биринчидан, у осон бошқарилади ва уни ўтказиш жараёнлари режимини бошқариш имконияти бор. Иккинчидан, у унча катта бўлмаган инерцион хусусиятга эга. Учинчидан, жараёнда суяқ едиргичлар талаб қилинмайди. Тўртинчидан, плазма-кимёвий усул юқори ажрата олиш қоби-лиятига эга ва таглик сиртига юқори аниқликда ишлов беради.

Плазма-кимёвий ишловда битта камерада турли техно-логик амалларни бажариш мумкин: сиртни тозалаш, еди-риш ва янги қатламлар ўтказиш. Бу тагликни ифлосланиши-ни кескин камайтиради ҳамда анча қийин бўлган амаллар тагликни ювиш ва қуритишдан холис қилади.

Кремний тагликларга ишлов бериш учун таркибида реак-тив плазма ҳосил қилувчи сифатида фторли ва хлорли газлар аралашмаси кислород билан биргаликда фойдаланилади.

Кремнийни изотроп едириш $\text{CF}_4 + \text{O}_2 + \text{N}_2$ газ аралаш-масида ўтказилади. Паст температурали плазмада фтор

ионининг ажралиши билан CF_4 нинг ажралиши юз беради. Ишчи камерани тўлдирувчи кислород молекулалари ионлашади ва осон кремний сиртини оксидланишигача ўзаро таъсирлашади. Фтор ионлари оксид қатлам билан ўзаро таъсирлашиб таглик сиртида осон учувчи SiF_4 бирикмани ҳосил қилади ва сиртдан учиб кетади. Кремнийда плазма-кимёвий едириш шундай рўй беради. Паст температурали плазма шароитларида азотнинг бўлиши кислороднинг ионланишга олиб келади.

Кремнийни анизотроп едириш турли газ аралашмаларда олиб борилиши натижасида, керакли анизотропия коэффициентини танлаб олиш имконини беради. Агарда анизотропия коэффициенти K сифатида кремнийни (100) текислигидаги едириш тезлигини (111) йўналиши бўйича кремнийда едириш тезлигига нисбати деб билсак, унда реактив таркибдаги газ аралашмасидан фойдаланиш, $\text{CCl}_4 + \text{O}_2$ реактив таркиб $K=30$ ни, $\text{C}_2\text{F}_6 + \text{O}_2$ таркиб $K=1,1$, $\text{C}_2\text{Cl}_2\text{F}_4 + \text{O}_2$ таркиб $K=0,8$ ни беради.

Алюминийли тагликка плазма-кимёвий ишлов бериш учун $\text{CCl}_4 + \text{Ar}$, $\text{CCl}_4 + \text{He}$, $\text{CBr}_4 + \text{Ar}$, $\text{HCl} + \text{Ar}$, $\text{HBr} + \text{Ar}$, $\text{Cl}_2 + \text{Ar}$ ва бошқа аралашмалардан фойдаланилади. Хлор ва бромли реактив аралашмалар концентрацияси 15-20% қилиб танлаб олинади.

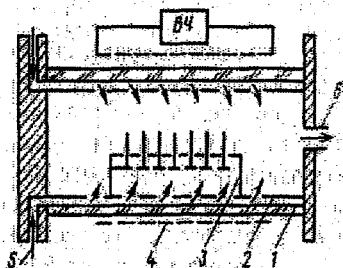
Хром қопламали тагликларни $\text{C}_2\text{HCl}_3 + \text{O}_2$, $\text{Cl}_4 + \text{O}_2$, $\text{Cl} + \text{O}_2$, $\text{BCl}_3 + \text{O}_2$, $\text{PCl}_5 + \text{O}_2$, $\text{Cl}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$, $\text{CCl}_4 + \text{Ar}$ ва бошқа аралашмалар билан ишлов берилади. Олтин қопламаларга ишлов бериш учун реактив газ CF_3Cl дан фойдаланилади.

Плазма-кимёвий усул билан ишлов бериш технологияси фотолитография жараёнида таглик сиртидан фоторезистни кетказиш учун кенг қўлланилади.

Фоторезистларни кетказиш учун актив газ сифатида кислород, азот ва водород аралашмасидан фойдаланилади. Фоторезист билан кимёвий реакцияга кирувчи актив заррачалар газ разрядли плазмада кислород молекулаларининг диссоцияланиши ҳисобига пайдо бўлувчи атомар кислород ва озон бўлади. Унга катта бўлмаган миқдорда азот ва водород (1%га яқин) ни қўшиш таглик сиртидан фоторезист қатламини кетказиш тезлигини оширишга олиб келади.

Тагликка плазма-кимёвий усулда ишлов беришни амалга ошириш учун паст босимли юқори частотали газ разрядли

плазмадан фойдаланилади. III.16-расмда плазма-кимёвий едириш учун вакуум камера схемаси берилган. Едириш махсус металл экранли газ разрядли плазмадан ажралган ҳолда вакуум камера соҳасидан ўтказилади. Юқори частотали плазма ишчи камеранинг цилиндрик сирти ва экран оралигида қўзғатилади. Едириш плазмадан пластинкалар жойлашган зонага ўтувчи нейтрал кимёвий актив атомлар ёки яшаш вақти катта бўлган радикаллар $F^{\bullet}$ билан амалга оширилади.



III.16- расм. Плазма-кимёвий едириш учун вакуум камера схемаси:
1-кварц камера; 2-махсус экранли цилиндр; 3-пластинкалар кассетаси; 4-юқори такрорийликли индуктор; 5-ишчи газ бериш; 6-чиқиш трубки.

Бу усулда цилиндрик экран тирқишлари орқали плазманинг зарядланган заррачалари сиртга тушмайди. Зонада қўзғалган атомлар фтор ва атомар кислород ишчи газ молекулалари билан бир қанча тўқнашиш натижасида тартибли ҳаракат қилади. Бу эса, пластинкаларни бир жинсли едирилишга олиб келади.

12.11. ГАЛЬВАНИК ҚОПЛАМАЛАРНИ ЎТҚАЗИШ

Кўп турдаги яримўтказгичли асбоблар ва интеграл микросхемаларни тайёрлаш технологиясида яримўтказгичли тагликларга турли қалинлиқдаги ва кўринишдаги металл қатламлар ўтқазиш кўп қўлланилади. Бу қатламлар икки электрод орқали ток ўтиши натижасида ҳосил бўлади. Булардан биттаси таглик битта электрод вазифасини бажарса, иккинчиси эса маълум таркибли электролитдир. Электролитик усул билан металлларни ўтқазиш жараёни асосида катод тикланиш реакцияси ётади.

Яримўтказгичлар технологиясида гальваник қопламаларни ўтқазиш яримўтказгич тагликка омик контактлар ҳосил қилиш, электрод чиққичлар яратиш, контакт май-

дончалар ва ток йўллари, кўп қатламли металл композициялар, шарсимон ва консолли элементларни тайёрлаш учун қўлланилади.

Яримўтказгич тагликка металлни электролитик ўтказиш жараёнига жуда кўпчилик омиллар таъсири мавжуд. Буларга электролит таркиби, электрод материалларнинг кимёвий таркиби, берилган электролитда электрод потенциал ва электролит орқали оқаётган токнинг қиймати ва йўналиши, электролит температураси ва бошқаларга боғлиқ.

Металлларни гальваник ўтказиш жараёнида ўтказишда айниқса, фойдаланилаётган электролитларнинг тозалигига катта аҳамият бериш зарур. Тайёр электролитда ўтказилаётган қатлам таркиби ва электрофизик хусусиятини ўзгарирадиган киришмалар бўлмаслиги керак.

Электролитга сувдан киришмалар тушиб қолиши мумкин. Шунинг учун яримўтказгичлар ишлаб чиқаришда электролитлар тайёрлаганда фақат ионсизлаштирилган сувдан фойдаланилади. Ишлаб чиқаришда гальваник қопламалар мисдан, руҳдан, кумушдан, олтин, қалай, кадмий, хром ва индийдан фойдаланилади.

Мислаштириш никель, хром, кумуш ва олтин қопламалар ҳосил қилишдан олдин қўлланилиб, у цианли ва кислотали электролитларда ўтказилади. Цианли электролитларга нисбатан кислотали электролитлар таркиби бўйича содда ва мисни ўтказишни анча юқори ток зичлигида ўтказиш имконини беради.

Цианли электролит сифатида таркибида 15 г/л циан миси, 10 г/л циан натрий, 15 г/л карбонат ангидрид натрий ва 30 г/л олтингугурт кислотали натрий бўлган эритмадан фойдаланиш мумкин.

Мисни ўтказиш жараёни 18°C - 20°C да ток зичлиги 0,3-0,5 А/дм² ўтказилади. Кислотали электролит таркибига 200 г/л мис порошоги (купорос), 5 г/л олтингугурт кислотаси ва 2 г/л этил спирт киради. Жараён 20°C - 25°C ва ток зичлиги 2-3 А/дм² да ўтказилади.

Никеллаш жараёнида икки хил кўринишдаги, яъни кислотали ва кучсиз кислотали электролитлардан фойдаланилади. Мисол тариқасида, никеллашда қўлланиладиган электролит таркиби: 150-200 г/л олтингугурт кислотали никель, 70 г/л олтингугурт кислотали натрий, 10 г/л олтингугурт кис-

лотали магний, 30 г/л бор кислота ва 5 г/л натрий хлориди бўлиши мумкин. Ўтказиш жараёни 18°C - 20°C , ток зичлиги $0,5\text{--}1,0\text{ А/дм}^2$ бўлганда бажарилади.

Кремнийда омик контактларни олиш учун ва геометрик тузилиши мураккаб бўлган қисмларда текис қалинликдаги никелни олиш учун кимёвий никеллаш жараёнидан ҳам фойдаланилади. Бу усулнинг асосий моҳияти шундан иборатки, бунда электр токини қўлланмасдан никель қоплама олишда кимёвий тикланиш жараёнидан фойдаланилади. Тикловчилар сифатида натрий, калий, аммоний ёки кальций гипофосфит хизмат қилади. Кимёвий никеллаш учун таркиб: 30г/л никель хлориди, 10 г/л натрий гипофосфит, 50 г/л хлорли аммоний ва 65 г/л натрий цитрати бўлади. Никелни ўтқазиш жараёни 70°C ўтказилади.

Кумуш қопламалар яримўтказгичли асбоблар ва ИМСлар конструкциясида ток ўтказувчи элементлар электрик ўтказувчанлигини ошириш учун ва контактлардаги ўтиш қаршиликларни камайтириш мақсадида фойдаланилади. Кумушни ўтқазиш учун электролит таркибига 205 г/л кумуш хлор ва 80-100 г/л калий цианиди киради. Жараён 18°C - 20°C ва ток зичлиги $1,5\text{--}2\text{ А/дм}^2$ оралиқларида ўтказилади.

Олтин қопламалар ўтқазиш ҳам яримўтказгичлар технологиясида анча кенг тарқалган бўлиб, у яримўтказгич тағлик сиртига юпқа парда сифатида қопланади. Бу қоплама ҳар қандай кимёвий-техник ишлов, яъни агрессив муҳитда ҳам чидаш имконини беради. Олтин қопланган тағлик водород фториди, азот ва сирка кислота-ларига ҳам чидаш беради, яъни тағлик емирилмайди. Олтин қопламаларни ўтқазиш учун тўрт турдаги электролитлар-ишқорли, кучсиз ишқорли, нейтрал ва кислотали электролитлар қўлланилади. Олтин қопламаларни олишда асосий таркибловчилардан ташқари (олтин тузлар комплекси ва эркин цианид), электролитга турли қўшимчалар киритилиб, улар олтин қоплама сифатини ва унинг электрофизик хусусиятини яхшилаши мумкин. Мисол учун, ушбу электролит таркибини кўрсатиш мумкин: 1 г/л калий дицианоурети, 1,5 г/л калий хлор, 1,3 г/л калий бифталеат, 0,2 г/л трилон. Ўтқазиш жараёни 90°C , ток зичлиги $0,5\text{ А/дм}^2$.

12.12. ТЕРМИК ИШЛОВ БЕРИШ (КУЙДИРИШ)

Термик ишлов бериш сиртга ўтирган киришмаларни кетказиш, сирт ифлосликларини парчалаш ва учувчи бирикмаларни буглантириш учун қўлланилади. Термик ишлов тўғридан-тўғри оксидлаш, эпитаксия ва бошқа жараёнлар олтидан вакуумли ва термик қурилмаларда олиб борилади. Масалан, кремний пластинкада эпитаксиал қатлам ўстиришда, қопловчи газ пардалар ва намликлар сиртдан узоқлаштириш учун оксидланиш температурасигача қиздирилади. Яримўтказгич пластинкалар вакуумда термик ишлов беришда оксидланган сиртдан намлигини, карбонат ангидрид газини, енгил углеводларни 400°C да осон учириб юбориш мумкин. Кремний сиртидан оксид парда 900°C дан юқори температурада кетади. Кремнийли эпитаксиал қатламни ҳосил қилишдан олдин оксид пардани водород муҳиtida 1200°C - 1250°C термик ишлов билан кетказилади. Керамика, шиша, кварц, сапфир тагликларнинг охири амаллари вакуумда ишлов беришдир. Термик ишловнинг самарадорлиги, албатта, температура ортиши билан яхши бўлади, бироқ ишлов киришмаларнинг диффузияси ва материални эриб кетиши билан чегараланган.

Назорат саволлари

1. Едиргич нима ва уларнинг қандай турларини биласиз?
2. Едиргичлар қандай таркибда бўлади?
3. Нима мақсадда кислотали едиргичга сирка кислота қўшилади?
4. Қандай мақсадларда қуруқ едириш қўлланилади?
5. Кимёвий суюқ тозалов учун қайси эритма қўлланилади?
6. Кислотали едиргичнинг ишқорий едиргичдан афзаллиги нимада?
7. Кислота аралашмали кремний едиргич кимёвий реакциясини ёзинг ва таҳлил қилинг.
8. Кимёвий никеллаш қандай амалга оширилади ?

13–БОБ. ҚОТИШМАЛИ УСУЛДА ТУЗИЛМАЛАР ОЛИШ

13.1. УМУМИЙ МАЪЛУМОТЛАР

Қотишмали усул 50-йилларда электрик параметрлари назарияга яқин бўлган ясси диодлар ва транзисторлар яратилишига имкон берди. Ҳозирги пайтда у яримўтказгич кристаллга контакт ва электродларни улаш ва баъзи ҳолларда электрик ўтишлар тайёрлаш учун катта аҳамиятга эга. Усул яримўтказгич пластинкаси сиртига легирловчи металл ёки қотишмани ўтқазиш ва уни суюлиш температурасигача қиздириш ва кейин совитишдан иборат. Бунда кристалланаётган яримўтказгич легирловчи киришма атомларини ушлаб қолади. Қотишмали жараёни тушуниш учун киришма-яримўтказгич бинар тизимининг ҳолат диаграммасини билиш керак. Қотишмада асосий физик металлургик жараён—яримўтказгич сиртига металлнинг ҳўлланилиши, суюлмада яримўтказгичнинг суюлиши ва унинг қайта кристалланишидан иборатдир. Қотишмали усулда тузилмаларни сифатли олиш технологик режимга, электрод металлларни ўтқазиш усулига, қотишмали жараёнини ўтқазиш усулига боғлиқ. Акс ҳолда ёмон ҳўлланилишига, суюлишнинг нотекис фронтда бўлишига, кристаллда тирқишларнинг бўлишига олиб келади.

13.2. ҚОТИШМАЛИ P-N-ЎТИШНИНГ ҲОСИЛ БЎЛИШИНИНГ ФИЗИК-МЕТАЛЛУРГИК АСОСЛАРИ

Яримўтказгичли асбоблар ишлаб чиқариш технологиясида қотишмали усулдан р-п-тузилмани яратиш, омик ўтишлар ва электродларга чиққичлар улаш учун фойдаланилади.

Қотишмали р-п-ўтиш олиш учун яримўтказгич кристалл сиртига электрод материал (металл ёки қотишма) жойлаштирилади. Система қотишма ҳосил бўлгунча қиздирилади ва унча катта бўлмаган вақт давомида ушлаб турилиб, сўнг со-

вителиди. Олинадиган ўтишлар сифати металл ва яримўтказгичнинг сирт ҳолатларига ва ташқи муҳитнинг тозалигига, суяқ фазада металл ва яримўтказгич атомларининг диффузиясига, суялманинг оқиб кетишига боғлиқ бўлади.

Қотишмаланиш жараёнида юз берадиган физик жараёнларни урта кетма-кет босқичга бўлиш мумкин. Улар яримўтказгич сиртини электрод материал ҳўллаши; ҳолат диаграммаси бўйича аниқланадиган электрод қотишмаларнинг яримўтказгичнинг маълум ҳажмида суюлиши; суялманинг совишида эриган яримўтказгич материалнинг кристалланиши натижасида р-п- ёки омик ўтиш ҳосил бўлишидан иборат.

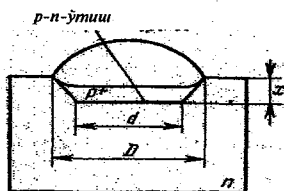
Агар соф элемент электрод материаллар талабларига жавоб берса, ҳеч қандай яримўтказгич қўшилмай эритилиди. Электрод қотишмалар учун қўлланиладиган баъзи бир элементлар хоссалари китоб охиридаги 5-жадвалда берилган.

Қотишмада берилган таркибловчининг суюлиш ҳолат диаграммаси ликвидус чизиғи билан аниқланади. Суюлиш жараёни диффузия билан кучли боғланган. Суялмага диффузияланиб ўтувчи яримўтказгич атомлари унда текис тақсимланишга интилади. Қотишма сиртидан кетувчи атомлар яримўтказгичнинг янги қатламида суюлиш имконини беради. Суялма ва қаттиқ яримўтказгич орасида яримўтказгичнинг кимёвий потенциали суялмада, унинг қаттиқ ҳолатдаги кимёвий потенциалига тенг бўлганда мувозанат бўлади. Агар зичлик мувозанатдагидан катта бўлса, суялмадан қаттиқ жисм кристаллга айланади, бу жараён иккала фазанинг кимёвий потенциаллари бир-бирига тенг бўлмагунча давом этади.

13.3. ЭЛЕКТРОН-КОВАК ЎТИШНИНГ ҲОСИЛ БЎЛИШИ ВА УНИНГ ГЕОМЕТРИЯСИ

Мувозанат ҳолат суялганда электрод қотишма берилган чуқурликда яримўтказгични эритгандан сўнг суялмани совитиш амалга оширилади. Яримўтказгичнинг суялма билан тўйиниши натижасида қаттиқ фазада кристалланиш юз беради. Яримўтказгичнинг суялмада кристалланиши жараёнига қайта кристалланиш (рекристалланиш) дейилади, чунки унинг ҳолати қаттиқ тагликнинг суялган қисмида рўй беради. Со-

виш бошлангунча қаттиқ ва суюқ фаза чегарасида яримўтказгичнинг турли соҳалари турлича легирланган бўлиб контакт ҳосил қилади (III.17-расм). Агар, эритилаётган металл акцептор киришма бўлса, суюлма билан яримўтказгич оралиғида p -турдаги қатлам ҳосил бўлади. Натижада, таглик яримўтказгич пластинка ўтказувчанлиги n -тур бўлса, p - n -ўтиш ҳосил бўлади. Унда киришма тақсимои поғоналикка яқин бўлади. Одатда, яримўтказгич таглик пластинкада киришма концентрацияси етарли даражада кам (10^{14} - 10^{16} см $^{-3}$), рекристалланган қатламда етарли катта ва 10^{18} - 10^{20} см $^{-3}$ ни ташкил қилади.



III.17-расм. Қотишмали усул-да p - n -ўтиш ҳосил бўлиши.

Суюлтириш жараёнининг натижалари p - n -ўтишнинг геометрик ўлчамлари, суюлишнинг чуқурлиги ва фронтининг шакли, ҳамда p - n -ўтишнинг майдони билан характерланади. Электрод материалнинг суюлиш чуқурлигини x деб белгиланса, у яримўтказгич сиртидан қаттиқ ва суюқ фаза чегарасигача бўлган масофадир (III.17-расм). У яримўтказгичнинг суюлган миқдорига, электрод қотишма хилига ва суюлтириш вақтига боғлиқ:

$$x = \frac{S_a}{1 - S_a} \frac{d_m}{d_a} h, \quad (\text{III.10})$$

бу ерда, S_a — масса бирлигида металлда яримўтказгичнинг эрувчанлиги; d_m ва d_a — металл ва яримўтказгич зичлиги; h — электрод материал дискининг қалинлиги.

Қотишмали p - n -ўтишни олишда аҳамиятли геометрик тавсифномалардан бири суюлиш фронтининг шакли бўлиб у ясси текис бўлиши керак. Идеал яссиликдан четланиш p - n -ўтишнинг эффектив майдоннинг қисқаришига, база қалинлиги нотекислигига ва бошқа ҳодисаларга олиб келади. Кассетали суюлтириш усули ясси фронтли суюлма олишга имкон беради. p - n -ўтишнинг майдони электрод материали тайёрланишига, суюлтириш температурасига ва қиздириш режимига боғлиқ. Суюлтириш фронтининг нотекислиги, кристалл сиртининг турли қисмларида суюлиш тезлиги бир

хил бўлмаслигидан келиб чиқади. Бунга бир қанча сабаблар бўлиши мумкин. Суюлиш жараёнида фаоллаш энергияси камайишига боғлиқ бўлган сиртдаги турли нуқсонлар ва унинг турлари (дислокация, чизилишлар, кичик ёриқлар) бўлади. Шунинг учун бу бузилишлар электрод материаллини оқишига тўсқинлик қилади ва бу соҳаларда яримўтказгичнинг маҳаллий суюлишига олиб келади.



Ш.18-расм. Кристалл тузилма бузилган жойда электрод материалдан яримўтказгичнинг маҳаллий суюлиши.



Ш.19-расм. Яримўтказгич сиртида тўла ҳўлланмаслик оқибатида «каллик» ҳосил бўлиши.

Қотишма материал сиртининг етарли тоза бўлмаслиги ва яримўтказгич сиртидаги қолдиқ оксиднинг бўлиши суюлмаган қисмлар («калликлар») пайдо бўлишига олиб келади (Ш.19-расм). Бу қисмлар $p-n$ -ўтишнинг омик қаршилиги билан шунтланиб қолиши натижасида қўшимча тескари ток ҳосил бўлишига олиб келади.

13.4. ЭЛЕКТРОД МАТЕРИАЛЛАРГА ТАЛАБЛАР

Электрод материалларни иккита гуруҳга бўлиш мумкин. Биринчи гуруҳга $p-n$ -ўтишни олиш мумкин бўлган қотишмалар бўлиб, уларни электрод қотишмалар дейилади. Иккинчи гуруҳга омик контактлар олиш мумкин бўлган қотишмалар киради. Қотишмалар $p-n$ -ўтишларнинг хоссалари кўпроқ эритилаётган металл ва қотишмаларнинг хоссалари билан аниқланади. Шунинг учун уларга бир қанча талаблар қўйилади:

1) электрод материал яримўтказгичнинг маълум қисмида ҳосил қиладиган ўтказувчанлик тури яримўтказгич таглик ўтказувчанлиги турига қарама-қарши бўлиши керак;

2) агар электрод материал сифатида қотишма қўлланилса, унда суёқ фазада қотишма таркибловчи бир-бирига тўла суюлиши керак;

3) кристалланган қатлам юқори электрик ўтказувчанлик-ка эга бўлишини таъминлаш учун легирловчи элементнинг қаттиқ яримўтказгичда тақсимот коэффиценти ва эрувчанлик юқори бўлиши шарт;

4) етарли паст температураларда электрод материал яримўтказгич сиртини яхши ҳўллаши керак;

5) у температура яримўтказгичнинг суюлиш температурасига нисбатан мумкин қадар паст бўлиши керак, чунки юқори температурада суюлтириш яримўтказгичда асосий бўлмаган заряд ташувчиларнинг яшаш вақтини камайтиради;

6) электрод материалда яримўтказгич электрофизик хос-саларини ёмонлаштирувчи тез диффузияланувчи кириш-малар бўлмаслиги керак;

7) электрод материалнинг суюлтириш температурасида буғланиш босими кичик бўлиши керак, акс ҳолда вакуум-да материалнинг интенсив буғланиши кузатилади;

8) у юқори ўтказувчанли ва иссиқ ўтказувчанли бўлиши керак, бу эса, *p-n*-ўтишнинг тўғри йўналишида йўқотишлар-ни камайтиради ва ҳараратни бир маромда бўлишини таъ-минлайди;

9) электрод материал *p-n*-ўтиш олингандан кейин, ди-одни олишнинг кейинги жараёнларида ҳам, яъни барча температураларда ҳам қаттиқ қолиши керак;

10) электрод материал юқори механик хоссага эга бўли-ши керак, у барча амалий иш температураларига ва талаб даражасидаги механик юкламага чидамли бўлиши керак.

13.5. ҚОТИШМАЛИ ТУЗИЛМАЛАРНИНГ СИФАТИНИ НАЗОРАТ ҚИЛИШ

Кўндаланг жило (шлиф) тайёрлаш. Қотишмали яримўт-казгичли тузилмалар тўғрисида қимматли маълумотларни, электрик ва электрофизик ўлчашлардан ташқари, тавсиф-ларидаги огиш сабабларини жило олиш йўли билан аниқ-ланади. Кўндаланг жило тайёрлашнинг асосий бос-қичлари *p-n*-ўтишли кристаллни пластмассага жипс ёпиштириш, *p-n*-ўтиш текислигига тик жилолаш, олинган кесимни сил-ликлаш ва танловчан едиришдан иборат. Ташқи нуқсонлар-ни аниқлаш учун кристаллни микроскоп остида диққат би-лан кузатилади. Кристалл жилосини аниқроқ кўриш учун

30см³ HNO₃, 10см³ HF ва 120 см³ CH₃COOH эритмалар ёрдамида кучсиз едирилади. Кимёвий ишловдан сўнг жилода *p-n*-ўтишнинг чегаралари очилади. Бунда эса, суюлиш чуқурлиги ва рекристалланган соҳа кенглиги ҳамда суюлиш фронти текислиги кузатилади.

Назорат саволлари

1. Қандай *p-n*-ўтиш қотишмали дейилади?
2. Қайта кристалланган қатлам қандай ҳосил бўлади?
3. Электрод қотишмаларга қандай талаблар қўйилган?
4. Кремнийли *p-n*-ўтишларда механик кучланишларнинг пайдо бўлиш сабабларини айтинг.
5. Қотишмали тузилмаларнинг сифати қандай назорат қилинади?

14- БОБ. ЭПИТАКСИАЛ ЎСТИРИШ УСУЛИДА ТУЗИЛМАЛАР ОЛИШ

14. 1. УМУМИЙ МАЪЛУМОТЛАР

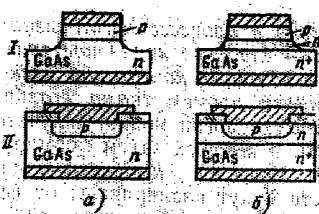
Ҳозирги замон технологиясида интеграл микросхема-лар ва дискрет яримўтказгичли асбоблар ишлаб чиқариш-да эпитаксиал жараёнлар энг олдинги ўринни эгаллайди. Эпитаксиал технология қўлланилиши кейинги 10-15 йил ичида сифатли маҳсулотлар ишлаб чиқаришни 4-5 марта ошириб юборди. Эпитаксиал қатламлар тузилиш жиҳатдан ҳажмий монокристаллдан анча такомиллашганлиги, улар-да киришмаларни ҳақиқий тақсимотига эга бўлиши билан бирга, назорат қилиб бўлмайдиган ифлосликлар камлиги билан фарқ қилади.

Одатда, яримўтказгичли асбобларнинг актив соҳаси пластинканинг унча чуқур бўлмаган сирт микроҳажми қисмида вужудга келтирилади. Пластинканинг қолган қисми эса, шу актив соҳани ушлаб туриш учун хизмат қилади. Демак, асбоб тузилмаси актив ва пасив қисмлардан ташкил топади. Пас-

сив қисм технологик жараёнда конструктив вазифани бажариб ту-ради, холос. Чунки, ўта юпқа пла-стинкалар билан ишлаб чиқариш жараёнида ишлаб бўлмайди.

Эпитақсия, умуман, яримўт-казгич пластинкали асбоб учун кераксиз пасив қисм паразит қар-шилигини камайтириш йўлини қидириш туфайли вужудга келди. Эпитақсия кичик омли пластин-каларда юқори омли яримўтказ-гичли қатламларни ўстириш им-конини берди.

III.20-расмда бир жинсли гал-лий арсениди пластинкасида ва n^+-n



III.20-расм. Галлий арсениди пластинкасида ва n^+-n ту-зилмада тайёрланган планар ва дискрет меза диодларнинг кристаллари: I) меза диодлар;

II) планар диодлар.

а) n -GaAs, б) n^+n -GaAs.

n тузилмада тайёрланган планар ва дискрет меза диодларнинг кристаллари кўрсатилган. Бунда n -эпитаксиал қатлам солиштирма қаршилиги бир жинсли n -GaAs пластинкаси солиштирма қаршилигига тенг. Меза кристаллар (III.20, а, I-расм,) ва планар кристаллар (III.20, а, II-расм,) солиштирилганда, иккинчи ҳолат эпитаксиал тузилмаларда (III.20, б, I-расм) ва II кристаллнинг қалинлик қаршилиги R камлиги маълум бўлади. Шундай қилиб, n^+-n тур эпитаксиал тузилмали диодларнинг мезаэпитаксиал ва эпитаксиал-планарларнинг чегара такрорийликлари юқори бўлади. Чунки, $f \approx 1/RC$, бу ерда C - p - n -ўтишнинг тўсиқ сифими.

Эпитаксиянинг афзалликларидан яна бири, қалинликнинг қатлам бўйича талаб даражасидаги киришмалар тақсимотиغا эга бўлган легирланган пластинкани олиш имкониятини беришидир. Бу эса, турли хилдаги яримўтказгичли асбоблар ва ИМСларни яратилишига олиб келди.

14. 2. ЭПИТАКСИАЛ ЎТҚАЗИШНИНГ АСОСИЙ УСУЛЛАРИ

Яримўтказгичли асбоблар ва ИМСлар тайёрлаш технологиясида яримўтказгич материалга баъзи қарама-қарши талаблар қўйилади. Масалан, импульсли диодларда тешилиш кучланишини ошириш учун яримўтказгич пластинканинг солиштирма қаршилигини ошириш керак, у эса иккинчи томондан, ёйилма оқим қаршилиги ўсишига, асбобнинг импульс хоссалари ва тезкорлигини ёмонлаштиришга олиб келади. Транзисторлар тайёрлаш технологиясида ҳам муаммолар мавжуд. Масалан, коллектор соҳасининг солиштирма қаршилиги катта бўлиши юқори тешилиш кучланишини олишга имкон беради, бироқ коллектор ҳажмида катта миқдордаги зарядлар тўпланишига олиб келиб, транзистор тезкорлигини камайтиради ва коллекторнинг катта кетма-кет қаршилиги транзистор қувватини чегаралаб қўяди. Худди шундай муаммолар бошқа яримўтказгичли асбоблар ва ИМС лар тайёрлашда ҳам учрайди. Эпитаксия усули яратилиши юқоридаги муаммоларни ечишда анчагина имконият берди.

Эпитаксия атамаси ўтган асрнинг 50 йилларида пайдо бўлиб, у «эпи» — сирти, «такис»-жойлашиш маъноларини англатади. Бинобарин, эпитаксия бу кристалл таглик сирти-

да муайян йўналишли кристалл қатламни ўстиришдир. Демак, эпитаксиал қатлам-таглик тузилишини сақловчи, кристалл тагликка ўтказилган монокристалл материал. Эпитаксиал ўсиш жараёнида ҳосил бўлувчи фаза эпитаксиал қатлам ўсиши ёрдамида кристалл панжарани қонуний давом эттиради.

Ўтиш қатлами кристалл фазада ўсувчи таглик тузилиши тўғрисидаги маълумотни ташувчи вазифасини бажаради. Эпитаксиал жараённинг уч гуруҳи: авто, гетеро ва хемозэпитаксия кўрнишлари маълум.

Автоэпитаксия (гомозэпитаксия) — таглик моддадан кимёвий фарқ қилмайдиган, тузилиши бўйича бир хил бўлган таглик сиртида йўналишли кристалл қатлам ўстириш жараёнидир. Бу жараёнда гомоген электрон-ковак тузилма пайдо бўлиши имкони яратилади.

Гетерозэпитаксия — кристаллокимёвий ўзаро таъсир натижасида таглик модда таркибидан фарқ қиладиган модда қатламининг йўналишли ўсиш жараёнидир.

Хемозэпитаксия — ташқи муҳитдан келувчи модда билан тагликнинг ўзаро кимёвий таъсиридан янги фаза ҳосил бўлгани ҳолда модданинг йўналишли ўсиши жараёнидир. Ҳосил бўлган хемозэпитаксиал қатлам, таркиби бўйича, таглик моддадан ва сиртга келувчи моддадан ҳам фарқ қилади.

Ўсувчи қатлам ҳосил бўлишидаги физик-кимёвий ҳодисалар табиати фарқи бўйича эпитаксиянинг учта асосий технологик усуллари мавжуд:

1) вакуумда молекулалар оқимидан молекуляр-нур эпитаксия;

2) газ ёки буғ-газ аралашмасида кимёвий ўзаро таъсир оқибатида юз берадиган газ фазали эпитаксия;

3) эритиш ёки эритма — эритишдан суюқ фазадан ре-кристалланиш йўли билан суюқ фазада эпитаксия.

Энди қисқача бу учта усулнинг асосий хусусиятларини кўриб чиқамиз.

Молекуляр-нур эпитаксия. Вакуумда молекуляр-нурлар оқимидан ҳосил қилинадиган эпитаксия модданинг тўғри кўчишидан содир бўлади. Модда-манба юқори вакуумда фокусланган электрон нур оқими ёрдамида молекуляр заррачалар оқимини узлуксиз буғлатиб (оралиқ ўзаро таъсирсиз) тагликка етказиб берилади. Таглик сиртга ўтирган яримўтказгич зарралари молекуляр ўзаро таъсир остида яримўтказ-

гич кристалли йўналишини аниқловчи тўғри тизимни ҳосил қилади. Эпитаксиал қатлам ўсиши сирт бўйлаб юз беради ва ўсувчи қатлам таглик тизимини қайтаради.

Молекуляр-нур эпитаксиянинг бошқа тури — бу суб-лимация усулидир. Бу усулда тагликдан бир неча юз микрометр нарида жойлашган яримўтказгични электр токида қиздириш билан буғлантириб эпитаксиал қатлам ҳосил қилинади. Бу ҳолда намуна — манба суюлмайди, фақат буғланиш ва унинг тагликка кўчиши юз беради. Олинган қатлам ўта юқори солиштирма қаршиликка эга бўлади, чунки вакуумли камерада киришмалар кам бўлади. Бироқ бу усулнинг унумдорлиги кичик бўлганлиги учун ишлаб чиқаришда қўлланилмайди.

Кимёвий ўзаро таъсир ёрдамида газ фазада эпитаксия. Газ фазада яримўтказгич атомлари кимёвий бирикмалар таркибида кўчиб, кимёвий ўзаро таъсир ёрдамида ажралиб тагликка ўтиради.

Кимёвий бирикмада элементар яримўтказгичлар — германий ва кремний қатнашиши мумкин. Ишлаб чиқариш шароитида эпитаксиал қатламларни олиш кимёвий усуллари анча кенг қўлланилади.

Газ фазада эпитаксиал ўсишнинг механизмларидан иккитасини кўриб ўтиш мумкин. Биринчи механизмга асосан, тагликда яримўтказгич таглик сиртида катализ диссоциация реакцияси натижасида ҳосил бўлади. Иккинчисига асосан, тагликдан юқорида яримўтказгич бирикмалари парчаланиши содир бўлади. Газ фазада диффузия йўли билан яримўтказгич заррачалар тагликка етиб боради.

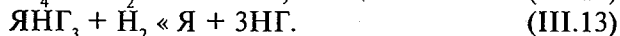
Яримўтказгич атомларининг ажралиб чиқиш кимёвий реакцияларини тўртта гуруҳга ажратиш мумкин:

1. Галоид бирикмаларини диссоциацияланиш:

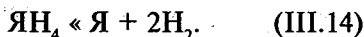


бу ерда, Y — яримўтказгич атоми (германий, кремний); Г — галоид атоми (хлор, фтор, бром, йод).

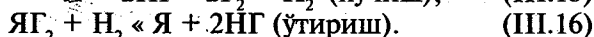
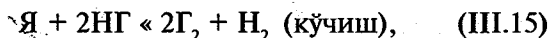
2. Галоид бирикмаларини водород билан тиклаш реакцияси:



3. Қиздириш натижасида бирикмаларнинг парчаланиши — пиролиз (иссиқ сочилиш):



4. Иккита босқичда ўтувчи кимёвий кўчиш реакцияси:



Бу ердаги барча реакциялар қайтувчи. Реакция қайтиши йўналиши ва ўтириш тезлиги бошланғич моддалар зичлиги ва жараён режимига боғлиқ.

Суюқ фазада эпитаксия. Суюқ фазада эпитаксия усули тўйинган яримўтказгич материал эритмасидан яримўтказгич монокристалл қатламини ўстиришдан иборат. Эритмага чўктирилган яримўтказгич таглик сиртида уни совитиш натижасида кристалланиши юз беради. Кўпчилик ҳолларда суюқ фазадан кристалланишда эритувчи сифатида яримўтказгич суюқ ҳолатида эрувчанлиги юқори бўлган металл, масалан, Al-Si ёки Au-Si тизимдан фойдаланилади. Яримўтказгич бирикмаларининг суюқ фазада эпитаксиясини олиш учун эритувчилар сифатида осон эрувчи бирикма таркибловчилари, масалан, GaAs ва GaP учун Ga қўлланилади. Бу эса кристалланиш температураси камайишига, таглик эритма чегарасида температура градиенти камайишига олиб келади ва ўстирилган қатлам тозалигини оширади.

Газ ва суюқ эпитаксиал қўшилган усулнинг (буғ-суюқ-қаттиқ жисм жараёни) истиқболи бор. Яримўтказгич таглик сиртига эвтектик таркибли суюқ фазани ҳосил қилувчи юпқа металл қатлам суркалади. Бу паст температураларда эпитаксиал қатламларни олиш имконини беради. Яримўтказгич атомлари суюқ қатлам билан таглик ҳосил қилган чегара орқали газ фаза орқали ўтиради ва уларнинг диффузияланиши натижасида кристалланиш юз беради. Бу ерда эритма қатлами 1 мкм дан ошмайди ва амалда эпитаксиал қатлам ўсиш тезлиги эритмада диффузияланиш вақтига боғлиқ бўлмайди.

Эпитаксия усулида олинган тузилмалар тавсифномалари қотишмали усулига асосан ўхшашдир.

14. 3. КРЕМНИЙ ВА ГЕРМАНИЙ ЭПИТАКСИЯСИ

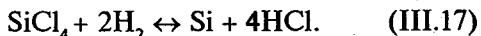
Эпитаксиал қатламларни германий ва кремний асосида ўстириш усуллари ичида кенг тарқалгани моносилан SiH_4 ва моногерман GeH_4 ларни тетрахлорид водородда тикланиши ва иссиқлик парчаланишидир. Кремний ва германий монокристалл қатламлари қизиган тагликлар орқали хлоридли ёки гидридли буғли водород газини ва легирланувчи киришмалар таглик сиртига ўтиради.

Эпитаксиал ўстириш жараёни қуйидаги амаллардан иборат:

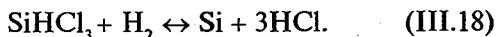
- 1) реакторга пластинкаларни жойлаштириш;
- 2) инерт газ ва водородни реактор орқали ўтказиш (пуркаш билан);
- 3) пластинкаларни тозалаш учун, пластинкаларни қиздириш ва газли едириш учун, реагентларни бериш;
- 4) едиришни тўхтатиш ва ўстириш учун керак бўлган температурани таъминлаш;
- 5) эпитаксиал қатлам ва легирлаш учун реагентларни бериш;
- 6) реагентларни беришни тўхтатиш ва қисқа вақт давомида водородни ҳайдаш;
- 7) қиздириш, водород ва инерт газларни беришни тўхтатиш;
- 8) реакторни бўшатиш.

Ишлаб чиқаришда кремний эпитаксиал қатлами олиш кенг қўлланилмоқда.

Эпитаксиал кремнийни хлоридли олиш усули. Бу усулни кенг қўлланилишига унинг етарли даражада соддалиги ва ишлатиладиган материаллар қулайлиги сабаб бўлмоқда. Кремний тетрахлорид буғлари ва водород реакторга берилиб, у ерда асосан кремнийнинг тикланиш реакцияси юз беради:



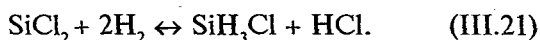
Баъзан тетрахлорид ўрнига трихлорсилан SiHCl_3 дан фойдаланилиб, бу ерда реакцияда асосан тикланиш юз беради:



Ўнг ва чап йўналишда бўладиган реакция натижасида қолдиқ водород хлоридидан HCl кремний сиртидаги ифлосликлар, SiO қолдиқлари, кремний таглик сиртидан тизим бузилишларини олиб ташлашда газли едириш учун фойдаланилади. SiCl_4 тикланиши жараёни (III.17) ифодага нисбатан анча мураккаб. Оралиқ ўзаро таъсир реакцияси икки усулда рўй беришини эътиборга олиш керак. Биринчи тизимга асосан, тикланиш кремний дихлорид SiCl_2 , HCl ва H_2 ларни қатнашиши реакцияси билан кузатилади. Ўтириш реакцияси (III.17) кремнийни едириш реакцияси билан бирга боради:

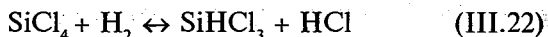


Бу реакцияга қўшимча водородда тетрахлорид концентрацияси ошиши эпитаксиал қатлам ўсиш тезлигини камайтиришга олиб келади. Бундан ташқари, қуйидаги реакция ҳам кетади:

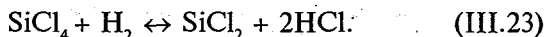


Ҳосил бўлувчи кремний водород хлорид бирикмаси водород билан соф кремний ҳосил бўлгунча тикланади.

Иккинчи схемага асосан, газ фазада SiCl_4 тикланиши қуйидаги реакциялардан бирида юз беради:



ёки



SiCl_4 қисман тикланиши тагликда атомар кремний ҳосил бўлиши билан хлоридлар тикланиши ёки диспропорцияланиш бўйича кетади. SiCl_4 молекуласига нисбатан SiHCl_3 молекуласини анча енгил сочилиши Si-Cl энергия боғланишига нисбатан Si-H боғланиш энергиясини кичиклиги билан аниқланади.

Водородда кремний тетрахлоридни кичик зичликларда (III.17) реакцияга асосан ўсиш тезлиги SiCl_4 зичлигига чи-

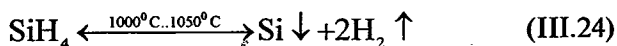
зигий боғланишга эгаллиги кузатилади. SiCl_4 зичлиги кейинги ошиши ўсиш тезлигини камайтиради ва (14.9) реакция қу-чайиб тағлик едирилишига олиб келади.

Кремнийни ўтқизишни 1150°C – 1250°C температуралар ора-лиғида водородда тетрахлорид концентрация сатҳини 0, 5%-1% газ оқим тезлигини 0,1-1 м/с ушлаган ҳолда амалга оши-риш мумкин. Шу шароитда қатлам ўсиш тезлиги 1 мкм/мин.га яқин. Унча юқори бўлмаган температураларда ва буғда катта микдордаги тетрахлоридларда, аморф ёки поликристалл крем-ний қатлами ҳосил бўлади. Тағликда температура ошиши ва газ аралашмасида тетрахлориднинг моль камайиши қатлам зичлашишига ва кристалланишига олиб келади.

Кремний эпитаксия қатламлари олишнинг гидрид усули. Юқоридаги эпитаксиянинг хлорид усулида тағлик темпера-тураси 1200°C га яқин. Шунинг учун юқори легирланган плас-тинка-тағликдан киришмаларнинг ўсаётган кучсиз легирлан-ган эпитаксияси қатлам томон диффузияланиши юз беради. Бу ҳодисани **автолегирлаш** дейилади. Автолегирлашга ўсаёт-ган қатламдан тағликка тескари томонга киришмалар диф-фузияси рўй бериши ҳам мумкин. Автолегирлаш эпитаксиал қатламда киришмалар зичлигини, қатлам-тағлик чегарасида киришмалар зичлигини ва эпитаксиал қатламда берилган зичликдаги киришма соҳаси қалинлигини ўзгартиради.

Тағликка киришмалар диффузияланишини чегаралаш учун диффузия коэффиценти кичик бўлган киришмалар, масалан, n^+ -тағликларда фосфор ўрнига Sb ва As танланади.

Киришмалар диффузиясини чегаралашнинг бошқа им-конияти бу жараён температурасини камайтиришдир. Крем-ний эпитаксиясида температурани 1000°C гача камайти-риш учун ўстириш вақтида тағликни ультрабинафша нур-ланишдан фойдаланиш мумкин. Ультрабинафша нурланиш газ фазада адсорбирлашган киришмалар таъсирини камай-тиради. Бу эса, кремний тағлик атомларининг сирт бўйлаб ҳаракатчанлигига таъсир қилади. Автолегирлашни анча юқори даражада чегаралаш жараён температурасини ка-майтириш имконини берувчи эпитаксия-нинг гидрид усу-лидан фойдаланишдир. Бу усулда моносилан пиролиз бўлганлиги учун уни баъзан **силанли усул** дейилади. Си-ланли усул силаннинг термик парчаланиши қайтмас реак-циясига асосланган:



Силан усулида эпитаксиал қатламларни ўстириш қурилмасининг тузилиши хлорид усулига яқин ва моносилан билан ишлаганда эҳтиёткорлик учун қурилма ҳаво ва нам қолдиқларини ҳайдаш учун мосламалар билан таъминланган бўлиши керак. Монокристалл қатламларни 1000°C-1050°C температураларда моносилан парчаланиши ҳисобига олинади. Манба сифатида 4%-5% ли моносиландан таркиб топувчи аралашма ва юқори тозаликдаги 95%-96% He, Ar ёки H₂ газидан фойдаланилади. Жараёнини ўтказиш даврида водородда моносилан зичлиги 0, 05%-0,1%, газ оқими тезлиги 30 см/с-50 см/с. Шу шароитда ўсиш тезлиги 0, 2 дан 2 мкм.гача ўзгаради.

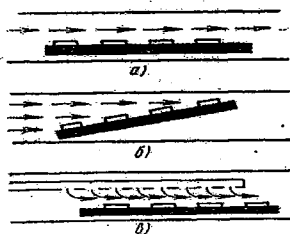
Усулнинг камчиликлари моносиланнинг ўз-ўзидан ёниши ва портлаши мумкин бўлганлиги учун махсус чоралар қўриш керак. Шунинг учун амалда моносилан водородли аралашмада қўлланилади. 5%ли моносилан аралашмаси ўз-ўзидан ёнмайди. Аралашма билан ишлаш хавфсизлик қоидаси тоза водород билан ишлашдагидек.

14. 4. ЭПИТАКСИАЛ ҚАТЛАМЛАРНИ ОЛИШ ҚУРИЛМАЛАРИ

Ўсувчи эпитаксиал қатламлар сифати кўп жиҳатдан температура ва газодинамик шароитларига боғлиқ. Шунинг учун эпита-

таксия қурилмаларига юқори талаблар қўйилади. Эпитаксиал ўстириш қурилмаси реакторлар тузилишига боғлиқ. Уларнинг горизонтал ва вертикал реакторлар хиллари бор.

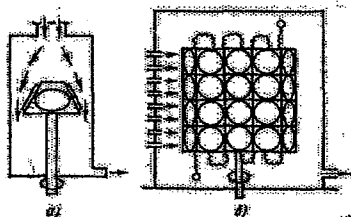
Горизонтал реактор анча содда тузилишга эга (III.21, а-рasm). Бунда буғ-газ аралашма оқими таглик ушлагичга параллел ўтади ва натижада эпитаксиал қатламлар қалинлиги ва солиштирма қаршиликни



III.21-рasm. Горизонтал реакторлар турлари: 1-реактор (кварц); 2-газ оқими; 3-таглик ушлагич; 4-пластинкалар.

ўзгартиришга олиб келади. Янада текис ўстиришни ҳосил қилиш учун иккита усулдан фойдаланилади: 1) таглик ушлагич газ оқими йўналишига маълум бир бурчак остида жойлаштирилади (III.21, б-расм); 2) таглик ушлагич узунлиги бўйича газни тақсимланган бўйича киритиш (III.21, в-расм).

Вертикал реакторлар конструкцияси яхшилиги қиздириш ва аралашма газ оқими учун анча яхши шароитни таъминлайди. Таглик ушлагичнинг айлантирилиши иссиқлик ва

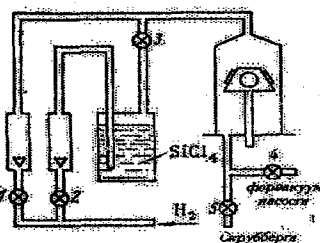


III.22-расм. Вертикал реакторнинг тузилиши: а) кварц найли реактор; б) зангламас пўлат қалпоқли реактор.

газодинамик майдонларни текис тақсимланишига олиб келади. III.22, а-расмда тўрт қиррали таглик ушлагич ва пар-буғ аралашмани вертикал киритишнинг вертикал реактор қурилмаси кўрсатилган. III.22, б-расмда юқори унумдорликка эга бўлган ишчи аралашмани горизонтал киритишнинг барабан кўринишидаги вертикал реактори кўрсатилган. Тўрт қиррали графитли таглик ушлагични қиздириш юқори час-тотали ток индуктори билан амалга оширилади, реактор кварц найдан иборат. Барабанли таглик ушлагични зангламас пўлатдан тайёрланган реактор ичида резистив элемент-лар ёрдамида қиздирилади. Бу қиздириш баъзан реакторнинг камчилиги деб аталади.

Хлорид усулида эпитаксиал қатламларни олиш қурилмаси III.23-расмда берилган.

Легирланган эпитаксиал қатламни олиш учун тетрахлорид кремний ёки легирловчи қўшимчалар p -турни VBg_3 ёки n -турни PCl_3 ҳосил қилувчи легирловчи қўшимча таркибли аралашмалар $\text{SiCl}_4 + \text{VBg}_3$ ёки $\text{SiCl}_4 + \text{PCl}_3$ термостат идишда тетрахлорид температураси юқори аниқликда ушлаб



III.23-расм. Эпитаксиал кремний олиш учун қурилма схемаси.

турилади. Бу эса зарурий буғ босимини таъминлайди. Одатда, бу температура 0°C дан паст, чунки SiCl_4 жуда учувчи суюқлик. Системага палладий тозаловидан ўтган водород берилади. Чунки палладий тозалов нам ва кислород қолдиқларидан водородни тозалайди. Палладий ёки платинали тозалов системаси 400°C – 450°C қиздирилган диафрагмадан иборат. Бу диафрагма орқали юқори тезликда атомар водород диффузияланади ва унинг сарфи $1\text{ м}^3/\text{соат}$ ни ташкил қилиб бошқа моддалар бу диафрагма орқали умуман ўтмайди, чунки уларнинг диффузия коэффициентлари кичик. Тозалов нуқтаси шудрингдан сўнг 70°C ни ташкил қилади. Водород 1 кран-водород сарфини ўлчовчи ротаметр орқали ўтади. 2, 3, 4 кранлар ёпиқ. Кремнийли тагликлар 1000°C – 1200°C гача қиздирилади ва уларнинг сирти водород оқимида тозаланади. 1 кран ёпилади, 2 ва 3 кранлар очилади. Водород SiCl_4 ли идиш орқали ўтади ва реакторга тетрахлорид буғи билан тўйиниб элементар кремний тикланади.

Реакцияда қатнашмаган SiCl_4 , H_2 , HCl ва бошқа маҳсулотлар 5 очиқ кран орқали скрубберга чиқади. Скруббер вазифаси захарли чиқиндиларни ушлаб қолади, водород алангасида ёндириб юборади. Эпитаксиал ўстиришда газ едириш учун 1 кран орқали HCl эпитаксия жараёнидан олдин берилади.

Эпитаксиал ўстириш технологияси пластинкага қўйилган талабларлардан келиб чиқади. Бу эпитаксиал қатлам қалинлиги ва легирланиш сатҳ қийматлари аниқлиги ($\pm 5\div 10$)% ёмон бўлмаган ҳолда ечилади. Эпитаксиал қатлам қалинлиги талаб даражасидаги такрорийликка эришиш учун ўсиш тезлигининг доимийлигини сақлаш керак. Бунинг учун эса SiCl_4 , SiH_2 асосий моддалар концентрация сатҳини, бу жараёнда температурани ўзгармас ушлаб туриш керак. Эпитаксиал қатлам солиштирма қаршилигини бир хил бўлишлиги учун қиздириш текис бўлиши керак.

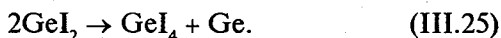
Германий эпитаксияси. Германий эпитаксиясига қизиқиш германийли кам шовқинли ўта юқори частотали транзисторлар ва ИМС яратиш муҳимлигидан келиб чиқади. Чунки, бу асбоблар кремнийли ИМС ларга нисбатан паст температураларда самаралироқ ишлайди. Германий эпитаксиал қатламларини ўстиришнинг хлорид усули яхши ўрганилган.

Ўтқазиш 800°C да бажарилади ва германий тетрахлориди зичлиги 0,2%га яқин бўлади. Аралашма оқими тезлиги тан-

ланган қиймати реактор тузилишига, оқим бериш усулига боғлиқ бўлиб, одатда тезлик катталиги 20 см/с дан ошмайди. Эпитаксиал қатламнинг 800°C да ўсиш тезлиги 0,5 мкм/мин.ни ташкил қилади.

Германий эпитаксиал қатламларни ўстиришнинг гидрид усулида олиш водород муҳиtida GeH_4 ёрдамида 700°C температура яқинида ва GeH_4 зичлиги 0,1%—0,2% бўлганда бажарилади. Ўсиш тезлиги 800°C гача ошиб боради, кейин газ фазада GeH_4 парчаланиши камаяди. GeH_4 нинг газ фазада парчаланишини камайтириш учун юқори тезликдаги газ оқимидан фойдаланилади. Саноат етарли даражада тоза германий тетраҳлоридидан фойдаланганлиги учун солиштирма қаршилиги 15 Ом·см дан катта бўлган эпитаксиал қатламни олиш имконини беради.

Яна камроқ қўлланиладиган усуллардан бири ёпиқ ҳаво-си сўрилган кварц найда олишдир. Найда германий тетраиодиди GeI_4 бўлиб, бу зона 550°C–700°C гача қиздирилади. Найнинг иккинчи зонасида германий таглик бўлиб унинг температураси 300°C–400°C ни ташкил қилади. Биринчи зонада қуйидаги реакция кетади: $\text{GeI}_4 + \text{Ge} \rightarrow 2\text{GeI}_2$. Германий дейодида тагликка диффузияланиб, қуйидаги реакция кетади:

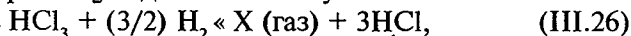


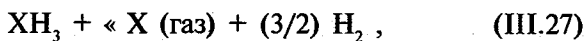
Натижада германий тагликка ўтиради, буғлари эса манба зонасига диффузияланади ва реакция яна қайтарилади.

14. 5. ЭПИТАКСИАЛ ТУЗИЛМАЛАРНИ ЛЕГИРЛАШ

Керакли солиштирма қаршиликли эпитаксиал қатламларни олиш учун қаттиқ фазага аниқ миқдорда киришмалар киритиш керак. Эпитаксия жараёнида киришмаларни киритиш учун учувчи бирикмаларнинг III ва V гуруҳ элементидан фойдаланилади. Бу моддаларга галогенидлар (PCl_3 , AsCl_3 , SbCl_3 , BCl_3 , BBr_3) ва гидридлар (PH_3 — фосфин, AsH_3 — арсин, B_2H_6 — диборан) киради.

Галогенидлар ва гидридлар қатнашишида легирлаш реакцияларини қуйидагича ёзиш мумкин:

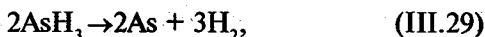




Донор киришмалар билан кремнийни легирлашда бу реакцияларнинг мувозанати ўнг томонга кучли силжиган бўлиб, амалий жиҳатдан киришма бирикмаларининг тўла айланиши юз беради.

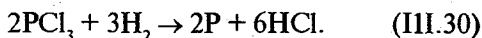
Эпитаксиал қатламларни легирлашнинг асосий усуллариға қуйидагилар киради: газ аралашмали, суюқ легирлаш ва газ разрядли.

Газ аралашмали усулда киришма манбаи сифатида ҳажм бўйича 10^{-2} — $10^{-4}\%$ учувчи гидридли легирловчи элемент бўлган инерт газ аралашмасидан фойдаланилади. Усул ўсувчи қатламни кучсиз легирлашни амалга оширади. Аргонли 0,01 AsH₃ ёки аргонли 0,01% B₂H₆ иборат газ аралашма камера бўйича оқаётган водород оқимиға қўшиб юборилади. Бу эса аралашма концентрациясини қўшимча суюлтириш ва қатламда концентрация сатҳини яхши бошқариш мумкинлигини таъминлайди. Диборанли газ аралашасида солиштирма қаршилиги 1. Ом-см.дан катта бўлган кремний қатламларини олиб бўлмайди. Шунинг учун қаттиқ ва суюқ манбалардан фойдаланилади. Газ кўринишдаги манбалардан кўп қўлланиладигани арсенийдир. Газ тагликка етказилади, улар сиртга ютилади, диссоцияланади:



озод бўлган арсений кремнийнинг ўсувчи қатлам панжарасига жойлашади.

Суюқ легирлаш усулида легирловчи киришма манбаи сифатида галогенидлар PCl₃, POCl₃, BBr₃ ва бошқа бирикмалардан фойдаланилади. Галогенидлар кремний тетрахлоридида яхши эрийди, осон бугланади ва ўтувчи водород оқимида тўйинади. Манба киришма буглари иссиқ сиртда водород билан тикланади:



Галогенидлар юқори буг босимиға эға бўлиб температураға узвий боғлиқ, шунинг учун унинг озгина ўзгариши

ўсувчи қатламда киришма концентрациясининг кескин ўзгаришига олиб келади. Кейинги вақтда бор билан легирлаш учун буғ босими температурага кучсиз боғлиқ бўлган юқори температурада қайновчи бирикмалар қўлланилади. Бу бирикмалар олинган кремний қатлам солиштирма қаршиликлари 0,005 дан 5 Ом·см оралиғида ётади.

Газ разрядли усулда қаттиқ манбалар сифатида B_4C , AlB_2 , $Sb+(1...2)\%As$ қотишма ва бошқалар ишлатилади. Улар газ разрядли камерада электродлар вазифасини ўтайди. Ишчи реакторли қурилмага уланган электродлар орасига импульс кучланиш бериш натижасида камерада учкунли разряд юз беради. Учкунли разряд плазмасида электрод материаллар қисман буғланади. Водород билан кўчувчи буғлар қурилманинг реакция зонасига етади. У ерда уларни эркин легирланувчи киришмаларга ажралиши билан ёйилиш юз беради. Киришма концентрациясини электродлар орасидаги масофани ўзгартириш, электродларга берилаётган кучланиш, такрорийлик ва импульслар давомийлиги бериш ҳамда газ разрядли камера орқали ўтаётган водород оқим тезлиги билан бошқариш мумкин.

Кремний n -ўтказувчанликдаги қатламни олиш учун электрод материаллар сифатида сурмали $Sb+0,1\%P$ ёки $Sb+1\%As$ ҳамда GaP , $GaAs$ ёки $InSb$ қотишмаларидан фойдаланилади. Газли учкун разряд бу моддалар сочилиши туфайли парчаланади, бунда P , As ва Sb водород билан бирикиб гидридлар ҳосил қилиб, электродлар орасига кўчади. Таглик зонасида гидридлар сочилади ва киришмалар ўсувчи кремний қатламига киради. Галлий гидридлар ҳосил қилмайди ва камерадан эпитаксиал қатламларни олиш учун лантан борид LaB_6 , алюминий борид AlB_2 , бор карбири B_4C электродларидан фойдаланилади. Бунда бор водород билан диборан ҳосил бўлади. Газ фазада киритилаётган киришмалар зичлигини учкун разряд такрорийлигини бошқариш билан ўзгартириш мумкин.

14.6. $A^{III}B^V$ ТУРДАГИ ЯРИМЎТКАЗГИЧ БИРИКМАЛАР ЭПИТАКСИЯСИНИНГ ТЕХНОЛОГИК ХУСУСИЯТЛАРИ

$A^{III}B^V$ турдаги кимёвий бирикмаларидан фойдаланиш соҳалари узлуксиз кенгайиб бормоқда. Ҳозирги вақтда оптоэ-

лектроникада информациянинг тасвирли тизимлари, нурланиш манбалари ва қабул қилгичлар, яримўтказгичли лазерлар ва бошқалар ярагилишида улардан кенг фойдаланилмоқда. Юқоридаги барча қурилмаларда яримўтказгичли тузилма фаол иштирок этади, одатда, энг камида иккита авто ёки гетероэпитаксиал қатлам мавжуд.

$A^{III} B^V$ турдаги бирикмалар ва улар асосидаги қаттиқ эритмаларни уларнинг эриш температураси ва бугланиш босимининг баландлиги туфайли элементлардан тўғридан-тўғри синтез қилиш мураккабдир. Галлий арсениди ҳавода 300°C ортиқ температурада қиздирилса, оксидланади, 600°C дан бошланиб арсений ажралиб чиқиш билан бирикма буғлана бошлайди. Суюлиш температурасида буғ босими 10^5 Па ни ташкил қилади.

GaP суюлиш температурасида фосфор буғининг босими $3,5 \cdot 10^6$ ни Па ташкил қилади. Суюлма ҳолидаги GaAs ва GaP барча контейнер материаллар билан жуда фаол ва ўзаро таъсирда бўла бошлайди. $A^{III} B^V$ технологиясида қўлланилаётган сунъий кварц қотишма GaAs ни кремний билан ифлослантиради.

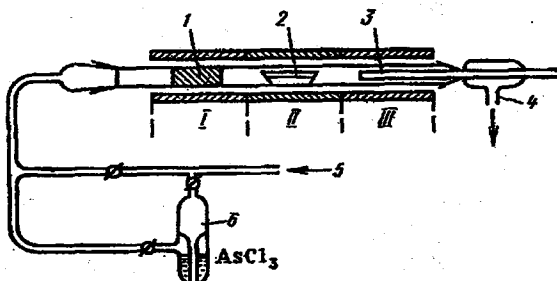
Юқоридаги қийинчиликларни бирикманинг суюлиши эриш температурасидан пастроқ температурада газ фазадан $A^{III} B^V$ турдаги бирикмалар эпитаксиал қатламларини ўстиришда йўқотиш мумкин.

GaAs ва қаттиқ эритмалар асосида газ фазада эпитаксия олишда газ ташувчи сифатида водороддан фойдаланилган ҳолда хлорид ва хлорид гидрид тизимини ўтқазиш мумкин. Бу усулнинг асосий афзаллиги: фойдаланилаётган дастгоҳнинг соддалиги; оқим тезлигини ва бирикма — ташувчи зичлигини ўзгартириш йўли билан қатлам ўсиши жараёнини бошқариш мумкинлиги; турли киришмалар билан легирлаш; узлуксиз жараёнда қўп қатламли тузилмаларни олиш; жараёни автоматлаштириш; едиришнинг осонлиги ва бошқалар киради.

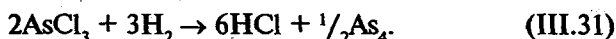
Энди қисқача асосий реагентлар тизимида кимёвий айланишлар ва эпитаксиянинг бир қанча кинетик хусусиятларига тўхталамиз.

$\text{Ga-AsCl}_3\text{-H}_2$ тизимлари афзалликлари битта реакторда AsCl_3 ни водородли тикланишида тозалаш усулида чуқур тозаликда AsCl_3 ва юқори тозаликда арсений ва водород

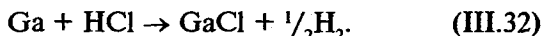
хлориди олиш мумкинлигидир. Бу тизимда галлий арсениди эпитаксиал қатламини олиш қурилмаси III.24-расмда кўрсатилган. Реактор учта қизиш зонасига эга. Унинг киришига водородли буғ AsCl_3 аралашма келади ва биринчи зонада куйидаги реакция кетади:



III.24-расм. Ga – AsCl_3 – H_2 тизимида GaAs эпитаксиал қатламлар олиш учун қурилма схемаси: 1-арсений зонаси 425°C (I); 2-галлий зонаси 800°C (II); 3-таглик зонаси 750°C – 900°C (III); 4-реакция маҳсулотлари чиқиши; 5-водород кириши; 6- AsCl_3 ли барботер.



Иккинчи зонада биринчи зонадан келган водород хлориди эритма галлий билан ўзаро таъсирлашади. 700°C дан юқори температурада ортиқча галлий маҳсулоти таъсирида галлий субхлориди пайдо бўлади:



Учинчи зонада гетероген реакция натижасида галлий арсениди синтези ва тагликда эпитаксиал қатлам ҳосил бўлади:

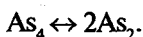
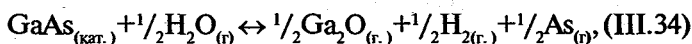


Жараённинг ўзига хос хусусияти иккинчи зонада арсений билан галлий эритмасининг тўйинишидир.

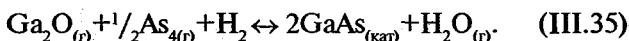
Эритма тўйингандан сўнг унинг сиртида галлий арсениди пардаси ҳосил бўлади, зонага келувчи ортиқча арсений водород оқими билан қўшилиб кетади ва реакторнинг совуқ

қисмларига ўтиради. Одатда, тағлиқни галлий эритмаси арсений билан тўйиниш жараёнини тутаган жойига киритади. Бу газ аралашма таркиби ўзгармаслигини таъминлаб қатламнинг бир жинсли ўсишига олиб келади. Зона киришдаги AsCl_3 ва GaCl буғ босимлари нисбатини ўзгартириш билан ўтириш зонасида тағлиқни едириш ва турли тезликда эпитаксиал қатлам ўсиш режимларини аниқлаш мумкин. Қатлам ўсиши тезлиги тағлиқ йўналганлигига боғлиқ. Одатда, қуйидаги муносабат кузатилади: $\vartheta_{(III)A} > \vartheta_{(100)A} > \vartheta_{(211)B} > \vartheta_{(311)B}$. Бу ерда, А-металл, В-металлоид панжара қисмига тегишли белгилар.

Галлий арсенидининг бошқа тизимларидан ҳам эпитаксиал қатламларни олиш мумкин. Булар $\text{GaCl}-\text{AsCl}_3-\text{H}_2$; $\text{GaCl}_3-\text{As}-\text{H}_2$; $\text{GaAs}-\text{HCl}-\text{H}_2$; $\text{GaAs}-\text{I}_2-\text{H}_2$; $\text{GeAs}-\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2$ тизимларидир. Ўтириш зонасидаги кимёвий реакциялар кинетикаси ўхшаш. Фақат, охириги тизимда, фарқли равишда ташувчи сифатида сув буғидан фойдаланилади. Бу тизимда манба зонасида температура $1000^\circ\text{C}-1100^\circ\text{C}$ бўлиб, жараён галлий арсенидининг оксидланишига олиб келади:



Температураси 50% дан кам бўлган зонада, яъни ўтириш зонасида галлий арсенидининг синтези рўй беради ва бу ерда сув ажралиб чиқиши ҳам кузатилади:

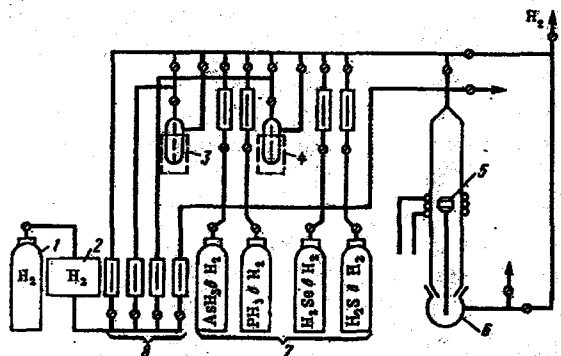


Галлий арсениди ўстириш учун хлорид-гидридли $\text{Ga}-\text{HCl}-\text{AsH}_3-\text{H}_2$ дан ҳам фойдаланиш мумкин.

$\text{A}^{\text{III}} \text{B}^{\text{V}}$ ёки уларнинг қаттиқ эритмалари бинар бирикмалари эпитаксиал қатламларини олишда B^{V} таркибловчининг уй температурасида газ ҳолда бўлганлиги, газ фазада таркиби ўзгармаслиги ва легирлаш жараёнини бошқаришни таъминлайди.

III.25-расмда бинар бирикмалар GaAs , GaP , GaN ва қаттиқ эритмалар $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$, $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$, $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$, $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{PAs}_{1-y}$, $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ ва бошқа газ фазадан ўстириш мумкин бўлган

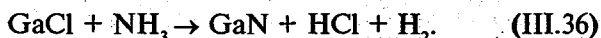
бошқа аралашмалардан эпитаксиал ўсиш ва легирлаш учун қурилма схемаси кўрсатилган.



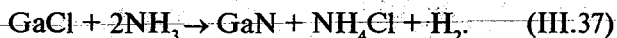
III.25-расм. Галлий органик бирикмалардан фойдаланган ҳолда галлий арсениди эпитаксиал қурилма схемаси: 1-газ ташувчи балон; 2-газни тозалаш блоки; 3-галлий-органик бирикмали барботер; 4-легирловчи қўроқшин манбаи; 5-таглик; 6-кварц реактор; 7-водород аралашмали гидрид баллонлар; 8-ротометр.

Газ фазада GaN эпитаксияси биргина шу усулда олиниб, у бу материал асосида технологиялашган монокристалл қатламини олишни таъминлайди.

Эпитаксияни хлорид-гидридли Ga-HCl-NH₃-Ar(He) тизимда олиб борилади. Галлийни хлорлаш зона температураси 800°C-850°C бўлганда галлий субхлориди GaCl ҳосил бўлгунча давом эттирилиб, сўнг инерт газ оқимида ўстириш зонасига ўтказилади. Боғланмаган канал орқали ўтқазилган зонасига аммиак тўғридан-тўғри тагликка берилади. Бу ерда 1050°C-1100°C температурада гетероген реакция юз беради:



Қисман жараён қуйидагича бўлиши ҳам мумкин:



Реакцияда қатнашувчи газлар ва буғлар зичлиги бўйича бир-биридан кучли фарқ қилади, шунинг учун эпитаксиал

ўстириш бир жинс бўлиши учун газ оқимларини юқори тезликда ўтказилади. Шунинг учун бу аралашма гулхан режим деб аталади. Бунда газ аралашма гомогенлашмаган бўлади ва у $A^{III} B^V$ бирикмалар эпитақсиясидан фарқ қилади.

Таглик сифатида, одатда, йўналиши (0001), (1120) ёки (1012) бўлган сапфирлардан фойдаланилади, кейин улар водородда юқори температурали едиришдан ўтказилади. Қатламни ўсиш тезлиги ~ 1 мкм/мин бўлиши мумкин.

Галлий нитриди асосида ёруғлик диодлари битта жараёнда олинади. Олдин азот панжарасида вакансия ҳисобига юқори электрон ўтказувчанликка эга бўлган легирланмаган қатлам ўстирилади. Кейин бу қатлам устига қўрғошин билан легирланган компенсацияланган i -қатлам ўстирилади. Легирланган қатлам ўсиши 900°C да амалга оширилади.

Суюқ фазада эпитақсия. Суюқ фазада эпитақсия кўпчилик $A^{III} B^V$ бинар ва учлик яримўтказгич бирикмаларни ўтказиш учун, айниқса, турли тагликларда кўп қатламли p - n ва изотурдаги тузилмаларни олиш учун қўлланилади.

Суюқ фазали эпитақсиянинг афзалликлари: стехиометрик эритмадан фойдаланиш зарур эмаслиги; фаза ўсиши температура комбинацияси ва ликвидус чизигига яқин таркибда юз бериши; бу ўз навбатида қатламларда кимёвий тузилиш нуқсонлари зичлигини камайтиришга, температура пасайиши билан кўпчилик киришмаларнинг тақсимот коэффицентининг камайишига имкон беради. Иссиқлик вакансиялар зичлиги ҳам камаяди.

Суюқ эпитақсияда ликвидуснинг ҳар қандай нуқтасида кристалланишга ва унда енгил учувчи таркибловчиларнинг буғ босими камайишига олиб келади. Масалан, галлий асосида қотишма-эритмадан 1000°C да GaP ни ўстиришда фосфор P_2 буғи босими 10 Па ташкил қилади ва натижада фосфорнинг йўқотишлари етарлича оз бўлади (стехиометрик қотишмадан 1470°C да ўстиришда фосфор босими $3 \cdot 10^6$ Па ни ташкил қилади).

Суюқ эпитақсия жараёнида ўсиш тезлиги кичик бўлганлиги сабабли қатлам қалинлигини юқорироқ аниқликда бошқариш имконини беради. Бу усул диффузион ва бошқа шакллар ҳосил қилувчиларга нисбатан кўп марта афзалдир. Бу айниқса, кўп қатламли даврий тузилмаларни олишда аҳамиятлидир.

Суюқ фазада эпитакия усули, тагликка нисбатан, қатламда дислокация зичлиги камайишига олиб келиб, ёруғлик асбобларида юз берадиган нурланишсиз рекомбинация жараёнларини камайтиради.

Суюқ фазадан эпитакия олиш усуллари иккита катта гуруҳга бўлиш мумкин. Улардаги фарқ қатламда киришмаларнинг охириги тақсимоти билан аниқланади.

1. Йўналишли кристалланиш усули. Бу ҳолда эпитакия маълум таркибдаги суюқ фазадан ва ташқи муҳит билан ўзаро таъсирсиз ҳажмда бўлади. Эпитакия жараёнида суюлма ҳажми камаяди.

2. Дастур зонали қайта кристалланиш усули. Бунда ташқи манбалар газ, суюқ ёки қаттиқ фазада вақт давомида кам ўзгарувчи маълум ҳажмли суюқ фазали қатламдан фойдаланилади.

Биринчи гуруҳ усуллари учун қатламнинг бутун қалинлиги бўйича киришмалар тақсимоти бир жинсли эмаслиги характерлидир.

Киришмалар зичлигининг ўзгариши йўналишли кристалланиш асосий тенгламасига биноан бўлишини кўрсатади:

$$N_{\text{кат}} = N_{\text{жо}} k (1-g)^{k-1}, \quad (\text{III.38})$$

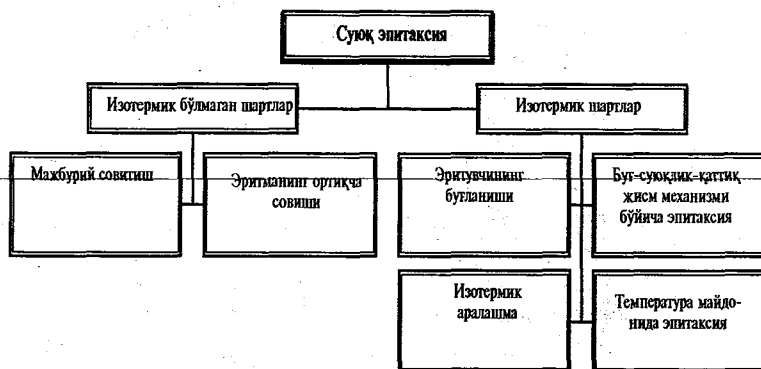
бу ерда, $N_{\text{кат}}$ — қатламда киришма зичлиги; $N_{\text{жо}}$ — суюқ фазада киришма бошланғич зичлиги; k — киришмаларнинг эффектив тақсимот коэффициентини; g — таглик ҳажмида суюқ фаза ҳажмининг кристалланган улуши.

Иккинчи гуруҳ усулларида олинган қатламларида киришмаларнинг тақсимоти эпитакиал қатламни бошланиш ва охириги қисмида бир жинсли эмаслиги, ўрта қисмида эса, киришмалар тақсимоти бир жинсли эканлиги кузатилади. Қаттиқ фазада киришмалар тақсимоти қуйидаги тенглама билан ифодаланади:

$$N_{\text{кат}} = N_{\text{кат.о}} [1 - (1-k) \exp(-kh\Lambda)] \quad (\text{III.39})$$

бу ерда, $N_{\text{кат.о}}$ — қаттиқ фазада киришмаларнинг бошланғич зичлиги; h — эпитакиал қатлам қалинлиги; Λ — суюлиш зона узунлиги.

Суюқ эпитакияни амалга оширадиган асосий вариантлар III.26-расмда кўрсатилган.

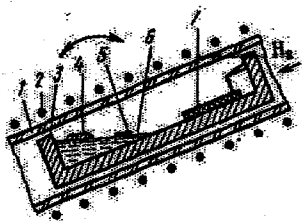


III.26-расм.

Суяқ эпитаксиянинг классик усули Нельсон томонидан тақдим қилинган бўлиб, контейнернинг (махсус идиш) қарама-қарши томонларига бошланғич эритма таркибловчилари ва таглик жойлашган бўлади (III.27-расм).

Одатда, конструкцияси буралувчи ёки чайқалувчи (тебранувчи) печкадан фойдаланилади.

Кўрилатган тизимни фаза диаграммасини кўринишидан аниқланган температурада ушлаб турилгандан сўнг ҳосил бўлган суяқ фазада тўйинган эритма маҳкамланган тагликка қуйилади. Системани секин совитиш билан эритма-



III.27-расм. Нельсон усули бўйича суяқ эпитаксия учун контейнер схемаси: 1-кварц реактор; 2-қаршилиқ электропечка; 3-графит қайиқча; 4-модда-манба; 5-лигатура; 6-эритма (гелий); 7-таглик.

нинг ўрта тўйиниши, унинг емирилиши ва эпитаксиал қатлам кўринишида тагликда эритма модданинг ажралиб кристалланиши пайдо бўлади. Шу пайтнинг ўзида легирлашни ҳам амалга ошириш мумкин.

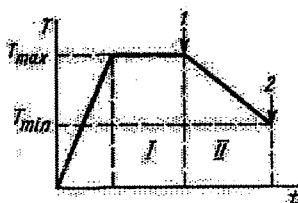
III.28-расмда суяқ эпитахсияда температура билан вақтга боғлиқ режими кўрсатилган. Эритма совитиш тезлиги 1-10 $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ ни ташкил қилади.

Нельсон усулини амалга оширишнинг турли хиллари мавжуд.

Кремний карбиди эпитаксияси. Кремний карбиди SiC эпитаксияси ёрдамида ёруғлик ва тўғрилагич диодлар, юқори температурага чидамли тензорезисторлар, юқори энергияли заррачаларни қайд қилувчи асбоблар ва бошқа турли асбоблар тайёрлаш мумкин. Бу материал юқори механик қаттиқлик ва мустақамликка эга. Унинг электрўтказувчанлиги тури ва солиштирма қаршилиги қийматини бошқариш имкони борлиги маълум. Ундан жуда қийин шароитларда ишлаши мумкин бўлган қурилма ва асбоблар яратиш мумкин.

Кремний карбиди эпитаксиал қатламини газ фазада ва суюқ фазада олиш мумкин.

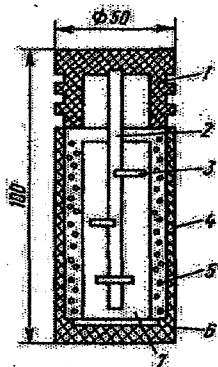
Газ фазада SiC эпитаксияси. Усул асосида инерт газ муҳити ёки вакуумда олдиндан синтезланган SiC сублимацион қайта кристалланиши ётади. Жараён юқори температурали печкаларда, графитли контейнерларда ўтказилади (III.29-расм).



III.28-расм. Суюқ эпитаксияда температура-вақт режими:

I-эритманинг тўйиниш соҳаси;

II-кристалланиш соҳаси; 1-тагликнинг қотишма билан контакти; 2-тагликдан қотишманинг кетиши.



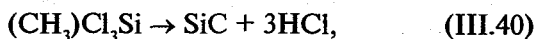
III.29-расм. Газ фазада кремний

карбиди эпитаксияси учун контейнер: 1-иссиқлик экранли қопқоқ; 2-таглик ушлагичи; 3-таглик; 4-контейнер корпуси; 5-кремний карбиди (манба); 6-пастки қопқоқ; 7-кристалланиш фазаси.

Аргон газда эпитаксия зона температураси ўртача 2000°C-2200°C ни ташкил этса, вакуумда жараён анча паст температура (1800°C-1900°C) да кетади. Бунда (5) манба материали

қисман парчаланиши билан буғланади, материал буғи юпқа графит диафрагма орқали (7) кристалланиш зонасига ўтади, бу ерда (3) тагликлар жойлашган. Бу зонада температура манба температурасига нисбатан 50°C-60°C кам. Бу ерда вужудга келтирилган озгина ўта тўйинган буғ (3%-4%) эпитаксиал қатлам SiC ўсиши учун етарли.

Газ фазада кремний карбиди эпитақсиясини олишнинг бошқа бир қанча кимёвий усуллари мавжуд бўлиб, улардан бири метилтрихлорсилан пиролиз усулидир:



Эпитаксиал SiC ўстириш 800°C дан бошланиб, 1200°C-1250°C ларда кремний карбиди тагликларида ва кремний тагликларда жараён пайтида кремний карбиди монокристалл қатламлари олинади.

Газ фазада қатламларни азот (донор), бор (акцептор) ни ҳосил қилиш учун B_2H_6 ёки BF_3 дан, алюминий (акцептор) ни AlCl_3 ёки $\text{Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$ дан фойдаланиб легирлаш амалга оширилади.

Газ фазада эпитақсия усули камчилиги кристалланиш фронтининг тўла очиқлигидир. Бунда турли хилдаги таъсирлар контейнерларда ёки бутун печка ҳажмида юз бериши мумкин.

Суюқ фазада SiC эпитаксиал ўсишида кристалланиш fronti суюқ фаза билан тўсилган ва кристалл билан озиқлантиришга асосланган. Анча кенг тарқалган усуллардан бири ҳаракатдаги эритувчи бўлиб, маъзмуни қуйидагича. Вакуумда пуркаш усули билан таглик ва кристалл-манба сиртига эритувчи қатлам қопланади, унинг қалинлиги ~100 мкм ни ташкил қилади. Иккала кристалл ичида эритувчиси бўлган «сэндвич»га жойлаштирилади. Манба — эритувчи-таглик система температура градиенти ($T_M > T_{\text{таг}}$) бўлган ҳолда графит қиздиргичга жойлаштирилади. Модданинг манбадан тагликка кўчиши эритгич орқали диффузия йўли билан рўй беради. Эритгични танлаш катта аҳамиятга эга бўлиб, у эпитақсия жараёнини ва кинетик параметрларини ва ўсган қатлам хусусиятини аниқлайди. Эритгичлар сифатида Co, Fe, Ni, Cr, Ag лардан фойдаланиш мумкин. Бироқ улар эпитаксиал қатламни ифлослантириши ҳам мумкин.

Назорат саволлари

1. Эпитаксия деб нимага айтилади?
2. Эпитаксиал қатлам олиш усуллари айтинг.
3. Эпитаксиал қатламга қандай талаблар қўйилади?
4. Газ фазада эпитаксияни тушунтиринг.
5. $A^{III} B^V$ турдаги яримўтказгич асосида эпитаксиал қатламлар олишнинг асосий хусусиятлари нимада?
6. Суяқ фазада эпитаксия нима?
7. Газ фазада SiC эпитаксиясини олиш қандай боради?

15-БОБ. ДИФфуЗИЯ УСУЛИДА ТУЗИЛМАЛАР ОЛИШ

15.1. УМУМИЙ МАЪЛУМОТЛАР

Яримўтказгичларда диффузия ҳодисалари умумий тарзда 3-бобда қаралган эди. Бу бобда тузилмалар олиш масалалари кўрилади.

Ишлаб чиқаришда киришмалар диффузияси яримўтказгични легирлашнинг кенг тарқалган усули бўлиб, у электрон-тешик тузилмалар яратишда, интеграл микросхемаларнинг (ИМСларни) актив ва-passив элементларини ажратишда ишлатилади. Усулнинг асосий афзаллиги—аппаратураларнинг соддалиги, жараёнининг бошқарувчанлиги, содда математик моделлар асосида диффузион шаклларни олдиндан айтиш мумкинлигидир. Ҳимоя ниқобини қўллаш билан киришмаларни маҳаллий диффузияси—планар технологиянинг асосини ташкил қилади. Диффузион легирлашни яримўтказгичларга бошқа усулларда киришмалар киритиш билан ҳам қўшиб олиб борилиши яримўтказгичли асбоблар янги турлари яратилишига олиб келди.

Кремний ёки германийнинг ўтказувчанлик турини ўзгартириш учун диффузиядан фойдаланишни 1952 йили биринчи бўлиб америкалик олим Пфанн таклиф қилган.

Яримўтказгичли пластинкалар сиртида диффузион тузилмаларни тайёрлашда ички томон диффузияни ўтказиш учун легирловчи киришманинг юқори концентрацияси анча юқори температураларда вужудга келтирилади. Таглик сиртидаги киришма концентрацияси диффузия жараёнида ўтказилган температура билан аниқланса, ички томон кириш чуқурлиги жараёнининг ўтказилиш вақти билан аниқланади.

Диффузия усули яримўтказгич пластинкалар ёки унда ўстирилган эпитаксиал қатламларга яримўтказгич намуна ўтказувчанлигига нисбатан бошқа турдаги ўтказувчанлик ёки анча кичик электр қаршилик олиш учун кенг қўлланилади. Биринчи ҳолда икки қутбли транзисторни эмиттер ва база соҳалари, майдон транзисторларнинг манба ва пайнов-

лари, интеграл схемаларда элементларни бир-биридан ва умумий пластинкадан ажратишни амалга ошириш мумкин. Иккинчи ҳолда ИМСларда резисторлар, коллатор ёки контакт яқинидаги соҳаларда қаршилиқни камайтириш учун яширин $n+$, $p+$ -соҳалар вужудга келтирилиб, омик контакт сифатини яхшилаш мумкин.

Диффузия усули яна поликремний қатламларни легирлаш учун ҳам қўлланилади.

Яхши импульс хоссали тезкор тузилмаларни тайёрлашда асосий бўлмаган ток ташувчиларнинг яшаш вақтини камайтирувчи ва яримўтказгичнинг тақиқланган зонасида чуқур сатҳлар ҳосил қилувчи киришмаларни киритиш учун диффузиядан фойдаланилади. Кремний учун бундай киришмалар сифатида олтин ёки никель ишлатилади. Диффузион қатламлар қалинлиги 0,1..100 мкм.гача бўлади.

Диффузион легирланган қатламларнинг асосий хоссаларидан бири, таглик ёки эпитаксиал қатлам ҳажмида киришма концентрациясининг нотекис тақсимланишидир, яъни сиртда концентрация энг катта ва қатлам ичи томон камайиб боради.

15.2. ДИФФУЗИЯДА КИРИШМАЛАР ТАҚСИМОТИ

Яримўтказгичда киришма атомларининг диффузияси атомлар концентрацияси камайиши йўналишида тартибсиз иссиқлик ҳаракат туфайли юз беради. Атомлар ё вакансия бўйича ёки тугунлар ораси бўйича кўчади. Яримўтказгичларда асосий легирланувчи киришмалар асосан вакансия бўйича, қолган киришмалар эса — тугунлар ораси бўйлаб юз беради. Яримўтказгичлар технологиясида киришма атомлари тақсимотининг иккита ҳолати бор:

1) агар бошланғич пайтида текис юпқа сирт қатламидан чегараланган миқдордаги киришма манбаидан диффузия кетса, унда концентрация тақсимоти кўриниши қуйидагича бўлади:

$$C(x,t) = \frac{N}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right), \quad (\text{III.41})$$

бу ерда, N — диффузиянинг ҳар қандай вақтида ўзгармайдиган (сиртнинг бирлик майдонига тўғри келувчи) киришма атомлари зичлиги, атм/см²; x — берилган концентрацияга тўғри келувчи чуқурлик, см; D — киришманинг диффузия коэффициенти см²/с; t — диффузия давомийлиги, с.

Диффузион p - n -ўтишнинг ҳосил бўлиш шarti компенса-цияланмаган киришмаларнинг натижаловчи концентрацияси $C(x,t)=0$ бўлганда, диффузион p - n -ўтишнинг чуқурлиги ҳисоблашлар бўйича қуйидаги ифода билан аниқланади:

$$x_j = 2\sqrt{Dt} \cdot \sqrt{\ln(C_o / C_b)}, \quad (\text{III.42})$$

бу ерда, C_b — яримўтказгич пластинкадаги киришма концентрацияси, $x=0$ да (сиртда) киришма концентрцияси:

$$C_o = \frac{N}{\sqrt{\pi Dt}}. \quad (\text{III.43})$$

Кўпчилик амалий ҳоллар учун p - n -ўтишнинг жойлашиш чуқурлиги:

$$x_j \approx 6\sqrt{Dt}. \quad (\text{III.44})$$

2) агар диффузия киришма атомлари ўзгармас C_o концентрация манбаидан кетса, унда тақсимот қуйидаги кўринишда бўлади:

$$C(x, t) = C_o \cdot \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}, \quad (\text{III.45})$$

бу ерда, erfc — хатоликларнинг қўшимча функцияси, унда

(III.41) ифодадаги $\operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$ ни соддалаштириб,

$$\operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \approx \exp \left[\left(-\frac{x}{2\sqrt{Dt}} + 0,3 \right)^2 \right] \quad (\text{III.46})$$

кўринишга эга бўлиш мумкин.

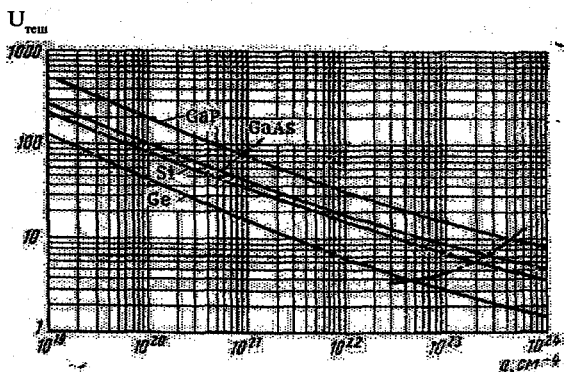
Бу ҳолат учун p - n -ўтишнинг жойлашиш чуқурлиги:

$$x_j = 2\sqrt{Dt} \cdot (\sqrt{\ln(C_o / C_b)} - 0,3). \quad (\text{III.47})$$

Диффузия усулида олинган электрон-ковак ўтишларда киришма тақсимоги текис бўлиб, эгрилиги а концентрация градиенти билан характерланади.

Яримўтказгичли кўпчилик асбобларнинг асосини электрон-ковак ўтиш ташкил қилиб, унинг энг асосий параметрларидан бири тешилиш кучланишидир. Бу параметр яримўтказгичнинг қайси материалдан тайёрланганлигига боғлиқ бўлмасдан, p - n -ўтишнинг сирт ҳолати ва геометрик кўриниши ҳамда p - n -ўтишдаги киришмалар концен-трацияси градиентига кучли боғлиқ. Шунинг учун биз бу ерда технологик тайёрланиш бўйича тешилиш кучланишнинг киришма концентрациясига боғлиқлигини эмпирик ифодаларини кўрсатамиз.

Уй температурасида Ge, Si, GaAs ва GaP материаллар асосида тайёрланган чизигий p - n -ўтишлар учун қуюн тешилиш кучланишини киришма концентрацияси градиентига боғлиқлиги III.30-расмда кўрсатилган. Ўзгармас градиентли ясси p - n -



III.30-расм. Электрон-ковак ўтишлар Ge, Si, GaAs ва GaP яримўтказгичлар асосида олинганлар учун тешилиш кучланишини киришма концентрацияси градиентига боғлиқлиги.

ўтишлар учун тешилиш кучланишларнинг аниқлашни тахминий ҳисоб формуласидан ҳам фойдаланиш мумкин:

$$U_{\text{теши}} = 60 \cdot \left(\frac{\Delta E}{1,1} \right)^{1,2} \cdot (3 \cdot 10^{20} / a)^{0,4}, \quad (\text{III.48})$$

бу ерда, ΔE — тақикланган зона, эВ ларда; a — киришмалар концентрацияси градиенти, см^{-4} .

Албатта, кескин ва текис p - n -ўтишлар тушунчалари идеаллаштирилган. Таглик пластинкада диффузия чуқурлиги ортиши ва киришма миқдори анча юқори бўлиши ўтишнинг анча текис бўлишига олиб келади ва унда фазавий заряд соҳасида киришмалар тақсимоги чизикли ўтиш моделига мос келади. Таглик пластинкада диффузия чуқурлиги ва киришма концентрацияси қанча кам бўлса, у шунчалик кескин ўтишга яқинлашади.

15.3. ПЛАНАР ТЕХНОЛОГИЯДА ДИФФУЗИЯ

Планар (plane) сўзи инглизча бўлиб, текислик маъносини англатади. Ҳозирги вақтда тайёрланадиган асбоблар ва интеграл микросхема яримўтказгичнинг текис пластинкасида махсус усуллар ёрдамида кўп сонли кичик ўлчамли элементлар (p - n -ўтишлар, контактлар, сифимлар, транзисторлар ва ҳ.к.) дан бир бутун тузилма кўринишда олинади. Ана шу технология планар технология дейилади

Планар технологияда, айниқса, яхши назоратга олинган кичик сирт концентрациясини олиш зарур бўлса, диффузия икки босқичда олиб борилади. Олдин юқори сифатли тагликда ўзгармас сирт концентрацияни ҳосил қилиш учун қисқа диффузия- киритиш амалга оширилади (тахминан 1000°C - 1050°C да). Бунда сирт концентрацияси ё киришманинг чегаравий эрувчанлигидан ёки диффузиант манбадаги киришма миқдоридан аниқланади.

Қисқа диффузия-киритишдан сўнг таглик- пластинкалар печкадан чиқариб олинади ва киритиш билан оксидловчи атмосферада кремний сиртида ҳосил бўлган ойнасимон қатлам (масалан, бор силикатли шиша) кетказилади. Тоза пластинкалар иккинчи босқич диффузия-ҳайдаш амалини ўтказиш учун яна тоза печкага жойлаштирилади. Ҳайдаш анча юқори температура шароитида ўтказилади. Биринчи босқичда олинган юпқа диффузион қатлам учун чегараланган миқдордаги киришмалар манба вазифасини ўтайди.

Планар p - n -ўтишлар содда ясси ўтишлардан геометрик кўринишлари билан кескин фарқ қилади. Планар технологияда p - n -ўтиш кремний тўрт оксид билан ҳимояланган сирт

пардада очилган тирқиш орқали яримўтказгич ҳажмига киришма диффузияси билан ҳосил қилинади. Бунда киришма фақат ичкари томонга эмас, ҳимоя ниқоби ости сирти бўйлаб ҳам диффузияланиб пластина сиртига чикувчи p - n -ўтиш чегарасини пассивлаштиришига олиб келади.

Ҳосил бўлган p - n -ўтиш кўриниши III.31-расмда берилган. Планар p - n -ўтишларнинг жойлашиш чуқурлиги, кичиклиги сабабли, одатда 10 мкм дан ошмайди. Шунинг учун ҳам уларда ҳимоя ниқоби ости қирғоқларида эгрилик жуда катта бўлмаганлиги учун маҳаллий электрик майдонни оширишга ва қуюн тешилиш кучланишини камайишига олиб келади. Кичик планар ўтишларнинг тузилмаси ясси қисми кескин p - n -ўтишга ўхшайди. III.32-расмда ён чеккалари цилиндрик ва сферик (узук чизиклар) ли кескин p - n -ўтиш учун қуюн тешилиш кучланишини киришмалар концентрациясига боғлиқлиги кўрсатилган. Расмдан кўриниб турибдики, p - n -ўтиш ён чегара эгрилик радиуси r , ўтиш чуқурлиги x , жойлашишига тенг. Ясси қисми учун эса эгрилик радиуси чексизликка интилади ва тешилиш кучланиши энг катта бўлади.

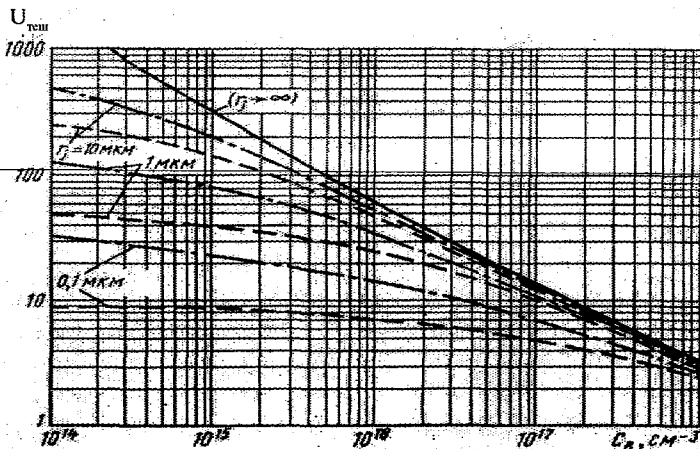
Эгрилик радиуси r , қийматлари ва бир хил киришма концентрацияларда сферик ўтишда тешилиш кучланиши цилиндрик ўтишга нисбатан кичик.

Планар p - n -ўтишларда тешилиш кучланишиларини Si, Ge, GaAs ва GaP материаллар учун қуйидаги формуладан фойдаланилади:

$$U_{\text{теш}}^* = U_{\text{теш}} \left\{ \left[(n + \gamma + 1) \cdot \gamma^n \right]^{\frac{1}{n+1}} - 7 \right\}, \quad (\text{III.49})$$

бу ерда, $U_{\text{теш}} = 60 \cdot (\Delta E / 1,1)^{1,5} \cdot (10^{16} / C_b)^{0,75}$ (III.49') — кескин p - n -ўтишлар учун аниқланган қуюн тешилиш кучланиши, унда ΔE —тақиқланган зона кенглиги, C_b —кучсиз легирланган соҳадаги киришма концентрацияси, см⁻³, цилиндрик ўтиш учун $n=1$ ва сферик ўтиш учун $n=2$; $\gamma = r/\omega$ (ω —кескин p - n -ўтишнинг фазавий заряд соҳаси кенглиги).

Ўтиш эгрилик радиуси кичик ва $\gamma \rightarrow 0$ да қавс ичидаги кўпайтма нолга интилади ва тешилиш кучланиши камаяди. Агар p - n -ўтиш чуқурлиги юқори, эгрилик радиуси кат-



III.31-расм. Турли геометрик кескин p - n -ўтишлар учун қўюн теши-
лиш қўчилишининг киришма концентрациясига боғлиқлиги.

та ва $\gamma \rightarrow \infty$ бўлса, унда кўпайтма биргача ортади ва 15.9
ифода (15.9') формулага келади.

15.4. ДИФФУЗИОН ТУЗИЛМАЛАРНИ ҲИСОБЛАШ УСУЛЛАРИ

Диффузия етарли даражада чегараланган оралиқ темпе-
ратураларда ўтказилади. Масалан, кремний учун бу оралиқ
1100-1300°C бўлиб, икки босқичли диффузияда, яъни би-
ринчи босқич киритишда температура 1150°C бўлса, иккин-
чи босқичда ҳайдашда температурани 1250°C қилиб олинади.
Температурани бундай танланишига сабаб, юқоридагилар-
дан паст температураларда диффузиант киришмаларнинг диф-
фузия коэффициенти жуда кичик ва диффузия чуқурлиги
кичкина ва 1300°C дан юқори температураларда кремний
сиртидаги бузилишлар ҳисобига диффузион қатламлар
қониқарсиз бўлади.

Диффузион жараёнлар асосан очиқ ёки ёпиқ кварц шиша
найларда ўтказилади. Булардан кўп қўлланиладиганни очиқ
найда, қаттиқ, суёқ ва газ кўринишидаги диффузиант ман-
баларда ўтказилади. Кремнийда асосий диффузиантлар бор
ва фосфор ҳисобланади. Планар асбобларни тайёрлашда диф-

фузион жараён икки босқичда ўтказилади. Биринчи босқич-киритишда кремний сиртида егс-тақсимотли киришмаларнинг юпқа диффузион қатлами вужудга келтирилади. Иккинчи босқич-ҳайдашда яримўтказгич пластинкалар диффузион атомлари бўлмаган муҳитда бир зонали печкада қиздирилиб, бунда киришмаларни диффузион қайта тақсимланиши юз беради. Иккинчи босқич киришма миқдори чегараланган манбадан диффузияга тўғри келади.

Диффузион тузилмаларни ҳисоблашда икки турдаги масала: берилган технологик режим асосида аралашма тақсимот кесимини аниқлаш (тўғри масала) ва тузилмада киришмалар тақсимотини охириги параметрларига асосан диффузия жараён режимини аниқлаш (тескари масала) ечилади.

Икки босқичли диффузия ҳоли учун киришма тақсимотини ҳисоблаш. Юқорида кўрдикки, планар технологияда диффузия икки босқичда олиб борилади. Диффузияни ўтказиш усуллари китобнинг I қисм, 3-бобида берилган. Киришма киритиш босқичи C_{01} — ўзгармас сирт концентрациясида t_1 қисқа вақтда амалга оширилади. Киритишда киритилган N киришма атомлари миқдори t_2 вақт давомида сирт концентрацияси ўзгарувчи ҳайдашда диффузиант манбаси вазифасини ўтайди:

$$C_{02} = \frac{N}{\sqrt{\pi D_2 t_2}}.$$

Икки босқичли диффузия ҳолида киришмалар кесимини кўриш учун киритиш ва ҳайдаш давомийлиги ва температурасини билиш керак. Температура T_1 учун, киришма диффузия коэффиценти D_1 ва сирт концентрацияси C_{01} киришмаларни чегаравий эрувчанлигидан аниқланади.

Киритиш босқичида киритилган киришма атомлари сиртий зичлиги киришма тақсимотини интеграллаш билан аниқланади:

$$N = \int_0^{\infty} C(x) dx = \int_0^{\infty} C_{01} \cdot \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1}} dx = 2 \cdot C_{01} \sqrt{\frac{D_1 t_1}{\pi}}. \quad (\text{III.50})$$

Ҳайдаш босқичидан сўнг киришма тақсимоти

$$C(x,t) = \frac{2C_0}{\pi} \sqrt{\frac{D_1 t_1}{D_2 t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_2 t_2}\right) = \frac{N}{\sqrt{\pi D_2 t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_2 t_2}\right) \quad (\text{III.51})$$

ифода билан аниқланади.

1-м и с о л. Электрик ўтказувчанлиги p -тур, солиш-тирма қаршилиги 10 Ом-см бўлган кремнийга икки бос-қичли диффузия билан фосфорни $T_1=1050^\circ\text{C}$, $t_1=10$ мин, $T_2=1150^\circ\text{C}$, $t_2=2$ соат режим билан олинган p - n -ўтиш-нинг жойлашиш чуқурлиги ва аниқланган киришма тақ-симоти кесими чизилсин.

1. C_{01} ни аниқлаймиз. Бунинг учун китоб охирида берил-ган Қ.1-расмдан фойдаланиб, $T=1050^\circ\text{C}$ температура учун фосфорнинг кремнийдаги чегаравий эрувчанлиги $1,2 \cdot 10^{21}$ см^{-3} эканлигини топамиз. $C_{01}=1,2 \cdot 10^{21}$ см^{-3} деб оламиз.

2. D_1 ни аниқлаймиз. Фосфорни $T=1050^\circ\text{C}$ температура-да кремний учун фосфорнинг диффузия коэффициентини китоб охирида берилган Қ.4, а-расмдан фойдаланиб топа-миз. Унда $D_1=2,5 \cdot 10^{-14}$ $\text{см}^2/\text{с}$ эканлигини аниқлаймиз.

3. Биринчи босқич диффузия-киритишдан атомларнинг сирт зичлиги N ни аниқлаймиз:

$$N = 2C_{01} \sqrt{\frac{D_1 t_1}{\pi}} = 2 \cdot 1,2 \cdot 10^{21} \sqrt{\frac{2,5 \cdot 10^{-14} \cdot 10 \cdot 60}{3,14}} = 5,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}.$$

4. Юқоридагидек, фосфорнинг диффузия коэффициенти D_2 ни аниқлаймиз. Қ.5, а-расм, (китоб охирига қаралсин) ёр-дамида $T=1150^\circ\text{C}$ да $D_2=4 \cdot 10^{-13}$ $\text{см}^2/\text{с}$ бўлишини топамиз.

5. Тақсимот эгри чизиқларини тузамиз:

$$\begin{aligned} C(x,t) &= \frac{N}{\sqrt{\pi D_2 t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_2 t_2}\right) = \\ &= \frac{5,2 \cdot 10^{15}}{\sqrt{3,14 \cdot 4 \cdot 10^{-13} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 60}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot 4 \cdot 10^{-13} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 60}\right) = \\ &= 5,5 \cdot 10^{19} \exp\left(-\frac{x^2}{1,5 \cdot 10^{-8}}\right). \end{aligned}$$

Ҳайдашдан сўнг фосфор концентрациясини тақсимот кесими III.32-расмда кўрсатилган. Солиштириш мақсадида шу расмни ўзида киритиш босқичидан сўнг фосфорнинг тақсимланиш эгри чизиги берилган:

$$C(x, t) = C_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1}} = 1,2 \cdot 10^{21} \operatorname{erfc} \frac{x}{7,75 \cdot 10^6}$$

p - n -ўтишнинг жойлашиш чуқурлигини аниқлаймиз (III.38) формулага асосан:

$$x_i = 2\sqrt{D_2 t_2} \cdot \sqrt{\ln \left(\frac{C_{o2}}{C_b} \right)}.$$

Намуна пластинкадаги кириш-ма концентрациясини $\rho = f(C)$ эгри чизик ёрдамида $\rho = 10$ Ом·см учун $C_b = 1,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ бўлишини аниқлаймиз (китоб охиридаги Қ. 3-расмга қаралсин).

Унда

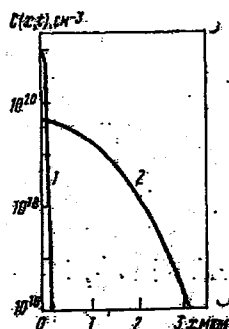
$$x_i = 2\sqrt{4 \cdot 10^{-13} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 60} \cdot \sqrt{2,3 \cdot \lg \left(\frac{5,5 \cdot 10^{19}}{1,2 \cdot 10^{15}} \right)} = 3,5 \cdot 10^{-4} = 3,5 \text{ мкм}.$$

Соддалашган (III.60) формула бўйича

$$x_i = 6\sqrt{D_2 t_2} = 6\sqrt{2,3 \cdot 10^{-9}} = 3,2 \text{ мкм}.$$

етарли даражада аниқ қийматга эга.

Кетма-кет иккилама диффузияда киришма тақсимотини ҳисоблаш. Диффузион транзисторлар, тиристорлар, варикаплар ва жуда кўпчилик бошқа асбоблар тайёрлашда турли электрик ўтказувчанликка эга бўлган қатламларни юзага келтирувчи киришмаларни кетма-кет диффузия йўли билан актив тузилмалар олинади. Агар олдин параметрлари C_{oA} , D_A , t_A бўлган акцептор киришма, кейин параметр-



III.32-расм. Кириш (1) ва ҳайдаш (2)дан сўнг фосфор тақсимотини ҳисоблашлар натижасида олинган кесими.

лари C_{od} , D_d , t_d донор киришма n -турдаги электрик ўтказувчанликли яримўтказгичга концентрацияси C_b бўлган киришма текис легирланган n -турдаги электрик ўтказувчанликли яримўтказгичга иккиланган кетма-кет диффузия қилинса, унда концентрациянинг натижавий тақсимои куйидаги кўриниш олади:

$$C(x, t) = C_{oa} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_A t_A}\right) - C_{од} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_d t_d}} - C_b. \quad (\text{III.52})$$

Шундай қилиб, акцептор ва донор киришмалар ўзаро бир-бирини компенсациялайди, унда ҳисоблашда концентрациялар тақсимот кесим қийматлари мусбат (акцептор учун) ва манфий (донор учун) белгилар берилади ёки тескарис. Биринчи диффузия анча чуқур, кейингилари эса анча саёз, бироқ юқори концентрацияда бўлиши керак. Шунинг учун кетма-кет иккиланган диффузияда (III.48) формулага асосан, n - p - n -тузилма, агар киришма ўрни ўзгартирилса, p - n - p -тузилма олинади. Худди шу усулларда транзистор олинади. Кичик сирт концентрация ва қатта чуқурликдаги биринчи диффузия база дейилади. У транзистор тузилманинг p -соҳали базасини яратиш учун хизмат қилади. Юқори сирт концентрация ва кичик чуқурликдаги иккинчи диффузия эмиттер дейилади. У электрик ўтказувчанлиги n -турли эмиттер соҳани олиш учун мўлжалланган.

База p -соҳани олиш учун диффузия иккита босқичда олиб борилганлиги учун унинг йиғинди тақсимои (III.52) Гаусс эгрилиги кўринишида бўлади. Унда эмиттер диффузия, одатда, битта босқичда бўлиб, уни киришма тақсимот функцияси erfc функция билан ифодаланади. Агарда эмиттер диффузия вақтида акцептор киришманинг аралашини сезиларли юз бермаса, (III.48) ифода тўғри бўлади, унда умумий ҳолда

$$C(x, t) = C_{oa} \exp\left[-\frac{x^2}{4(D_A t_A + D_A^* t_d)}\right] - C_{од} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_d t_d}} - C_b, \quad (\text{III.53})$$

бу ерда,

$$C_{oA} = \frac{N_a}{\sqrt{\pi(D_A t_A + D_A^* t_D)}}; \quad (\text{III.53'})$$

бунда, D_A^* — донорлар диффузияси температурасида акцепторлар диффузия коэффициенти.

Эмиттер p - n -ўтишнинг жойлашиш чуқурлигини аниқлаш учун йиғинди концентрацияни нолга тенглаштирамиз ва тагликка легирланган киришмалар концентрацияси C_b диффузияланувчи донорлар ва акцепторлар концентрациясига нисбатан кўп марта кичиклигини ҳисобга оламиз. Унда (III.52) тақсимот учун

$$C_{oD} \operatorname{erfc} \frac{x_{is}}{2\sqrt{D_D t_D}} = C_{oD} \exp\left(-\frac{x_{is}}{4D_A t_A}\right). \quad (\text{III.54})$$

erfc -функция тақрибий ифодасидан фойдаланиб,

$$C_{oD} \exp\left[\left(\frac{x_{is}}{2\sqrt{D_D t_D}} + 0,3\right)^2\right] = C_{oA} \exp\left(-\frac{x_{is}}{4D_A t_A}\right), \quad (\text{III.55})$$

каби ўзгартириб,

$$x_{is} = \left[\left(\frac{1}{2\sqrt{D_D t_D}} + \frac{0,3}{x_{is}} \right)^2 - \frac{1}{4D_A t_A} \right]^{\frac{1}{2}} \sqrt{\ln\left(\frac{C_{oD}}{C_{oA}}\right)} \quad (\text{III.56})$$

га эга бўламиз, бу тенгламани итарация усулида ечамиз ва унинг бошланғич қийматини топамиз:

$$x_{is} = 6\sqrt{D_D t_D}, \quad (\text{III.57})$$

унда

$$x_{is} \approx \left(\frac{1}{4D_D t_D} - \frac{1}{4D_A t_A} \right)^{\frac{1}{2}} \sqrt{\ln\left(\frac{C_{oD}}{C_{oA}}\right)}. \quad (\text{III.58})$$

Эмиттер p - n -ўтишнинг жойлашиш чуқурлиги янада аниқроқ аниқланган қиймати:

$$x_{is} = \left[\left(\frac{1}{2\sqrt{D_d t_d}} + \frac{0,3}{x_{is1}} \right)^2 - \frac{1}{4D_A t_A} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{\ln \left(\frac{C_{од}}{C_{оА}} \right)}, \quad (III.59)$$

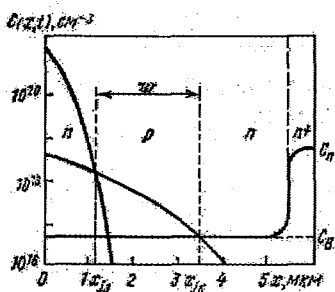
Коллектор ўтишининг жойлашиш чуқурлигини аниқлашда эмиттер диффузияда унинг силжишини ҳисобга олиш керак, шунинг учун

$$x_{jk} = 2\sqrt{D_A t_A + 4D_A^* t_d} \cdot \sqrt{\ln \left(\frac{C_{од}}{C_b} \right)}, \quad (III.60)$$

бу ерда, $C_{оА}$ (15.9') формуладан аниқланади. Бу ифодаларни конкрет ҳоллар учун, яъни $n-p-n$ -транзистор учун киришма тақсимотини III.33-расмда кўриш мумкин.

Диффузия режимларини аниқлаш. Энди тескари масалани ечишга эътибор берамиз. Тескари масала катта амалий аҳамиятга эга, чунки диффузия параметрлари бўлмиш жараён давомийлиги ва температураларни билиш орқали технологик жараёнларнинг ўзига хос хусусиятлари ва технологик қурилмалар имкониятлари аниқланади.

Тескари масалани ечиш Dt кўпайтмани аниқлашга олиб келади. Кўпинча температура T берилган бўлади ва шу температура учун тажрибалардан топилган диффузия коэффициенти қийматидан диффузия вақти t аниқланади.



III.33-расм. Иккилама кетма-кет ди ффузия йўли билан олинган $n-p-n$ -транзисторда киришмалар тақсимоти.

Баъзан режимни танлашда диффузия коэффицентининг температурага боғлиқлигини ҳисобга олмасдан киришмаларнинг чегара эрувчанлигини ҳисобга олиш ҳам мумкин.

Киришма тақсимотининг берилган параметрлари асосида диффузия режимини аниқлаш. Ҳайдаш босқичи ёки бир босқичли диффузияни ҳисоблаш учун тескари масала етарлича оддий. Дейлик, олдиндан чегараланган микдордаги киришма

ион киритиш ёрдамида ҳосил қилинган қатламдан диффузия ўтказилган бўлса, унда

$$x_i = 2\sqrt{Dt} \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{C_o}{C_b}\right)}, \quad (\text{III.61})$$

ифодага асосан:

$$Dt = \frac{x_i^2}{4 \cdot \ln\left(\frac{C_o}{C_b}\right)}. \quad (\text{III.62})$$

Энди, ё температура, ёки жараён вақти танланади. Унда ишлаб чиқариш талабига асосан кичик вақтлар учун диффузия коэффиценти ҳисоблаб топишимиз мумкин:

$$D = \frac{x_i^2}{4t \cdot \ln\left(\frac{C_o}{C_b}\right)}. \quad (\text{III.63})$$

Кетма-кет диффузия режимларини аниқлаш. Кетма-кет иккилама диффузияда эмиттер диффузия бир жинсли бўлмаган легирланган база соҳасига томон йўналган бўлганлиги учун технологик режимларни аниқлаш мураккаблашади. Бошланғич маълумотлар коллектор ва эмиттер ўтишлари жойлашиш чуқурлиги x_{ik} , x_{iz} , эпитаксиал қатламда киришмалар концентрацияси C_b , диффузияланувчи акцептор ва донор киришмалар сирт концентрацияси C_{oA} , C_{oD} деб белгиланади. Аниқлаш керак бўлган параметрлар: база диффузиясида акцептор киришмалар киритиш (T_A , t_A , N_A) ва ҳайдаш ($T_{A'}$, $t_{A'}$) режимлари эмиттер диффузиясида донор киришмалар учун ҳайдаш (T_D , t_D) режими. База диффузиясини ҳисоблаш худди бир текис легирланган яримўтказгичли икки босқичли диффузия режими ҳисоблашга ўхшаб кетади. Ҳисоблашларни соддалаштириш учун эмиттер диффузия жараёнида акцептор киришмалар тақсимои деярли силжимади, деб ҳисоблаймиз, яъни

$$(Dt)_{3r} = D_{Ar} t_{Ar} + D_{Az} t_D \approx D_{Ar} t_{Ar}, \quad (\text{III.64})$$

бу ерда, $D_{\text{ак}}$ — эмиттер диффузияда акцептор киришмалар диффузия коэффициенти.

Эмиттер диффузия режимини ҳисоблаш учун эмиттер ўтишнинг жойлашиши чуқурлигини аниқлашдан олинган тенглик (15.19) дан фойдаланилади. Уни $D_{\text{дт}}$ кўпайтмага нисбатан ечиб, температура ёки диффузия давомийлиги аниқланади:

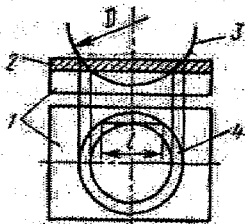
$$D_{\text{а}} t_{\text{д}} = \frac{x_{\text{и}}^2}{4 \sqrt{\ln \left(\frac{C_{\text{оА}}}{C_{\text{од}}} \right) + x_{\text{и}}^2 (4 D_{\text{а}} t_{\text{а}}) - 0,3}} \quad (\text{III.65})$$

15.5. ДИФФУЗИОН ТУЗИЛМАЛАР ПАРАМЕТРЛАРИНИ НАЗОРАТ ҚИЛИШ

Диффузион қатламларни назорат қилиш асосан, олинган p - n -ўтишнинг жойлашиши чуқурлигини, сирт қатлами ўтказувчанлиги ва киришма атомларининг сирт концентрацияси каби параметрларни аниқлаш бўйича олиб борилади.

Электрон-ковак ўтишнинг жойлашиш чуқурлигини аниқлашнинг анча кўп тарқалган усуллардан бири бу шлифга ранг бериш усули.

Жойлашиш чуқурлиги ўлчамини (бир микрометр ва ундан кичик тартибли) ўлчаш учун сферик шлифдан фойдаланиш қулай. Уни олиш



III.34-расм. Диффузион қатламли пластинкада сферик шлиф тайёрлаш жараёни схемаси: 1-яримўтказгич пластинка; 2- p - n -ўтиш; 3-пўлат шарча; 4-шлиф тус олган p -соҳаси.

учун пластинка сиртига диаметри 35-100 мм.ли шарча қисилади ва шарчани қўзғалмас ўқ атрофида айлантириш билан пластинка сиртида чуқур ўйиқ сфера ҳосил бўлади. Бунинг учун айланувчи шар ва кристалл пластинка контакт оралиғига абразив суспензия берилади. Ўлчамлар аниқлиги юқори бўлиши учун абразив материал донасининг диаметри 1 мкм дан ошмаслиги керак.

p-n-ўтиш чегарасини очмоқ учун сферик ўйиқ чуқурлиги *p-n*-ўтишнинг жойлашиш чуқурлигидан катта бўлиши керак. Чегарани 48%ли фторид кислота (HF) га (70%ли) азот кислотани озгина 0,05%-0,1%гача қўшишдан тайёрланган едиргичда оксидланиш натижасида *p*-соҳани тусланиши бўйича аниқланади. Диффузион *p-n*-ўтишнинг жойлашиш чуқурлиги

$$x_j = \frac{\ell^2}{4D} \quad (\text{III.66})$$

ифода билан аниқланиб, унда ℓ – сферик чуқурликда ҳосил бўлган контур эгри чизигининг икки нуқтасини бирлаштирувчи тўғри чизиқ узунлиги (III.34-расм) микроскоп ёрдамида ўлчанади; D – шар диаметри.

Ўлчовлар аниқлигини ошириш учун бир қанча шлифлар тайёрланади (5 тагача), кейин олинган натижалар ўртачалаштирилади.

Сирт қаршилигини ўлчашнинг энг кўп тарқалган усулларида бири тўрт зондли усулдир. Сирт қаршилигини ўлчаш хатолиги одатда 5%-10%дан ошмайди.

Легирланган киришмалар сирт концентрациясини аниқлаш учун жараённи ўтказиш шароитига боғлиқ ҳолда диффузион соҳада киришмалар тақсимот характерини билиш зарур.

Киришмаларнинг сиртий концентрациясини аниқлаш учун тажрибада олинган диффузион *p-n*-ўтиш жойлашиш чуқурлиги ва сирт қаршилиги қийматларидан намуна крис-талларининг турли концентрацияли киришмаларда турли киришма диффузион тақсимотлари учун сирт концентрациясини график боғланишлари олинади, яъни

$$N_o = f \left[\frac{1}{\rho_s x_j^2} \right]. \quad (\text{III.67})$$

Назорат саволлари

1. Диффузиянинг қандай механизмларини биласиз?

2. Киришмалар сирт концентрациясининг физик маъносини айтинг.

3. Ўзгармас ва чегараланган манбаларда киришма диффузияси тақсимот тенгламаларини ёзинг.

4. Диффузион тузилмаларда p - n -ўтишнинг жойлашиш чуқурлигини аниқлаш ифодалари қандай?

5. Планар технологияда диффузия деганда нимани тушунасиш?

6. Кремнийда киришмаларнинг чегаравий эрувчанлиги қандай аниқланади?

7. Диффузия-ҳайдаш ва диффузия- киритиш усуллари-ни тушунтиринг.

8. Диффузия усулида p - n - p -тузилмалар қандай олинади?

16-БОБ. ИОНЛАР КИРИТИБ ЛЕГИРЛАШ УСУЛИДА ТУЗИЛМАЛАР ОЛИШ

16.1. УМУМИЙ МАЪЛУМОТЛАР

Яримўтказгич киришмалар ҳақидаги 2-бобда бу масалалар умумий тарзда қаралган эди. Олдинги бобда ва ушбу бобда улар тузилмалар олиш нуқтаи назаридан кўрилади.

Ионлар киритиб легирлаш-энергияси бир неча килоэлектрон-вольтдан бир неча мегаэлектрон-вольтгача (одатда 20-100 кэВ) бўлган ионлашган атомларни бомбардировка йўли билан тагликнинг сирт қатламига бошқарган ҳолда киритишдир.

Ион легирлаш жараёни яримўтказгич сирт қатламининг электрофизик хоссаларини ўзгартириш хусусиятига эга.

Ҳозирги вақтда ион легирлаш усули яримўтказгичлар технологиясида анча афзал бўлиб, келажакда электрон-ковак ўтишли тузилмалар ҳосил қилишнинг бошқа усуллари (қотишмали, диффузия ва эпитаксия усуллари) ўрнини олиши мумкин.

Бу афзаллик ион легирлашнинг қаттиқ жисм ва легирловчи модда ўзаро таъсири температурага боғлиқ эмаслигидан келиб чиқади. Биринчидан, бу усул универсал, чунки қаттиқ жисмга (металл, диэлектрик, яримўтказгич) ҳар қандай киришмани киритиш мумкин; иккинчидан, легирлашнинг изотоп тозалигини таъминлайди, легирланган қатламга назорат қилиб бўлмайдиган киришмалар кириб қолишидан амалий жиҳатдан сақлайди; учинчидан, ион легирлаш жуда паст температураларда ўтказилади (баъзи ҳолларда уй температурасида). Легирланган қатламларга иссиқлик ишлов (отжиг) бериш, диффузион легирлашга нисбатан анча паст температураларда ўтказилади.

Ниҳоят, ионларнинг энергиясини ўзгартириш йўли билан барча уч ўлчов йўналишида киришмалар тақсимотини бошқариш; яримўтказгич ҳажми сирти остида легирланган қатламларни олиш; оқимда ион токи зичлиги ва нурлантириш вақтини ўзгариш ҳисобига киришмаларни

аниқ дозалаш; уларни диэлектрик ва металл қопламалар орқали киритиш; легирлаш температураси мувозанат концентрациясидан юқори миқдорда киришмалар киритиш имкониятига эга.

Усулни қўлланишдаги чегаралашлар қуйидагилар:

- 1) ионлар кириш чуқурлиги кичиклиги ҳисобига p - n -ўтишларнинг жойлашиш чуқурлиги кичик бўлади;
- 2) технологик қурилма мураккаблиги;
- 3) техника хавфсизлиги бўйича махсус қоидаларга риоя қилишнинг ўта зарурлиги ва бошқалар.

Ион легирлашнинг анча кенг қўлланилишига, айниқса, киришма атомларини дозаланган миқдорда киритиш ва ундан киришма тақсимот кесимини ҳосил қилиш учун кейинги диффузион ҳайдаш манбаи сифатида фойдаланиш сабаб бўлмоқда.

Ундан ташқари, ион киритиш қўшқутблн транзисторларнинг юпқа база соҳаларини яратиш учун, МДЯ-транзисторлар чегара кўчланишларини бошқариш ва бошқа мақсадлар учун фойдаланилади.

Ион легирлаш билан олинган тузилмаларни назорат қилиш учун киришма атомлар тақсимои қесими ва заряд ташувчиларнинг самарали сирт концентрацияси текширилади.

16.2. ИОНЛАР КИРИТИЛГАН ТУЗИЛМАЛАРНИ ҲИСОБЛАШ УСУЛЛАРИ

Ион легирлашни амалга ошириш технологияси асослари қўлланиладиган киришмалар, ион легирлашнинг физик асослари китобнинг I қисм 2-бобида берилган.

1. Ион легирланган тузилмаларни технологик ҳисоблашларда худди диффузион тузилмаларга ўхшаш тўғри ва тесқари масалалар учрайди. Тўғри масала учун, мисол қилиб, берилган ионларнинг энергия ва нурланиш дозаси учун концентрация тақсимот кесимини кўрсатиш мумкин.

Моддага ионнинг кириш чуқурлиги югуриш билан характерланади. Кристаллда алоҳида ионларнинг траекториялари синган чизикли, ҳар бири тўғри чизикли қисм ва тўла узунликка ўхшашлиги билан бир-биридан фарқ қилади. Алоҳида ионларнинг югуришларини барча йиғиндиси ўртача тўла югуриш R , югуришнинг ўртача квадратик оғиш ΔR қийматлари

бўйича тасодифий катталиклар нормал тақсимои қонуни бўйича гуруҳларга бўлинади. Амалий аҳамиятга эга бўлгани ўртача нормал югуриш R_p — ионни бошланғич тезлик йўналишидаги ўртача тўла югуриш траекториясининг проекцияси ва унинг ўртача квадратик оғиши ΔR_p .

Кирилган ионларнинг концентрация тақсимои кесими нурлантирилган қатлам чуқурлиги бўйича ўртача нормал югуришлар тақсимои билан аниқланади. Ионлар югуришларини ҳисоблашларда кристаллда атомлар тартибсиз тақсимланган ҳол учун деб қаралади. Ионлар оқими шундай моддаларга тушадики, унда атомлар билан тўқнашиш тасодифий бўлиб, югуришлар тақсимои тасодифий тақсимои катталиклари билан ёзилади. Худди шундай ҳол монокристаллар учун ҳам кузатилади. Чунки, ионлар оқими пластина сиртига турли йўналишларда тушиши мумкин. Бу ҳолда кирилган атомлар тақсимои кесими Гаусс эгри чизиғи билан ифодаланади:

$$C(x) = \frac{N}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - R_p}{\Delta R_p}\right)^2\right], \quad (\text{III.68})$$

бунда N — нурлантириш дозаси, ион/см²; R_p — ўртача нормал югуриш қиймати; ΔR_p — ўртача нормал югуришнинг квадрат оғиши.

Ион легирлашда киришмаларнинг энг юқори концентрацияси диффузион легирлашга ўхшаб сиртдан эмас, $x = R_p$ чуқурликда аниқланади:

$$C_{\max} = 0,4N/\Delta R_p. \quad (\text{III.69})$$

Ион легирлаш билан эпитаксиал қатламда транзистор тузилманинг олинishiни кўрамыз.

Эпитаксиал қатлами n -тури бўлган пластинкасимон кремнийда энергияси E_A ва дозаси N_A бўлган акцептор киришма ва энергия E_D ва дозаси N_D бўлган донор киришма ионларидан, мос равишда, база ва эмиттер соҳани ҳосил қилиш учун киритиб, кетма-кет ион легирлаш билан n - p - n -турдаги транзистор ҳосил қилинсин. Бунда қуйидаги шарт бажарилиши керак, яъни ўтиш $R_{pA} > R_{pD}$ ва $C_{\max A} < C_{\max D}$

Киришмалар йиғинди тақсимоги куйидагича ифодаланади:

$$C(x) = C_{\max A} \exp \left[- \left\langle \frac{(x - R_{pA})}{\sqrt{2\Delta R_{pA}}} \right\rangle^2 \right] - C_{\max D} \exp \left[- \left\langle \frac{(x - R_{pD})}{\sqrt{2\Delta R_{pD}}} \right\rangle^2 \right] - C_B. \quad (\text{III.70})$$

Коллектор ўтишининг жойлашиш чуқурлиги куйидаги шартда аниқланади:

$$C_{\max A} \exp \left[- \left(\frac{(x_{jk} - R_{pD})}{\sqrt{2\Delta R_{pD}}} \right)^2 \right] - C_B = 0, \quad (\text{III.71})$$

унда

$$x_{jk} = R_{pD} + \Delta R_{pA} \sqrt{2 \ln \left(\frac{C_{\max A}}{C_B} \right)}, \quad (\text{III.72})$$

бу ерда,

$$C_{\max A} = \frac{N_A}{\sqrt{2\pi\Delta R_{pA}}}.$$

Эмиттер ўтишининг жойлашиш чуқурлиги $C(x_{j\beta}) \gg C_B$ шартдан аниқланади:

$$C_{\max A} \exp \left[- \left(\frac{(x_{j\beta} - R_{pA})}{\sqrt{2\Delta R_{pA}}} \right)^2 \right] = C_{\max D} \exp \left[- \left(\frac{(x_{j\beta} - R_{pD})}{\sqrt{2\Delta R_{pD}}} \right)^2 \right] - C_B, \quad (\text{III.73})$$

бунда

$$x_{j\beta} = (-m + \sqrt{m^2 - ac}) / a.$$

бу ерда,

$$a = \Delta R_{pD}^2 - \Delta R_{pA}^2 \quad m = -R_{pA} \Delta R_{pD}^2 - R_{pD} \Delta R_{pD}^2$$

$$c = R_{pA}^2 \Delta R_{pD}^2 - R_{pD}^2 \Delta R_{pA}^2 - 2 \Delta R_{pA}^2 \Delta R_{pD}^2 \ln \frac{N_A \Delta R_{pD}}{N_D \Delta R_{pA}}.$$

Эмиттер ўтишининг жойлашиш чуқурлигини соддароқ ҳолда $C(x_p) = C_B$ шартидан фойдаланиб ҳам топиш мумкин:

$$x_{jp} \approx R_{pD} + \Delta R_{pD} \sqrt{2 \ln \left(\frac{C_{\max D}}{C_B} \right)}. \quad (\text{III.74})$$

База соҳасининг қалинлигини қуйидаги ифодадан аниқлаш мумкин:

$$W \approx x_{jk} - x_{jp} \quad (\text{III.75})$$

1-мисол. Агар $C_B = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $E_A = 100 \text{ кэВ}$, $N_A = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $E_D = 200 \text{ кэВ}$, $N_D = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ бўлган *n*-турдаги кремнийга $^{11}\text{B}^+$ ва $^{31}\text{P}^+$ ларни ион легирлаш натижасида ҳосил бўлган транзистор тузилмада киришмалар концентрацияси тақсимотининг кесими ҳисоблансин.

Энергияси 100 кэВ ли бор ионлари учун $R_{pA} = 0,398 \text{ мкм}$, $\Delta R_p = 0,094 \text{ мкм}$, 200 кэВ фосфор учун $R_{pD} = 0,254 \text{ мкм}$, $R_{pD} = 0,061 \text{ мкм}$ ларни III.5-жадвалдан аниқлаймиз:

III.5-жадвал

E, кэВ		$^{11}\text{B}^+$	$^{27}\text{Al}^+$	$^{31}\text{P}^+$	$^{75}\text{As}^+$	$^{121}\text{Sb}^+$
20	R_p	78	29	26	16	14
	ΔR_p	32	11	9,4	3,7	2,4
60	R_p	244	85	73	38	31
	ΔR_p	71	27	23	8,4	5,1
100	R_p	398	144	193	58	46
	ΔR_p	94	42	35	12,5	7,4
160	R_p	603	236	201	89	67
	ΔR_p	116	60	52	18	10,5
200	R_p	725	297	254	110	81
	ΔR_p	126	70	61	22	12,5

2. Бор ва фосфорнинг макеимал концентрациясини топамиз:

$$C_{\max A} = \frac{0,4N_A}{\Delta R_{pA}} = \frac{0,4 \cdot 5 \cdot 10^{13}}{0,094 \cdot 10^4} = 2,12 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3},$$

$$C_{\max D} = \frac{0,4N_D}{\Delta R_{pD}} = \frac{0,4 \cdot 1 \cdot 10^{15}}{0,061 \cdot 10^{-4}} = 6,55 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}.$$

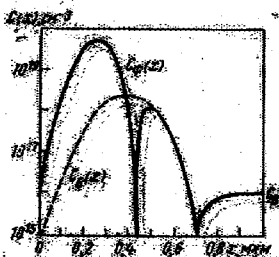
3. Коллектор ва эмиттер p - n -ўтишларнинг жойлашиш чуқурлигини топамиз:

$$\begin{aligned} x_{jk} &= R_{pA} + \Delta R_{pA} \sqrt{2 \ln \frac{C_{\max D}}{C_B}} = \\ &= 0,398 + 0,094 \sqrt{4,61 \ln \frac{2,12 \cdot 10^{18}}{1 \cdot 10^{16}}} = 0,705 \text{ мкм}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_{jp} &= R_{pD} + \Delta R_{pD} \sqrt{2 \ln \frac{C_{\max D}}{C}} = \\ &= 0,254 + 0,061 \sqrt{4,61 \ln \frac{6,55 \cdot 10^{19}}{1 \cdot 10^{16}}} = 0,510 \text{ мкм}. \end{aligned}$$

4. (III.66) ифодадан фойдаланган ҳолда n - p - n -транзисторда акцептор ва донор киришмаларнинг йиғинди тақсимоти III.35- расмда кўрсатилган.

Шу расмда киритилган бор $C_b(x)$ ва фосфор $C_p(x)$ атомларининг тақсимоти алоҳида кўрсатилган. Ундан кўриниб турибдики, ифода етарли даражада аниқликда эмиттер ўтиш ҳолатини аниқлаб берган.



Тесқари масала бўйича, агар p - n -ўтишнинг жойлашиш чуқурлиги, киришма энг катта концентрацияси $C_{\max}$ ва яримўтказгич тағлик пластинкада

III.35-расм. Ион легирлаш усулида олинган n - p - n -тузилмали транзисторда бор ва фосфор тақсимоти. киришма концентрацияси C_b маълум бўлса, киритилган киришма концентрацияси

тақсимои кесимини Гаусс эгри чизиги бўйича аниқлаш учун ўртача нормал югуриш R_p , югуришнинг ўртача квадратик оғиши ΔR_p ва нурланиш дозаси N маълум бўлиши керак.

Демак, p - n -ўтишнинг жойлашиш чуқурлиги (III.70) ифодага асосан $C(x) = 0$ да аниқланади:

$$x_j = R_p + \Delta R_p \sqrt{2 \ln(C_{\max}/C_B)}. \quad (\text{III.76})$$

Нурланиш дозасини қуйидаги муносабатдан аниқланади:

$$C_{\max} = 0,4 \frac{N}{\Delta R_p} \text{ ёки } N = 2,5 \Delta R_p C_{\max}. \quad (\text{III.77})$$

Югуришнинг ўртача квадратик оғиши ΔR_p ни аниқлаш учун график усулидан фойдаланамиз ΔR_p ва R_p лар учун бир неча қийматлар бериб, (III.74) ифодадаги тенгламанинг ўнг қисми энергияга боғлиқлигини чизамиз. Кейин энергияга параллел x_j лар учун чизиқлар чизилса, (III.70) тенгламанинг ўнг ва чап қисмлари кесишиш нуқталари E энергияни беради. Топилган энергия бўйича ΔR_p ва нурланиш дозаси N аниқланади.

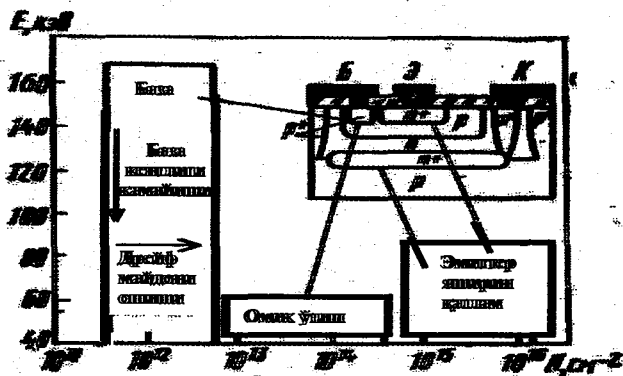
16.3. ЯРИМЎТКАЗГИЧЛИ АСБОБЛАР ТЕХНОЛОГИЯСИДА ИОН ЛЕГИРЛАШ ЖАРАЁНЛАРИДАН ФОЙДАЛАНИШ

Ион легирлаш жараёнларини юқори даражада ўрганиш яримўтказгичли асбоблар параметрларини старлича яхшилаш, уларни такрор ишлаб чиқариш, ишлаб чиқарилган маҳсулотнинг яроқли бўлишига ва баҳосини камайтириш имконини яратди. Умуман олганда, ҳозирги вақтда ион киритишни қўлламастан янги турдаги асбобларни яратиш жуда қийин ёки мумкин эмас.

Ион киритиш асосан легирланувчи киришмаларни киритиш учун кенг қўлланилади. Ион энергияси 30–300 кэВ ва $10^{11} - 10^{17} \text{ см}^{-2}$ доза оралиқларида қўлланилиши турли дискрет яримўтказгичли асбоблар яратилишига олиб келди. Буларга: қўш қутбли транзисторлар ва ИМСлар, ўта юқори частотали транзисторлар, майдон транзисторлари, фотоприёмниклар ва бошқаларни кўрсатиш мумкин.

Яримўтказгичли асбоблар ва ИМС ларнинг кейинги ривожланиши, яъни субмикронли технологияда электрон ва рентген литографияси асосида элементлар ўлчами 1 мкм дан кичик бўлган тузилмаларни олиш ҳам ион киритишсиз мумкин эмас. Мисол тариқасида қўш қутбли транзисторни тайёрлашда ион киритишнинг қўлланилишини кўрамиз.

Қўш қутбли транзисторлар. Қўш қутбли транзисторларни тайёрлашда ион киритиш эмиттер, база, коллектор ва база контактлар учун юқори легирилган соҳалар, ахратувчи бўлувчи диффузия, яширин n^+ -қағламлар ва бошқаларни олиш учун қўлланилади (III.36-расм).



III.36-расм. Қўш қутбли транзисторларни тайёрлашда ионларнинг энергияси ва доза қатламликлари.

Базани яратишда нурланиш дозаси ўзгариши эмиттер ток узатиш коэффициентини бошқариш имконини беради, ионларнинг энергиясини ўзгартириш эса, базада легирилган қиришмаларнинг тақсимот кўринишини вужудга келтиришда унинг кенглигини бошқариб, асбобларнинг такрорийлик таъсифиомаси ўзгартирилади.

Узатиш коэффициентини юқори бўлган қўш қутбли транзисторларни яратиш учун иккита усул қўлланилади. Улар p -базани ҳосил қилиш учун юқори энергияда унча кагта бўлмаган дозада борни ва кичик эмиттерни олиш учун юқори дозада арсеннийни киритишга асосланган. Биринчи ҳолда киритилган қиришма кесимини ўзгармас сақлаш ва 10-15 мин

давомида 900–950°C температурада эмиттер қатламини ис-
сиқлик ишлов (отжиг) жараёнида киришмаларни юқори
электрик фаоллигини таъминлашга. Иккинчи ҳолда, юқори
температурали қисқа вақтли эмиттер киришмаларнинг ҳай-
дашидан фойдаланилади. Қўш кутбли транзистор тузилмаси-
ни тайёрлаш бор диффузияси ёрдамида пассив базани яра-
тишдан бошланади.

Никоб ҳимоясининг қалинлиги 1 мкм бўлган SiO_2 дан
фойдаланиб, энергияси 100 кэВ ва дозаси 10^{15} – 10^{16} см⁻² бўлган
 $^{75}\text{As}^+$ ионлар киритилади. 1000°C да 20–30 мин иссиқлик
ишловдан сўнг арсений 0,3 мкм чуқурликка диффузияла-
ниб, эмиттер *p-n*-ўтиш ҳосил бўлади.

Актив база 200 кэВ энергияли ва $2 \cdot 10^{12}$ – 10^{13} см⁻² дозали
борни киритиш ва 850°C да 20 мин давомида термик ишлов
жараёнида вужудга келтирилади. Чунки, борнинг ўртача нор-
мал югуриши 725 нм, югуришнинг ўртача квадратик оғиши
126 нм.ни ташкил қилади, унда бор тақсимои кесимининг
асосий қисми кристалл чуқурлигининг эмиттер қатламида
жойлашади. Шу йўл билан тайёрланган транзисторларнинг ток
бўйича кучайтириш коэффициенти 100–300 ва чегара частотаси
1–8 ГГц ни ташкил қилади.

Назорат саволлари

1. Ион легирлашнинг тузилмалар олишдаги афзалликларини ва камчиликларини айтинг.
2. Ион легирлашда *p-n*-ўтишнинг жойлашиш чуқурлиги қандай аниқланади?
3. Ион легирлаш усулида олинган транзисторда концентрация тақсимои кўринишини чизинг.
4. Ион легирлашда киритиш энергияси қанча бўлиши мумкин?

17-БОБ. ПЛАНАР ТЕХНОЛОГИЯДА ХИМОЯВИЙ ДИЭЛЕКТРИК ПАРДАЛАР

17. 1. УМУМИЙ МАЪЛУМОТЛАР

Яримўтказгичли асбоблар ва интеграл микросхемаларни планар технология бўйича тайёрлашда химоявий ди-электрик пардалар катта рол ўйнайди. Улар донор ва акцептор киришмаларни маҳаллий диффузия қилишга, микросхеманинг актив ва пасив элементларини бир-биридан изоляциялашга ҳамда *p-n*-ўтишларни ташқи таъсирлардан химоялашга имконият беради. Шунинг учун планар технология химоявий диэлектрик пардаларга қуйидаги асосий талаблар қўяди: бошланғич таглик сиртига диффузияланувчи элементларнинг (бор, сурьма, арсений ва бошқалар) киришини тўла химоялаш; вақт ўтиши билан кимёвий барқарорлик ва турғунлик; бир жинслилик ва нуқсонсизлик; юқори солиштирма қаршилиқ ва электрик мустаҳкамлик; юқори механик мустаҳкамлик талаблари қўйилади. Албатта, бу талабларни тўла бажарадиган моддани топиш қийин. Бироқ маълум талабларга жавоб берадиган моддалар мавжуд.

Химоявий диэлектрик пардалар учун таянч материаллар сифатида кварц, кремний моноксид ва тўрт оксиди, кремний нитриди ва бошқалардан химоявий диэлектрик пардалар тайёрлаш учун фойдаланиш мумкин. Бироқ ҳозирги кунда иккита материал кремний тўрт оксиди ва нитриди кенг қўлланилмоқда.

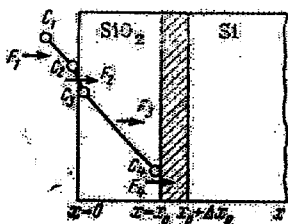
17. 2. КРЕМНИЙНИ ТЕРМИК ОКСИДЛАШ КИНЕТИКАСИ

Планар технологияда яримўтказгичли асбоблар ва интеграл микросхемалар тайёрлашда кремнийни термик оксидлаш усули кенг тарқалган. Бунда бошланғич кремний тагликда оксидловчи муҳитда қиздириш натижасида химоявий диэлектрик парда SiO_2 олинади. Бу усул қалинлиги ва тузилиши бўйича текис ҳамда юқори химоя ва диэлектрик хоссага эга

бўлган сифатли ниқобловчи парда олиш имкониятини беради. Кислород муҳиtida кремний термик оксидлашда ҳимоявий диэлектрик парда SiO_2 нинг ҳосил бўлиши жараёни кинетикасини кўрамыз.

Термик оксидланиш жараёнини билиш учун оксидловчи оқим тушунчасини киритамиз. “Оксидловчи оқим” деганда бирлик вақтда тағлиқнинг бирлик сиртидан ўтувчи оксидловчи молекулалар миқдори тушунилади.

III.37-расмда кремнийнинг термик оксидланиш жараёни модели кўрсатилган бўлиб, у оксидловчи (газ) — оксид қатлам (қат.) — кремний тағлиқдан иборат. Бу тизим орқали



III.37-расм. Кремнийнинг термик оксидланиш жараёни модели.

тўрт оксидга оксидловчи оқим ўтади ва уларнинг ҳар бири оксидловчи ташқи муҳит-кремний тағлиқ тизим соҳаларидан бирига мос келади.

Расмдан кўриниб турибдики, F_1 оқим кремний тағлиқ сирти томон оксидловчи газ фаза масса кўчиришига тўғри келади. Маълумки, кремний сиртида ҳамма вақт юпқа оксид қатлами мавжуд, унда F_1

оқим бу ҳолда оксид сирти томон оксидловчинини кўчиришга мос келади. Бу кўчириш диффузия жараёни ҳисобига ҳамда газ-ташувчининг оқими билан мажбурий кўчиши ҳисобига амалга оширилади. Кўчиш тезлиги оксидланиш жараёнининг технологик режимига боғлиқ бўлади.

Саноат кремнийни термик оксидлаш жараёни учун аниқ бир тезликда ишчи камера орқали ўтувчи мажбурий оксидловчи F_1 оқимдан фойдаланилади:

$$F_1 = h (C_1 - C_2) \quad (\text{III.78})$$

бу ерда, h — оксидловчи газ кўйинишидаги массанинг кўчириш жараён тезлиги доимийси; C_1 — ҳажмда газ фазадаги оксидловчининг мувозанатий концентрацияси; C_2 — оксид сирти яқинида оксидловчи концентрацияси.

Оксидловчи зарралар оксид сиртига етиб борганда, бу сиртда ютилиб, эриб кетади. Бунда газ фазада оксидловчи

концентрацияси ва қаттиқ фазада эрувчи оксидловчи концентрацияси муносабатларидан тақсимот коэффициенти аниқланади. Оксидда оксидловчининг эриш жараёни ҳаракатдаги куч газ-оксид сирт системасида оксидловчи концентрацияси градиенти бўлади. Шунинг учун оксидловчи оқим:

$$F_2 = \delta (C_2 - C_3), \quad (\text{III.79})$$

бу ерда, δ — оксид қатламда оксидловчининг эриш жараёни тезлиги доимийси; C_3 — газ фазали оксид қатлам чегарасидаги оксидловчи концентрацияси.

Оксид қатламда эриган оксидловчи газ фаза сирти чегарасидан — оксиддан оксид чегара — кремний таглик томон диффузияланади. Бу ҳолда оксидловчи оқим F_3 оксид чегарасидаги концентрациялар фарқига пропорционал ва оксид қатлам қалинлигига тескари пропорционал. Шундай қилиб, оксидловчи оқим:

$$F_3 = D \frac{C_3 - C_4}{x_0}, \quad (\text{III.80})$$

бу ерда, D — оксидда оксидловчининг диффузия коэффициенти; C_4 — оксид-кремний таглик чегарасида оксидловчи концентрацияси; x_0 — оксид қатлам қалинлиги.

Оксид қатлам орқали диффузияланувчи оксидловчи оксид-кремний чегарасидан ўтиб кремний билан реакцияга киришади. Натижада, кремнийнинг оксидланиши янги оксид қатламни ҳосил қилади. F_4 оқим оксид-кремний сирт қисмида рўй берадиган оксидланиш реакциясининг кимёвий тезлигини характерлайди. Кремнийнинг оксидланиш тезлиги оксидловчи концентрациясига пропорционал, натижада

$$F_4 = k C_4, \quad (\text{III.81})$$

бу ерда, k — оксидланиш реакцияси тезлиги доимийси.

Агар мувозанат режимида барча оқимлар бир-бирига тенг десак, унда $F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = F$ бўлса, оқимлар учун тенгламани биргаликда ечиш натижасида оксидловчининг йиғинди оқими учун ифода олиш мумкин.

Газ-ташувчи ламинар(қатламдор) оқим ва оксидловчини газ-қаттиқ жисм чегара қисмида оксидловчининг концентрацияси тақсимотини чизигий деб кўрсак,

$$C_1 = aC_2, \text{ бу ерда } 0 < a < 1,$$

$$F_2 = F_4 \text{ шартдан}$$

$$d(C_2 - C_4) = kC_4 \quad \text{ёки} \quad \frac{k}{\delta} = \frac{C_2 - C_4}{C_4} \quad (\text{III.82})$$

ифодани топамиз. $F_3 = F_4$ шартдан:

$$D \frac{C_3 - C_4}{x_0} = kC_4 \quad \text{ёки} \quad \frac{kx_0}{D} = \frac{C_3 - C_4}{C_4}. \quad (\text{III.83})$$

Бу ифодаларни ҳадма-ҳад қўшиб, C_4 нинг C_1 га ($C_1 = aC_2$) боғлиқлигини топамиз:

$$\frac{kx_0}{D} + \frac{k}{\delta} + 1 = \frac{C_3 - C_4}{C_4} + \frac{C_3 - C_3}{C_4} + 1, \quad (\text{III.84})$$

$$C_4 = \frac{C_2}{1 + \frac{k}{\delta} + \frac{kx_0}{D}} = \frac{\frac{C_1}{a}}{1 + \frac{k}{\delta} + \frac{kx_0}{D}}. \quad (\text{III.85})$$

F_4 оқим ифодасига C_4 қийматни қўйиб, оксидловчининг йиғинди оқимини аниқлаймиз:

$$F = \frac{\frac{k}{\delta} \cdot C_1}{1 + \frac{k}{\delta} + \frac{kx_0}{D}} = k_{\text{эф}} \cdot C_1, \quad (\text{III.86})$$

бу ерда, $k_{\text{эф}}$ — оксидланиш жараёни тезлигининг самаравий доимийси.

Агар оксидни бирлик V ҳажмда ҳосил бўлишида оксидланиш реакцияси натижасида N та оксидловчи заррача ўтган бўлса, унда оксид қатламнинг ўсиш тезлиги қуйидаги тенглама билан ифодаланади:

$$\frac{dx_0}{dt} = \frac{F}{N} = FV = k_{\text{эф}} C_1 V, \quad (\text{III.87})$$

$$\frac{dx_0}{dt} = \frac{\frac{1}{a} C_1 V}{1 + \frac{k}{\delta} + \frac{kx_0}{D}} = \frac{\frac{1}{a} C_1 V D}{\left(\frac{1}{k} + \frac{1}{\delta}\right) D + x_0}. \quad (\text{III.88})$$

Белгиланшлар киритамиз:

$$A = 2\left(\frac{1}{k} + \frac{1}{\delta}\right) D \quad \text{ва} \quad B = 2\frac{1}{a} C_1 V D, \quad (\text{III.89})$$

унда

$$\frac{dx_0}{dt} = \frac{B}{A + 2x_0}. \quad (\text{III.90})$$

Бу тенгламанинг иккала томонини интеграллаб, оламиз:

$$\int (A + 2x_0) dx = \int B dt \quad (\text{III.91})$$

ёки

$$x_0^2 + Ax_0 - Bt = 0 \quad (\text{III.92})$$

га эга бўламиз.

Бу квадрат тенгламани ечиб, вақт функциясида оксид қалинлиги учун ушбу ифодани оламиз:

$$x_0 = -\frac{A}{2} + \frac{A}{2} \sqrt{1 + \frac{4Bt}{A^2}} \quad (\text{III.93})$$

ёки

$$\frac{2x_0}{A} = \sqrt{1 + \frac{4Bt}{A^2}} - 1. \quad (\text{III.94})$$

Кремнийнинг термик оксидланиш жараёнини иккита чегаравий ҳоллар учун кўрамыз. Оксидланиш жараёни вақти катта бўлганда, яъни $t \gg \frac{A^2}{(4B)}$ бўлганда,

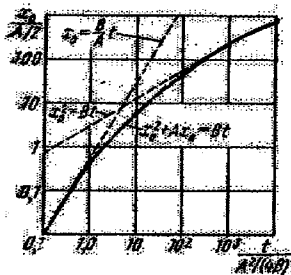
$$\left(\frac{2x_0}{A}\right)^2 = \frac{4Bt}{A^2} \quad (\text{III.95})$$

ифодани оламиз. Шундай қилиб, бу чегаравий ҳол учун оксидланиш термик жараёнининг параболик қонунига эга бўлди. Бу ерда B коэффициент оксидланиш тезлиги доимий сифатида кўрилади.

Бошқа чегаравий ҳолда, оксидланиш вақти кичик бўлганда, яъни $t \ll A^2 / (4B)$ шартда

$$\frac{2x_0}{A} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{4Bt}{A^2} \right); \quad x_0 = \frac{B}{A} t \quad (\text{III.96})$$

ифодани оламиз.



III.38-расм. Кремний 2-оксид

парда қалинлигининг кремний оксидланиш жараёни ўтказиш вақтига боғлиқлиги.

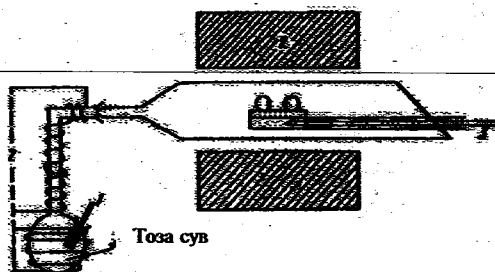
Оксид қатламнинг термик оксидланиши жараёни ўтказиш вақтига боғлиқлиги икки чегаравий ҳол учун III.38-расмда кўрсатилган.

17. 3. СУВ БУҒИДА КРЕМНИЙНИ ТЕРМИК ОКСИДЛАШ

Кремний сиртида юқори тозаликдаги (10-20 МоМ·см тартибда) ҳимоявий диэлектрик парда

олиш учун сув буғида термик оксидланишдан фойдаланилади. Буғ миқдори реакция тезлигини чегараламаганда, сув буғи билан кремнийнинг юқори температурадаги реакцияларидан фойдаланилади. Сув буғлари парциал босимини ушлаб туриш учун кремний пластинкалар сиртида сувни қиздириб туриш керак (III.39-расм). Оксид пардани тузилмали шаклланиши кремний сиртига оксид қатлам орқали сувни диффузион кўчиши ҳисобига бўлади. Оксид парданинг тузилмали шаклланишига оксидланиш реакция жараёни натижасида водороднинг пайдо бўлиши ва унинг пластинка ички томон диффузияси таъсир кўрсатади. Чунки, водороднинг 1050°C температурада диффузия коэффициенти $2 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$ бўлиб, сувнинг шу температурада диффузия коэффициен-тидан ($9 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2/\text{с}$) анча юқори, унда кремний-оксид чега-

ра қисмида гидроксидларнинг пайдо бўлишига фақат сув молекулалари мавжудлигигина эмас, водороднинг ҳам бўлишлиги билан тушунтирилади.

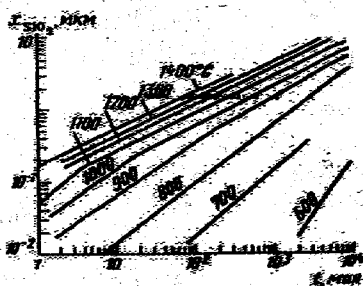


III.39-расм. Сув буғида кремнийни оксидлаш учун қурилма схемаси: 1-термометр; 2-қаршилиқ печкаси; 3-термопара.

Оксидланиш жараёни 1100°C дан юқори температураларда оксид қатлам ҳосил бўлиши параболик қонун бўйича, яъни $x^2 = Vt$ қонунига мос келади. 1100°C паст температураларда жараён қуйидаги қонуният кўринишида кетади:

$$x^2 + b_1 x = b_2 t. \quad (\text{III.97})$$

Оксидланиш температураси қанча кичик бўлса, оксид қатлам ҳосил бўлиш қонуни чизигийликка яқин бўлади. Оксид қатлам



III.40-расм. Сув буғи муҳида турли температураларда ўстирилган SiO_2 парда қалинлигининг вақтга боғлиқлиги: 1- 600°C ; 2- 700°C ; 3- 800°C ; 4- 900°C ; 5- 1000°C ; 6- 1100°C ; 7- 1200°C ; 8- 1300°C ; 9- 1400°C .

чизигий ўсишини $500\text{--}800^{\circ}\text{C}$ температураларда юқори босим ($2, 5 \cdot 10^5\text{--}4, 0 \cdot 10^7$ Па) остида сув буғида олиш мумкин.

Сув буғи муҳида турли температураларда оксид парда қалинлиги ўзгаришини жараённинг ўтказиш вақтига боғлиқлиги III.40-расмда кўрсатилган.

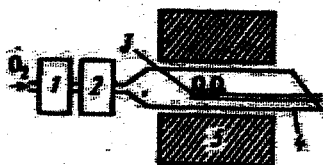
Албатта, оксид қатламнинг ўсиш тезлиги тағлиқнинг йўналишига, электрик ўтказувчанликнинг турига ва намуна тағлиқдаги киришмалар конценрациясига ҳам боғлиқ.

17.4. ҚУРУҚ КИСЛОРОДДА КРЕМНИЙНИ ТЕРМИК ОКСИДЛАШ

Қуруқ кислородда юқори температурали оксидлаш усули кремнийни оксидлаш усулларидан кенг тарқалган бўлиб, у юқори сифатли ниқоб хоссасига ва кремний-оксид чегара қисмида боғланган зарядларнинг кичик зичликдан, яъни 10^{10} см⁻² дан кам олишни таъминлайди.

Атмосфера босимида оксидлаш жараёнининг температураси 850°C-1200°C оралиғида бўлади. Оксидлашни анча паст температураларда ҳам олиб бориш мумкин. Бироқ бу ҳолда оксид ўсиши суст бўлади. Паст температураларда кислород босимини ошириш оксидланиш жараёнини тезлаштириш имконини беради.

Кислородда кремнийни термик оксидлаш учун қурилма схемаси III.41-расида кўрсатилган.



III.41-раси. Қуруқ кислородда оксидланиш учун қурилма схемаси: 1-қуритгич; 2-фильтр;

3-пластинка ушлагич; 4-кварц реактор; 5-қаршилик печкаси.

Қурилма киришма диффузияси жараёнини ўтказиш учун қўлланиладиган қаршилик печкаси (5) дан иборат. Ишчи зонада температура 900-1200°C оралиғида ўзгартирилиши мумкин. Бироқ температура аниқлиги $\pm 1^\circ\text{C}$ сатҳда ушлаб турилади. Печканинг ишчи каналига реактор (4) жойлаштирилади. Ушлагич (3) га пластинкалар ўрнатилгандан сўнг реакторга жойлаштирилади. Реакторни ташқи реакцияон муҳитдан ажратиш учун полиф билан таъминланган. Реактор кириши кислородни берувчи системага уланган, унга кислород манбаи (одатда буглантиргич билан таъминланган суюқ кислородли Дьюар идиш), қуритгич (1) ва фильтр (2) киради. Узатувчи магистралга жўмак уланган бўлиб, кислород сарфини бошқаради ва ротометр унинг сарфини ўлчаш учун уланган. Газ оқими тезлиги соа-тига бир неча ўн литрни ташкил қилади.

Кислородда кремнийнинг термик оксидланиши натижасида парда ҳосил бўлиши қуйидаги реакция бўйича ифодаланади:



Кремнийнинг оксидга ўтиш жараёни унинг тузилмаси ва $\text{Si}-\text{SiO}_2$ ўтиш соҳаси тузилмасини аниқлайди. Кремний билан кислород ўзаро кимёвий таъсири оксид-кремний сирт қисмида оксид сиртида, оксид ичида бўлиши мумкин.

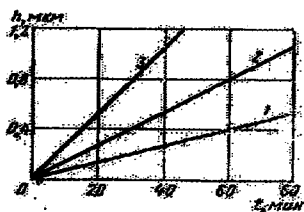
Оксид ўсиш тезлигини температурага ва парда қалинлигига боғлиқлигини турли босқичларда назорат қилиш мумкин. Оксидланиш тезлиги паст температураларда, асосан кремний-оксид чегара қисмидаги кимёвий реакция кинетикаси билан аниқланади.

Яримўтказгичли асбоблар ва ИМС лар ишлаб чиқаришда кремнийни оксидлашнинг икки ва уч босқичли усулларидан кенг фойдаланилади. Бу усуллар юқорида кўрилган усулларнинг умумлашган кўринишидир. Бунда оксидловчи сифатида қуруқ кислород, нам кислород ёки сув буғи ва яна қуруқ кислороддан кетма-кет фойдаланишга асосланилган. Бундай технологик жараёнда ҳосил бўлган кремний оксиднинг ҳимоявий диэлектрик пардаси қуруқ кислород муҳити тартибли парда ҳосил қилади, лекин ўсиш тезлиги кичик, нам кислород ва сув буғида ўсган парда тузилиши унча тақомилашмаган бўлади, лекин ўсиш тезлиги анча юқори.

Термик ўстирилган пардаларнинг чегара қалинлиги 1-1,5 мкм дан ошмайди. Планар технологияда амалий мақсадлар учун оксидли ҳимоя пардаларнинг қалинлиги 0,2-0,8 мкм ни ташкил қилиши керак. Ундан ошса, талаб даражасидаги микротасвир ўлчамини олиш қийин бўлади, камайса пардада тешиклар ва ёриқларнинг бўлиш эҳтимоли ошади.

17.5. КРЕМНИЙ ОКСИД ПАРДАЛАРИНИ ПИРОЛИТИК ЎТҚАЗИШ

Кремний оксидларини анча содда технологик усул билан кремнийсиз тагликларда кремнийнинг турли органик бирикмаларини пиролитик парчаланишидан олиш мумкин. Шундай қилиб, бу усул кремний оксид пардани ҳар қандай материаллардан тайёрланган материалга ўтқазishi мумкинлигини кўрсатади. Бу усулнинг зарурий афзаллиги шундаки, бу жараён анча паст температураларда ўтқазилади. Ушбу усулнинг икки хилини кўриб чиқамиз.



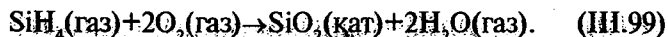
III.42-рasm. Турли температура-ларда пиролиз усулида олин-ган кремний тўрт оксиди пар-да қалинлигининг вақтга боғлиқ-лиги. 1-700°C: 2-725°C: 3-750°C.

Бу реакцияда кислород манбаи бўлиб тетраэтоксисилан ўзи хизмат қилади. III.42-рasmда парда қалинлиги жараёнини ўтказиш вақтига боғлиқлиги кўрсатилган.

Агар тетраэтоксисиланни парчаланиши таглик билан битта камерада ўтказилса, унда таглик температураси пиролиз тем-ператураси билан бир хил бўлади. Агар парчаланиши реакция-си бир камерада, таглик бошқа камерада бўлса, унда таглик температураси пиролиз температурасига нисбатан анча ки-чик бўлади.

2. Силаннинг кислород билан оксидланиши. Яримўтказгич-лар технологиясида моносиланни кислород билан оксидлаш афзал усуллардан бири бўлиб, у кремний оксид пардани $A^{III} B^V$ ва $A^{II} B^{VI}$ туридаги бирикмаларнинг стехиометрик тарки-бига таъсир қилмаган ҳолда ўтказиш имконини беради.

Кремний тўрт оксид ҳосил бўлишида реакция ўтиши учун ташқи қиздиришнинг зарурати йўқ, бироқ юқори сифатли кремний оксиди пардасини олиш учун жараён 150°C—300°C да олиб берилади:



Бу жараёнларни ўтказиш учун бошланғич моддалар бўлиб моносилан SiH_4 , аргон ёки азот (газ-ташувчи) ва кислород аралашмасидан фойдаланилади. Кучли инерт газ билан ара-лаштирилган силан (3-10%) кенг оралиқ температурада крем-ний тўрт оксидни ўтириш тезлиги 10-50 нм/ мин.га эри-шиш мумкин.

1. Тетраэтоксисиланнинг термик парчаланиши. Бу жара-ёнда реакция маҳсулотлари тўғридан-тўғри таглик сиртига ёки алоҳида камерага берила-ди.

Тетраэтоксисилан $Si(OC_2H_5)_4$ парчаланиш реакци-яси 700-750°C температуралар-да рўй беради. Реакция нати-жасида кремний тўрт оксиди, кремний оксиди, углерод ок-сиди ва газ кўринишидаги органик радикаллар ажралиб

Кислороддан ташқари оксидловчи сифатида кислороди мавжуд бирикмалар N_2O , CO_2 , H_2O лардан фойдаланиш ҳам мумкин.

Юқоридаги усулда олинган SiO_2 парда пластинка сирти бўйлаб қалинлиги бўйича текис, кимёвий таркиби барқарор ва диффузия жараёнини ўтказишда яхши ниқоб хоссага эга. Бу усулда олинган SiO_2 парда асосий хусусиятларидан бири уларда едириш тезлигининг анча юқорилигидир.

17.6. КРЕМНИЙНИ АНОД ОКСИДЛАШ

Анод оксидлашнинг икки хили мавжуд: суюқ электролитда кремний сиртини оксидлаш ва газ плазмада оксидлаш. Биринчи ҳол учун жараён электролитик анодлаш, иккинчиси учун газли анодлаш дейилади.

1. Электролитик анодлаш. Маълумки, оддий шароитда кремний доимо оксид қатлами билан тахминан 3 нм қалинликда қопланган, кремний ва муҳит ораллигида оксидловчи агент мавжуд. Шунинг учун анод оксидлашда оксид ўсиши фақат шу парда орқали реагентлар диффузион ёки дрейф кўчиши ҳисобига рўй бериши мумкин.

Анод оксиднинг хусусияти яримўтказгич — электролит чегара қисми орқали ўтувчи ион токининг параметри билан аниқланади. Анод оксидланиш асосан ўзгармас ток режимида ўтказилади. Бу режимни амалга ошириш учун керакли шароитни яратиш керак. Бунда парда қалинлиги ўсиши билан оксидга қўйилган кучланиш U чизигий ортади. Агар оксидда E майдон бир жинсли деб кўрсак, унинг қиймати вақтга боғлиқ бўлмайди, унда

$$\frac{dV}{dt} = E \frac{dx}{dt} = \frac{JEM}{aF\rho} \quad (III.100)$$

бўлади. Бунда, J — чегара қисмида ион ток зичлиги; M — оксиднинг грамм-моллардаги миқдори; ρ — унинг зичлиги; aF — бир грамм-мол оксид ҳосил қилиш учун керакли электр миқдори; $F=9,65$ Кл/мол-Фарадей сони.

(III.100) формуладан кўриниб турибдики, кучланишнинг ўзгариш тезлиги ион токи зичлигига пропорционал. Демак, ток зичлиги қанча кичик бўлса, оксидланиш шунча секин ўсади. Анод оксид хусусияти электролит таркиби-

га ҳам боғлиқ. Электролитлар сифатида одатда сув миқдори оз бўлган органик эритмалардан фойдаланилади ва ундан ташқари олий спирт ёки глицериндан ҳам фойдаланиш мумкин. Электролит ўтказувчанлигини бошқариш учун HNO_3 , H_3PO_4 , NaOH , NaNO_2 ва бошқаларни киритиш мумкин. Бу бирикмаларнинг анионлари оксидловчи ролида электроки-мёвий жараёнларда қатнашади.

2. Кремнийни газли анодлаш. Бу усул электролитик анод-лашга ўхшайди, фарқи шуки, бунда электролит ўрнига газ-дан фойдаланилади. Газли анодлаш қалин оксид пардалар олиш учун қўлланилади. Юқори частотали майдон билан кўзгатишган кислород плазма, манфий зарядланган кислород ионлари ман-баи вазифасини бажаради. Плазмадаги кислород ионлари крем-ний пластинкалар билан таъсирлашади. Оксиднинг ўсиши анод оксидлаш ўтказиш режимига, яъни ишчи камеранинг босими-га, температурага ва плазма зичлигига боғлиқ.

17.6. КРЕМНИЙНИ ПАСТ ТЕМПЕРАТУРАЛИ ИОН – ПЛАЗМА ОКСИДЛАШ

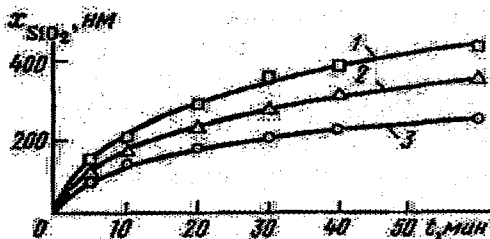
Кремнийни ион-плазма оксидлаш, бошқа яримўтказгичлар сингари тағлиқда, ҳатто уй температурасида юқори тезликда пардалар олиш имконини беради. Бу жараён яхши бошқарилади. Олинган пардалар юқори электрик тавсифномага эга.

Оксид ўсиш тезлигини оксид орқали яримўтказгич атом-лари ёки оксидловчи агент заррачалар диффузияси ёки дрей-фи белгилайди. Паст температураларда диффузия тезлиги-нинг ортиши ўсувчи қатламда диффузияланувчи заррачалар концентрацияси градиенти ўсиши ҳисобига; яримўтказгич сирт қисми-оксид ва оксид-ташқи муҳит орасидаги тезлаш-тирувчи майдон ўсиши билан дрейф тезликнинг ортиши ҳис-обига бўлади. Бу икки омил кислород таркибли плазмада ок-сиднинг ўсиш механизмига таъсир қилади.

Кислород плазмада оксидланиш 50–200 Па босимда олиб борилади. Разрядни кўзгатиш юқори частотали майдон (2,5 ГГц.гача) билан амалга оширилиб, разрядда қувват 200 дан то 1000 Вт гача ўзгариши мумкин. Қурилма узлуксиз назо-ратда бўлиб, чиқиндилар ҳажмдан чиқарилиб турилади. Ре-акцион чиқиндиларни ҳажмдан узлуксиз чиқаришни преци-зион жўмрак-йиғувчи ёрдамида назорат қилиниб, кислород

оқимида плазма динамик режимда ушлаб турилади. Плазманинг ўртача параметри қуйидагилар: Электрон температура $5 \cdot 10^4$ К, тағлиққа нисбатан анод потенциал $+35$ В, плазма зичлиги $\sim 10^{13}$ эл/см³, ионланиш даражаси $(5-6) \cdot 10^{-2}\%$. Кремний пластинка ерга уланган катодга нисбатан мусбат потенциал $(+50 \div +400\text{В})$ остида туради. Кремнийнинг оксидланишида оксиднинг ўсиши тезлиги 8-10 нм/мин ташкил қилади.

Оксид ўсиш кинетикаси (III.43-расм) парабола қонунига бўйсунди. Парданинг катта қалинликларда параболадан



III.43-расм. Ўта юқори частотали қўзғатилган $P=600$ Вт да, босими $p=20$ Па ва тағлиқнинг турли потенциали $1 > 2 > 3$ да кислород плазмада кремнийнинг оксидланиши.

озгина оғиши катта энергияли кислород ионлари билан оксиднинг чангланишидир.

17. 8. КРЕМНИЙ НИТРИДИ ҚОПЛАМАЛАРИНИ ОЛИШ. АРАЛАШ ҚОПЛАМАЛАР

Кремний тўрт оксидидан олинган ҳимоя қатламларини баъзи бир ҳолларда қўллаш мумкин бўлмай қолади. Бунга Al, Ga, In киришмаларнинг диффузиясига нисбатан ниқоб вазифасини бажаролмаслиги, оксид қатлами 0,1–0,15 мкм. дан кам бўлган ҳолда V ва P лар узоқ вақт диффузиясини ниқоблаш қийинлиги, уларнинг электрик мустаҳкамлиги нисбатан юқори эмаслиги ва ниҳоят, натрийнинг диффузия коэффиценти юқорилиги киради.

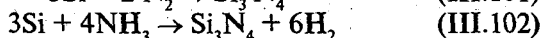
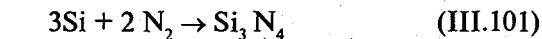
Баъзи бир ҳолларда ниқоблаш учун кремний нитриди Si_3N_4 ёки кремний нитриди ва кремний тўрт оксиди комбинацияси қўлланилади.

Кремний нитриди анча юқори кимёвий иссиқ бар-қарорликка, электр чидамейликка, диэлектрик сингдирувчанликка, ниқоблаш хоссасига эга. Натрий ионларининг диффузия коэффициенти кремний нитрида кремний тўрт оксидига нисбатан бир тартибга кам. Si_3N_4 — SiO_2 тизимда кенг сонли кимёвий бирикмалар — кремний оксинитридлар ҳосил қилиш мумкинки, уларнинг турли кўринишларини олиб хоссаларини у ёки бу томонга суриш мумкин. Кенг тарқалган кремний оксинитридларидан бири Si_2ON_2 .

Кремний нитриди қопламаларининг камчилигига $\text{Si-Si}_3\text{N}_4$ тизимда Si-SiO_2 тизимга нисбатан заряд зичлиги юқори ва нусхани едиришда вужудга келадиган қийинчиликлар киради. Бу иккала камчиликни комбинациялашган қопламалар SiO_2 — Si_3N_4 ёки SiO_2 — Si_3N_4 — SiO_2 қўллаш билан йўқ қилиш мумкин.

Кремний нитриди қатламини яна кремний сиртида ҳам вужудга келтириш мумкин. Бунинг учун азот ёки унинг актив бирикмалари билан кремний сирти нитридлинилади.

Сиртни тўғридан-тўғри нитридлаш қуйидаги реакциялар бўйича боради:



(III.101) реакцияга асосан, кремний нитриди пардасини очиқ най усулида олиш мумкин. Ишчи камерага кремний пластинкалари жойлаштирилади ва у орқали азот оқими ўтказилади. Температура 1200°C ва азот оқим тезлиги $300\text{ см}^2/\text{мин}$ да кремний пластинка сиртида кремний нитриди пардаси ҳосил бўлади. (III.102) реакцияга асосан, кимёвий реакция бўлиши учун температура янада юқорироқ бўлиши мумкин. Олинган қатламлар бир жинсли эмаслиги ва температуранинг юқори эканлиги бу усулнинг технологияда кенг қўлланилмаслигига олиб келди.

Силанни аммиак билан азотлашнинг кимёвий реакциясини қўллаш паст температураларда, яъни 700 — 1100°C да кремний нитридини олиш имконини беради. Бунда $1:20$ нисбатда силан ва аммиак $(3\div 5) 10^3\text{ см}^3/\text{мин}$ тезликда водород оқими билан биргаликда кремний пластинкалар жойлаштирилган ишчи камера орқали ўтказилади.

Одатда, газ ташувчи ва реагентлар: силан (1% гача) ва аммиак (3% гача) лар сифатида фойдаланилувчи, водород ёки аргондан ташкил этувчи ишчи аралашмадан фойдаланилиб 800—900°C да тагликда кремний нитридини ҳам ўтқазиш мумкин. Бу усулда ишчи аралашма сарфи 1000 см³/мин бўлиб, жараён вақти парда қалинлигига қўйилган талабдан келиб чиқади.

17.9. ХИМОЯВИЙ ДИЭЛЕКТРИК ПАРДАЛАРНИНГ СИФАТИНИ НАЗОРАТ ҚИЛИШ

Планар технология жараёнида кремний тўрт оксид ва кремний нитриди химоявий диэлектрик парда сифатида фойдаланилганда унинг учта асосий кўрсаткичлари назорат қилинади: 1) парда қалинлиги; 2) қалинликдаги очиқ тирқишлар; 3) кремний-химоявий парда чегара қисмидаги нуқсонлар миқдори.

Химоявий диэлектрик парда қалинлиги — планар технологияда диффузия жараёнини ўтказишда кристалларга легировчи киришмаларнинг энг кўп кириш чуқурлигини аниқловчи бош мезон.

Химоя пардаларда очиқ тирқишлар бўлиши кристалл тагликни зарарли легирланишига ва транзистор тузилмалари актив соҳалари диффузия жараёнида қисқа уланиб қолишига олиб келади.

Кремний-парда чегарасидаги нуқсонлар миқдори чегарадаги зарядлар зичлиги билан боғланган. Зарядлар зичлигининг ортиши яримўтказгичли асбоблар ва ИМС электрик параметрларини ёмонлаштиради.

Яримўтказгичлар технологиясида диэлектрик парда қалинлиги микротортиш, интерферометр ва эллипсометр усуллари билан аниқланади.

Микротортиш усули намуна тагликка диэлектрик пардани қопламасдан ва қоплагандан сўнг микротортишга асосланган.

Парда қалинлиги қуйидаги ифода билан аниқланади:

$$H = \frac{P_2 - P_1}{sd}, \quad (\text{III.103})$$

бу ерда, P_1 — пардасиз таглик массаси; P_2 — пардали таглик массаси; s — парда майдони; d — парда зичлиги.

Бу усулда аниқланган парда қалинлигининг аниқлилик даражаси тарозининг сезгирлигига, тортишнинг аниқлигига, парда майдони ва парда зичлигини ўлчашлардаги хатоликларга боғлиқ.

Кремний 4-оксид (SiO_2) ва кремний нитрид (Si_3N_4) диэлектрик пардалар қалинлигини аниқлашнинг анча содда усулларида бири ранг усулидир. У ҳимоявий парда таглик сиртига тушувчи оқ нурнинг сўндирувчи интерференциясига асосланган. Оқ ёруғликнинг маълум бир қисми сўндирувчи интерференцияда қатнашиб, парда сирти бир хил рангда кўринади. Оқ нурнинг маълум спектрал таркибловчиларининг қайтган тўлқинда бўлмаслиги туфайли ҳимоявий пардани кўз битта ранг сифатида қабул қилади.

Оқ ёруғлик нурини ҳимояланган парда пластинка сиртига нормал тушиши натижасида сўнувчи интерференция шарти қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$2dn = \frac{2k-1}{2} \lambda, \quad (\text{III.104})$$

бу ерда, d — диэлектрик пардаларнинг қалинлиги; n — пардаларнинг синдириш кўрсаткичи; λ — тушувчи ёруғлик тўлқин узунлиги; $k=1,2,3$ — интерференция тартиби.

Шундай қилиб, ҳимоявий парда ранги унинг қалинлигига тўғри келиб, бунда парда қалинлиги ошиши битта ўша ранг интерференция тартибини ўзгариши билан қайтарилади.

Кремний тўрт оксиди ва кремний нитриди диэлектрик пардаларнинг қалинлигини аниқлаш учун III.6-жадвалда кўрсатилган ранг турлари тўпламидан фойдаланиш мумкин. Ранг усули билан парда қалинлигини аниқлашда нисбий хатолик 10% дан ошмайди.

Эллипсометрик усулда SiO_2 ва Si_3N_4 пардаларнинг қалинлигини ўлчаш чизигий қутбланган нурнинг ҳимоявий парда сиртидан қайтишига асосланган. Маълум бурчак остида тушган нурни қайтишида эллиптик қутбланган тўлқин ҳосил бўлади. Одатда, қалинликни аниқлаш учун тушувчи ва қайтувчи тўлқинлар фазалари ва амплитудалари орасидаги муносабатлардан фойдаланилади. Ёруғлик манбаи сифатида лазер нурларидан ҳам фойдаланиш мумкин.

Ранг	Парда қалинлиги, мкм							
	1-тартиб		2-тартиб		3-тартиб		4-тартиб	
	SiO ₂	Si ₃ N ₄	SiO ₂	Si ₃ N ₄	SiO ₂	Si ₃ N ₄	SiO ₂	Si ₃ N ₄
Кулранг	0,01	-	-	-	-	-	-	-
Жигарранг	0,05	-	-	-	-	-	-	-
Кук	0,08	-	-	-	-	-	-	-
Бинафшаранг	0,1	0,9	0,28	0,21	0,46	0,34	0,65	0,52
Хаворанг	0,15	0,12	0,30	0,23	0,49	0,36	0,68	0,53
Яшил	0,18	0,13	0,33	0,25	0,52	0,38	0,72	0,57
Сариқ	0,21	0,15	0,37	0,28	0,57	0,42	0,75	0,61
Зарғалдоқ	0,22	0,18	0,40	0,3	0,60	0,47	0,78	0,65
Қизил	0,25	0,19	0,44	0,33	0,62	0,51	0,81	0,68

Эллипсометрик усул ёрдамида юпқа (0, 1...10 мкм) ва ўта юпқа (0,1 нм.дан 10 нм.гача) пардалар қалинлиги ва синдириш кўрсаткичларини ўлчаш мумкин.

Диэлектрик пардаларни тайёрлаш жараёни пайтида вужудга келиб қолиши мумкин бўлган ғовакларни аниқлаш учун миснинг электролитик ўтириши, диффузион легирлаш ва электрограф усуллари қўлланилади.

Мисни электролитик ўтказиш усули қуйидагилардан иборат. Сиртида кремний тўрт оксиди вужудга келтирилган кремний пластинка мис ионли электролитга жойлаштирилади. Бу пластинкага манфий потенциал берилди. Иккинчи электрод вазифасини бажарувчи ва электролитга ўрнатилган мис пластинкага мусбат потенциал берилди. Электролиз жараёнида мис ионлари қаерда ғоваклар бор бўлса ўша ерга ўтиради. Мис ўтирган оролча миқдорига қараб парда сифати тўғрисида хулоса чиқарилади. Микроскоп ёрдамида тирқишлар миқдори ва уларнинг геометрик ўлчами аниқланади.

Диффузион легирлаш усули таглик яримўтказгич материалга диффузия жараёнида киришмалар кириб материал электрик ўтказувчанлигининг ўзгартиришига асосланган. Диффузия жараёни ўтказилгандан сўнг парданинг қаерида тирқишлар бор бўлса, ўша ердан диффузия кетиб, маҳаллий *p-n*-ўтишлар ҳосил қилади. Кейин ҳимоявий парда

тагликдан кетказилади ва маҳаллий *p-n*-ўтишлар пардалардаги ғоваклар миқдори тўғрисида маълумот беради.

Анча содда ва етарлича самарали усуллардан бири электрографик усул бўлиб, унинг ёрдамида диаметри 0,1 мкм.гача бўлган тирқишларни аниқлаш имконияти бор. Ундан ташқари, бу усулда пардани бузмаган ҳолда пардадаги тирқишлар жойлашган ўрнини, геометрик ўлчами ва зичлигини аниқ ва тез аниқлаш мумкин.

Электрографик усулда пардалардаги ғовакларни назорат қилиш қуйидагича боради. Гидрохиноннинг 3-4%ли эритмасида ҳўлланган фотоқоғозлар пластиналар сиртига жойлаштирилади. Фотоқоғозли пластинкага иккита металл-диск электрод қисиб, улар орқали ток ўтказилади. Гидрохинон эритмада ҳўлланган фотоқоғоз ўтказувчан бўлганлиги учун парданинг қаерида тирқиш бўлса, ўша еридан ток ўтади. Маҳаллий ўтган токлар фотоқоғоз эмульсиясига худди ёруғлик оқимига ўхшаб таъсир қилади ва қора нуқталар ҳамда оролчалар кўринишидаги тасвирлар ҳосил қилади.

Пардадаги нуқсонлар миқдори ва ўлчами микроскоп билан аниқланади. Диэлектрик-яримўтказгич чегара қисм ҳолати, диэлектрик ости заряд ташувчилар концентрацияси, сирт потенциали, диэлектрикдаги қўзғалмас зарядлар, сирт ҳолатлар зичлиги, қўзғалмас зарядлар турғунлиги, сирт ҳолатларнинг релаксация вақти билан баҳоланади. Бу параметрларни назорат қилиш учун МДЯ (металл-диэлектрик-яримўтказгич) тузилмалар тайёрлаш ва уларнинг вольт-фарада тавсифидан сирт ҳолатлар зичлиги ва пардадаги зарядлар аниқланади. Диэлектрик-ярим-ўтказгич чегара қисми параметрларини автоматик қурилмаларда МДЯ тузилма вольт-фарада тавсифларини ўлчаш билан ҳам назорат қилиш мумкин.

Назорат саволлари

1. Планар технология деганда қандай технологияни тушунасиш?
2. Термик оксидланиш нима?
3. Кремний 2-оксиди қандай усулларда олинади?

4. Оксидланиш кинетикасини тушунтиринг.
5. Оксид қалинлиги ифодасини ёзинг.
6. Пиролиз усули қандай усул?
7. Анод оксидланишни тушунтиринг.
8. Ион-плазма оксидланишчи?
9. Яримўтказгичлар технологиясида SiO_2 ва Si_3N_4 пардалар нима мақсадларда ишлатилади?
10. Диэлектрик пардалар қалинлиги қандай назорат қилинади?

18-БОБ. ФОТОЛИТОГРАФИЯ

18. 1. УМУМИЙ МАЪЛУМОТЛАР

Фотолиитографиянинг ўтган асрнинг 50-йилларида ярим-ўтказгичлар саноатида қўлланилиши электрониканинг кейинги ривожланишини белгилаб берди ва дискрет яримўтказгичли асбоблар ишлаб чиқаришдан интеграл микросхемалар (ИМС) ишлаб чиқаришга ўтилди.

Фотолиитография планар технология жараёнининг ажралмас қисмидир. Унинг ёрдамида ниқобли пардаларда ўта кичик тирқишлар очилиб, улар орқали диффузия ўтказилади. Натижада ўта кичик тузилмалар ҳосил қилинади. Ундан ташқари, алюминий пардада металллаган расмлар олишда ҳам қўлланилади. Меца технологияда чуқур маҳаллий едириш учун контакт ниқоблар олинади.

Ҳозирги пайтда фотолиитографиянинг қўлланилиш соҳалари кенгайди. Яримўтказгичли асбоблар ва ИМС ишлаб чиқаришда фотолиитография ҳар томонлама қулай технологик жараён. У турли материалларда элемент ўлчами бир микрометр ва ундан кичик мураккаб расмларни такрорий ва катта аниқликда бажариш имкониятини беради. Фотолиитография яримўтказгичли ва пардали тузилмалар тайёрлашда яримўтказгич ва бошқа материалларда турли кўринишдаги нафис ариқчалар ва чуқурликлар олиш учун қўлланилади. Унинг ёрдамида андозалар (шаблонлар) тайёрланиб, фотолиитография бу жараёнда яримўтказгичли асбоблар ва ИМС тайёрлашда зар қоғозда очик тешиклар олишда қўлланилади. Фотолиитография тайёр тузилмали пластинка ёки тагликларни кристалларга бўлиши, прецизион қисмлар тайёрлаши, аниқ шкалалар тайёрлаши ва бошқаларни бажариши мумкин.

Яримўтказгичли тузилма ва ИМСларни тайёрлашда фотолиитографиянинг асосий вазифаси технологик қатламларда вужудга келтириладиган топологияга мос пластинка сиртида тирқишли контакт ниқоб олиш ва кейинчалик ниқобли то-

пологияни тагликнинг берилган қатламига узатишдир. Буни амалга ошириш учун махсус ишловдан ўтган пластинкалар сиртига юпқа ёруғликка сезгир материал- фоторезист қопланади. Пластинка сиртида фоторезист қуригандан сўнг, унда мустақкам парда ҳосил бўлади. Бу фоторезист парда фотоандоза орқали актиник ёруғлик билан нурлантирилиши унинг хоссаси ўзгаришига олиб келади (актиник нурланиш-фотосезгир материалларга фотолито-график таъсир ўтказиш қобилиятига эга бўлган нурланиш). Фоторезист пардани очилтириш ва полимерлаш унда керакли расмдаги шаклни олиш имконини беради, яъни пардани очиқ (фоторезист пардадан озод) ва ёпиқ (фоторезист парда бўлиши) қисмлари бўлади. Фоторезист пардада ҳосил бўлган расмнинг шакли тагликка ўтади.

Фоторезист пардада ҳосил бўлган «ойна»-тирқиш бир қанча зарурий технологик амаллар бажариш имконини беради: яримўтказгич материл қатламини кетказиш мақсадида маҳаллий едириш бажарилади ва мезатузилма яратилади, диффузия остида ойна очиш учун диэлектрик ҳимоя қатламлар (SiO_2 ва Si_3N_4) кетказилади ҳамда омик контакт-лар ва мураккаб кўринишдаги ток ўтказувчи металл қатламли йўлчалар едирилади ва ҳ.к. амаллар бажарилади.

Фотолитография кенг синфдаги яримўтказгичли асбоблар ва микросхемаларни умумий ҳолда тайёрлашда асосий жараёнлардан бири сифатида, диффузия, ион легирлаш, эпитакия ва оксидлаш, кимёвий ишлов бериш жараёнлари билан бир қаторда туради.

Фотолитография жараёнининг афзалликларига унинг оммавийлиги, универсаллиги, технологик қулайлиги ва автоматлаштириш имкониятлари киради.

Фотолитографиянинг яна имкониятларидан бири, битта тагликда бўлажак асбоб ва микросхема кўп сонли элементларини олиш мумкин. Бу эса, олдиндан тайёрланган технологик маршрут бўйича тагликларни гуруҳлаб ишлов бериш имкониятини беради.

Фотолитография ўзига мураккаб комплекс технологик жараёнларни жалб қилади. Булар механик, оптик, физик, физик-кимёвий ва кимёвий жараёнлардир. Равшанроғи, таянч ёруғликка сезгир материаллар (фоторезистлар), уни тозалаш ва ишлов бериш, тагликни тайёрлаш (кимёвий-

динамик тозалов), таглик сиртида ёруғликка сезгир пардаларни юзага келтириш; термик ишлов, очилтириш, экспозициялаш, кимёвий едириш ва бошқа амаллар шулар жумласидандир.

18. 2. ФОТОРЕЗИСТЛАР

Фоторезист деб, аввало эрувчанлиги ўзгарувчи ва кислотали ёки ишқорий едиргичларга чидамли актиник ёруғ таъсирида ўз хоссасини ўзгартирувчи моддага айтилади.

Фоторезистларнинг асосий вазифаси маълум талабга жавоб берувчи шакл, расмнинг юпқа ҳимоявий пардасини пластинка ёки қандайдир бошқа таглик сиртида яратишдир. Фоторезист ҳимоя пардасида раем шакли парданинг алоҳида қисмларга ёруғлик таъсири натижасида, ёритилган ва ёритилмаган қисмларининг дифференциал эрувчанлиги олинади. Нурлантирилган фоторезист парда очилтирилгандан сўнг, тагликда керакли раем қолади ва кейинги технологик операцияларда ҳимоя ниқоби вазифасини ўтайди, қолган қисми эса кетказилади.

Фоторезистлар органик моддаларнинг мураккаб мономер ёки полимер композицияларидир. Ёруғликка сезгир мономерли бирикмалардан тайёрланган фоторезист пардаларнинг ҳимоя хоссалари унча юқори эмас. Шунинг учун фотолитографияда мономер фоторезистлар полимерли асосга қўшимча сифатида фойдаланилади.

Фоторезистларда ёруғлик нури таъсирида юз берадиган жараёнлар фотохимёвий қонунларга бўйсунди: 1) ёруғликни фоторезист билан ўзаро таъсир реакциясида ёруғлик нури ютилса, унда реакция фотохимёвий актив бўлади; 2) ёруғликнинг химёвий таъсири ёруғлик жадаллигининг унинг таъсир вақти кўпайтмасига тўғри пропорционал; 3) ҳар бир ютилган ёруғлик квантига битта реакцияга киришган молекула тўғри келади.

Шунинг учун фотохимёвий жараён тавсифномалари учун фоторезистда юз берадиган квант чиқиш тушунчасидан, яъни реакцияга киришган молекулалар сонининг ютилган ёруғлик квантлар сонига нисбатидан фойдаланилади.

Фоторезистда фотохимёвий реакция юз бериши учун фотонлар энергияси атомларни ажратиш ёки қайта бирлаштириш учун етарли бўлиши керак.

Квант чиқиш фотохимёвий реакция тезлиги ва уларни бошқариш кўп жиҳатдан тушувчи ёруғликни спектрал таркиби ва жадаллигига ҳамда нурлантирилувчи модданинг химёвий тузилишига боғлиқ. Фоторезист таркибида спектрал сезгирликни бошқариш учун махсус моддалар — сенсibiliзаторлар киритилади, улар керакли соҳа спектрида энг катта ютилишга сийжитади. Фоторезисторларда ёруғлик энергиясини ютиши билан юз берадиган фотохимёвий реакциялар мураккаблиги ва кўп кўринишлилиги билан фарқ қилади. Уларда фотохимёвий айланишлар модданинг химёвий тузилиши ва нурлантириш шароитлари билан аниқланади.

Фоторезистларда фотохимёвий реакция кетиши характерига қараб фоторезистлар икки гуруҳга бўлинади: негатив ва позитив фоторезистлар.

Негатив фоторезистларда ёруғлик таъсирида таглик сиртида фотополимерланиш ёки фотоконденсация ҳисобига эримайдиган парда қисмлари ҳосил бўлади ва очилтирилгандан сўнг сиртда қолади.

Позитив фоторезистларда эса унинг тескариси, ёруғлик таъсирида фотоемирилиш ҳисобига эрийдиган қисмлар ҳосил бўлади ва очилтирилгандан сўнг таглик сиртида қолмайди. Сиртда қолган фоторезист қатлам оригинал расмини юқори аниқликда такрорлайди.

Фоторезистларни махсус шароитларда қўллаш учун уларнинг тавсифий параметрлари мавжуд ва улардан асосийлари қуйидагилар:

Ёруғликка сезгирлик — экспозицияга тескари, фоторезистни эрувчанлик (позитив) ёки эримайдиган (негатив) ҳолатга ўтказиш учун талаб даражасидаги катталики. Ёруғлик сезувчининг кўп жиҳатдан фоторезистда юз берадиган фотохимёвий реакция квант чиқиши билан аниқланади.

Зарур томони талабдаги тўлқин узунлик диапозонида ёруғлик — сезгирлик энг катта бўлиши керак. Кўпчилик ҳозирги замон фоторезистлари ультрабинафша нур соҳа спектри яқинида максимал сезгирликка эга.

Ажрата олиш қобилияти. Фоторезистнинг ажрата олиш қобилияти деганда, фотолитография жараёнида текис қилинликда 1мм пластинка сиртида туташмаган мумкин бўлган максимал чизиқлар сони тушунилади. Демак, ажрата олиш қобилияти

$$R = \frac{1}{2l} \quad (\text{III.105})$$

билан аниқланади. Бу ерда, l — фоторезистда чизиқ кенглиги.

Агар ярим ўтказгичли асбоб тайёрлаш учун расм шакли энг кичик ўлчам $l=1\text{мкм}$ бўлса, унда фоторезистнинг аж-

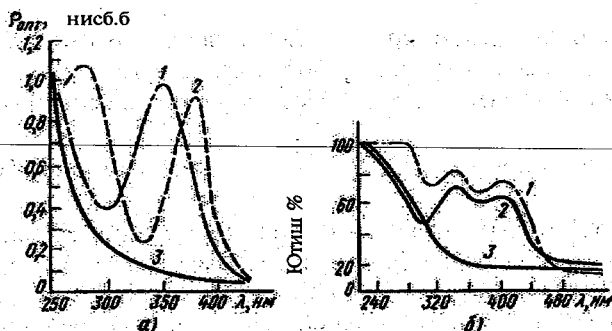
рата олиш қобилияти $R = \frac{1}{2 \cdot 0,001} = 500$ чизиқ / мм бўлади.

Фоторезистни ажратиш алоҳидалик қобилияти, яъни алоҳида элементлар тасвирини энг кичик ўлчамларда узатиш қобилияти билан характерлаш мумкин. Ажрата олиш қобилият чегараси фоторезистнинг полимер молекулалари ўлчами билан аниқланади. Асосий технологик муаммо фоторезистни ёритилган ва ёритилмаган қисм орасидаги дифференциялашган яхши чегарани олишдан иборат бўлиб, бу чегара ишловни барча босқичларида энг кичик ўзгариши керак.

Агрессив муҳит таъсирига чидамлилиқ. Бу параметрни миқдорий аниқлаш қийин. Баъзан бу катталиқ фоторезист парда қатламини олиш стандарт едиргичда ишлов бериш вақтига пропорционал бўлади. Кейинги вақтда фоторезистнинг кимёвий барқарорлик шакли едирилганда тағлиқка берувчи нуқсонлар зичлиги билан характерланади. Бундай баҳолашда олинган маълумотлар аниқ бўлмаслиги мумкин. Чунки, нуқсонлар фотолитография жараёни таъсиридангина келиб чиқмайди. Чидамлилиқ асосий шarti — тағлиқка нуқсонсиз яхши ёпишган бир жинс парда олиш, кимёвий реагентларга мумкин қадар пассив (едиргичлар ва бошқалар) бўлиши керак.

Фоторезистлар турғунлиги вақт ўтиши билан маълум сақлаш шароитларида ва фойдаланишда уларнинг тавсифномаларини ўзгармаслиги билан аниқланади.

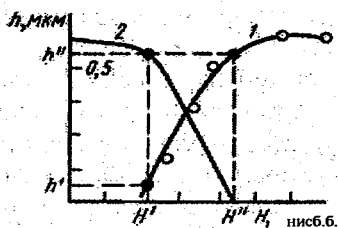
Позитив фоторезистларни фотокимёвий хоссалари турғунлигини назорат қилиш учун маълум қалинликдаги қатлам зичлигини оптик усулда ўлчанади, у дарвоқе ёруғликка сезгир марказлар концентрациясига пропорционал бўлади. Фоторезист тузилманинг вақт ўтиши билан ўзгаришлари қайтмас кимёвий айланишлар юз бераётганлигини билдиради. III.44-расмда позитив ва негатив фоторезистлар ютиш спектрлари берилган бўлиб, уларни амалда қўллаш учун зарурдир.



III.44-расм. Позитив ва негатив фоторезистлар ютиш спектрлари.

Сенсибилизаторли циклокаучук асосидаги бис-азид (1) туридаги резистлар $\lambda=350$ нм да энг катта ютиш кенглиги билан характерланади. Поливинилциннамат ПВЦ(2) туридаги фоторезистларнинг иккита ютиш кенглиги бор, улардан бири сенсибилизатор молекулалари ёруғлик ютиши (360-370 нм) билан, бошқаси поливинилциннамат молекуласининг ёруғлик ютиши (280 нм) билан боғланган.

Позитив фоторезистлар ютиш спектрида иккитадан энг катта қийматга 350 ва 400 нм ларда эришади (III.44-расм, 1 ва 2-чиизиқлар). Бу иккала энг катта қийматлар нафтохинон-диазид молекулаларининг ёруғликни ютиши билан боғланган. Ёритиладиган (ёруғлик туширилгандан сўнг) резистлар ютиш спектрлари етарли ўзгариб кетади (III.44-расм, а) чиизиқ 3; б) чиизиқ 3).



III.45-расм. Фоторезист очилтирилгандан кейин қатлам қалинлиги ўзгаришлари.

Фоторезист очилтирилгандан кейин қатлам қалинлиги ўзгаради. Бу ўзгаришларни тавсифий эгри чиизиқлардан аниқланади (III.45-расм). Расмдан кўриниб турибдики, ёритилиш вақти ортиши билан негатив резист қалинлиги ортади, позитивда эса камаяди.

Тавсифий эгри чиизиқларда фоторезистни ёруғликка сезгирлиги: $S=I/H''$, бу ерда, H'' -по-

зитив резистда (полимер тўла бузилган) экспозиция; контраст $\lambda = (h'' - h') / (H'' - H')$ ва фотографик кенглик $L = H'' - H'$, бу ерда, H' - қатламлар қўшилиши бошланадиган экспозиция.

Фоторезистлар тўғрисидаги маълумотларга асосан, уларга қўйилган бир қатор талабларни кўрсатиб ўтамиз:

1. Тўлқин узунлик оралиғи талабида юқори ёруғликка сезгирлик.

2. Юқори ажрата олиш қобилияти (ҳозирги замон талаби 0,1 мкм.гача фоторезист қатлам қалинлигида бир миллиметрга 1000-2000 чизик тўғри келади).

3. Тагликка юқори ёпишқоқлиги (яримўтказгичга, оксидга, нитридга ёки металлга).

4. Юқори контраст (экспонирлашган ва ноекспонирлашган қисмлар орасидаги кескин дифференциаллашган чегараларни олиш).

5. Кимёвий агрессив муҳитларда юқори турғунлик.

6. Қатлам сирти бўйича бир хил хоссага эга бўлиш.

7. Вақт ўтиши билан хоссалар турғунлиги.

8. Кимёвий айланишларда маҳсулотлар билан ифлосланиш бўлмаслиги.

9. Материалларнинг нисбатан содда, мустаҳкам ва қўллашга хавфсизлиги, турли усулларда ўтқазиш ва бошқа қулайликлар.

III.7-жадвалда баъзи бир фоторезистларнинг асосий тавсифлари берилган.

III.7-жадвал

Фоторезист тури	1 мкм қалинликда ажрата олиш қобилияти, чиз. Л/мм	Нуқсонлар зичлиги бўйича кислотага чидамлилиги, мм-2	Очилтиришда чидамлилиги, с	Кинематик қовушоқлиги 20°Сда сСт
ФП-307	500	0,35	90	6
ФП-309	400	0,5	-	6
ФП-330	400	0,75	60	5,9
ФП-333	500	0,2	180	6
ФП-617	500	0,5	30	21-26
ФН-106	200	0,4	-	7
ФН-108	400	0,25	-	3,5

ФП-позитив фоторезист, ФН-негатив фоторезист.

18. 3. ФОТОАНДОЗАЛАР

Фотоандозалар — актинич нурланишни ўтказмайдиган, материал сиртида схема элементларининг расмлари вужудга келтирилган шиша пластинкалар ёки полимер пардалар.

Фотоандозадаги элементлар тузилиши асбоб-тузилма қатламидан бирининг геометрик шаклини ҳосил қилади.

Фотоандозалар асосий инструмент бўлиб, унинг ёрдамида тағлиққа ўтказилган фоторезист қатламда анча мураккаб бўлган микротасвирни шаклга келтиради.

Фотоандозалар оптик шишадан тайёрланади, шиша сиртидаги раем эса фотография усулида ўтказилади. Шиша пластинкада расмни вужудга келтириш усулига қараб, фотоандозалар эмульсияли, металллаган ва ранглиларга бўлинади.

Эмульсион фотоандозаларда расм қисми оддий фотография усули билан эмульсия қатламда энг катта ва энг кичик оптик зичликда вужудга келтирилади. Бу турдаги фотоандозалар учун шаффоф элементлар (расм қисми) зичлиги шиша тағлиқ ва қумуш заррачалари бўлмаган эмульсион қатламнинг оптик зичликлари йиғиндисига тенг.

Металлаган фотоандозаларда юпқа хром қатлам ҳисобига раем қисмлари вужудга келтирилади. Бу фотоандозаларда шаффоф соҳанинг энг кичик оптик зичлиги шиша оптик зичлигига тенг, энг катта зичлик эса амалий жиҳатдан шаффоф бўлмаган хром металл қатламга мос келади.

Металлаган фотоандозалар афзаллиги ювилишга юқори чидамлилиги бўлиб, у бир неча юз марта контакт кўчирма қилиш имконини беради. Камчилиги хром парданинг кўзга кўринадиган нурлар учун юқори қайтарувчанлиги (50-60%) ва унинг тўла шаффоф эмаслигидир. Хромилаган фотоандозалар хром металл пардада микрошаклни едириш билан чекка нотекисликлари камлиги ҳисобиға анча юқори ажрата олиш қобилиятига эға. Хром парданинг юқори қайтариш хос-саси фотоандоза шаффоф элементлари остида жойлашган фоторезистни чекка қисмларидаги нурланишлари ҳақиқий расм шакли ва ўлчами ўзгаришига олиб келади.

Рангли фотоандозаларда нақш (шакл) темир оксидли парда ёрдамида бажарилади. Энг кичик оптик зичлик металллаган фотоандозалар сингари шишанинг оптик зичлигига тенг, энг катта зичлик эса, амалий жиҳатдан темир оксид парданинг

ультрабинафша диапазонда шаффофмас энг катта зичлигига мос келади.

Рангли фотоандозаларнинг металлашган фотоандозаларга нисбатан афзаллиги унча юқори эмас. Уларда кўринадиган нурни қайтариш имконияти (10-15%) ва шаффоф.

Рангли фотоандозалардан фойдаланиш контакт нусха олишда ёруғликни қайтиш самарасини камайтириб, олинadиган микротасвирларнинг сифатини яхшилайдди. Темир оксид пардани кўринадиган нурлар учун шаффофлиги ранг-ли фотоандозадаги шаклини таянч пластинкадаги нақш билан бирга содда ва сифатли қўшилишига олиб келади.

Фотоандозаларга қуйидаги асосий талаблар қўйилади: нақш элементларининг геометрик ўлчамларининг юқори аниқлиги, қисмлар орасидаги қадам ўлчамларининг аниқлиги, вақт бўйича нақш ва унинг ўлчами турғунлиги, ювилишга чидамлилиги, ишчи сиртлари ясси параллеллиги, фотоандозалар тўпламининг бир-бирига қўшилиши талаблари қўйилади.

18.4. КОНТАКТЛИ ФОТОЛИТОГРАФИЯ

Контактли фотолитографияда технологик жараён схемаси III.50-расмда кўрсатилган. Барча амалларни учта гуруҳга бўлиш мумкин:

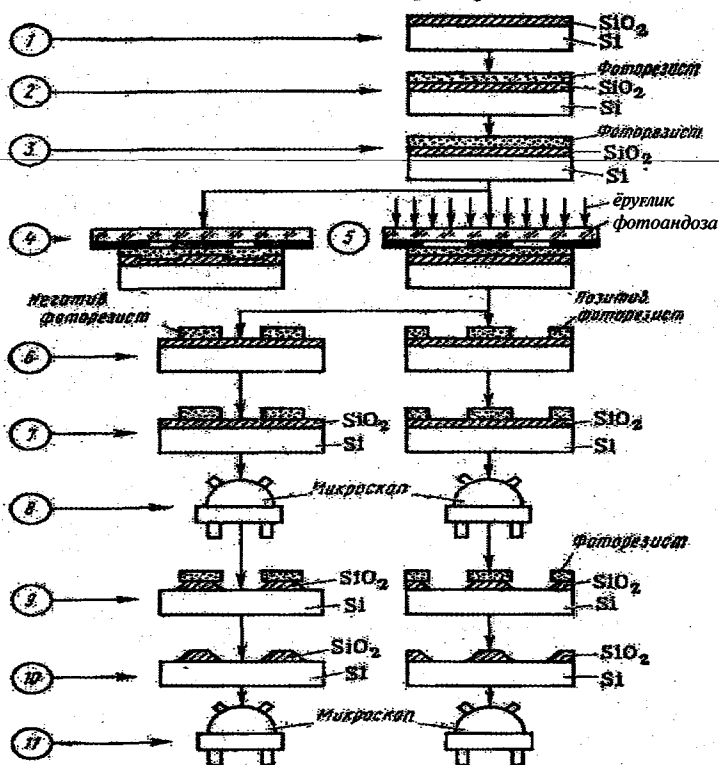
1. Фоторезист қатламини шакллантириш; таглик сиртини қайта ишлаш; фоторезист қатламини ўтқазиш ва биринчи қуригиш.

2. Ҳимоя шаклини вужудга келтириш; қисқа вақт ёритиш ва бирга қўшиш; шаклни очилтириш ҳамда сувда ювиш, қуригиш.

3. Тагликка тасвирни узатиш; шаклни едириш; фоторезистни кетказиш.

Энди ҳар бир босқичнинг технологик хусусиятларини кўриб чиқамиз.

Таглик сиртига ишлов бериш фоторезист қатламини тагликка яхши ёпишқоқлигини таъминлаш мақсадида амалга оширилади. Фоторезистлар кремний, поликристалл кремний, кремний икки оксид, киришма-силикатли шиша, кремний нитриди, турли металл қатламлар сиртига ўтқазилади. Сиртга ишлов беришнинг характери ҳар бир берилган ҳол учун ҳар хил.



III.46-расм. Контактли фотолитография жараёни схема-

Кремний сиртини тайёрлаш куйидаги кўриниш бўйича олиб борилади:

1. Набатма-навбат 5 дақиқадан толуолда, ацетонда ва этил спиртда юиб тозалаш, ультратовуш билан тозалаш ва ниҳоят қайноқ азот кислотада ювиш.

2. Ионсизлантирилган сувда 5 дақиқа қайнатиш.

3. Водород фторидида 5 дақиқа ювиш.

4. Ионсизлантирилган сувда 5 дақиқа қайнатиш.

Оксид пардани тайёрлаш бошқача боради. Оксид парда ўстирилгандан сўнг гидроксидлар бўлмайди ва оксид сирти сув юқтирмайдиган (гидрофоб) бўлади. Бунда ўтказилган фотолитография жараёнида олинган парда юқори си-

фатга эга бўлади. Реактордан чиқариб олинган пластинкаларнинг оксид сиртига 1 соат ичида фоторезистни суркаш мақсадга мувофиқдир. Агарда, таглик кўпроқ сақланган бўлса, уни оксид сиртини сув юқмас ҳолга келтириш мақсадида фоторезист суркашдан олдин термик ишлов бериш керак. Куруқ азотда 1 соат давомида энг кичик температура 700°Сда ишлов берилади. 1000°С ва ундан юқори температурада 5 дақиқа давомида ишлов берилса, яхши натижаларга эришиш мумкин.

Металли қатламларни илк ишлов беришда уларни тозалаш ва кимёвий едиришдан ўтказилади. Тозалаш, кўпинча хлор уч этилен C_2HCl_3 бугларида амалга оширилади. Алюминийни кимёвий едириш- $NaOH$ ёки Na_3PO_4 эритмада, сўнггида HNO_3 ишлов бериш билан, хром-суюлтирилган водород хлорид кислотасида, олтин —аммоний персульфатда едирилади.

Кремний нитрид сиртини дастлабки ишлов бериш қайноқ водород фториди кислотада (HF), сўнг қайноқ ионсизлантирилган сувда ювиш билан ўтказилади.

Фоторезист қоплаш. Фоторезистни тагликка қоплаш центрифугалаш, пуркаш, сепиш, фоторезист эритмага боштириш, думалатиш ва бошқалар билан амалга оширилади.

Саноатда центрифугалаш усули анча кенг тарқалган. Центрифугани улаш билан марказдан қочма кучлар таъсирида томчи резист таглик сирти бўйича ёйилиб кетади. Фоторезист қатлам h қалинлиги, таглик чегарасидаги марказдан қочма куч билан фоторезист молекулаларининг қовушқоқлиги туфайли вужудга келадиган қаршилик кучи тенглашиши ҳисобига вужудга келади:

$$h = \frac{ac^2}{\sqrt{\omega}}, \quad (III.106)$$

бу ерда, a — центрифуга доимийси, $\text{мин}^{1/2} \cdot \text{мкм}$; c — фоторезистда куруқ модда миқдори, оғирлик %; w — центрифуга бурчакий тезлиги, мин^{-1} .

Қатлам қалинлигини ўзгартириш учун фоторезист қовушқоқлиги ўзгартирилади. Қалинликни юпқа бошқариш учун центрифуга айланиш бурчакий тезлиги w ни танлаш билан эришилади, бу одатда 2000-10000 $\frac{\text{айл}}{\text{мин}}$ оралғида бўлади.

Центрифугалаш жараёнида пластинкалар қирғоқларида фоторезист кўтарилишлари ҳосил бўлади ва қалинлик

$$\Delta h = \sqrt{\frac{2\delta}{d\omega^2 R}} \quad (\text{III.107})$$

бўлади. Бунда, δ — фоторезист сирт таранглиги; R — пластинка-таглик радиуси; d — фоторезист зичлиги.

Тайёрланган ҳар бир фоторезист учун центрифуганинг критик айланиш тезлиги мавжуд. Бу тезлик ошгандан сўнг фоторезист қатлам қалинлиги камайиши юз бермайди.

Фоторезист парда қалинлигини танлаш чегараси бир томондан нуқсонсизлиги бўлса, иккинчи томондан юқори ажрата олиш қобилиятидир.

Фоторезист пардасининг қалинлиги 0,2 мкм кам бўлса, ундан амалда фойдаланиб бўлмайди. Парда қалинлиги 1 мкм дан катта бўлса, ажрата олиш қобилияти шундай камаядики, кичик ўлчамдаги шакл элементларни олиб бўлмайди. Шунинг учун фоторезист парда қалинлиги 0,3 дан 0,8 мкм гача танланади.

Фоторезистни қуришти. Биринчи қуриштиш фоторезист қатламни ҳосил қилиш жараёни билан тугайди. Бу операция фоторезист қатламдан эритмани кетказиш ва мустаҳкам, бир жинсли пардани ҳосил қилиш учун ўтказилади.

Полимер пардани қуриштиш энг асосий операциялардан бири бўлиб, пардадаги ёпишқоқлик ва ички механик кучлар унга боғлиқ.

Ёпишқоқлик яхши бўлиши, ички механик кучланишлар пардада кам бўлиши учун қуриштиш икки поғонали температура циклидан фойдаланилади.

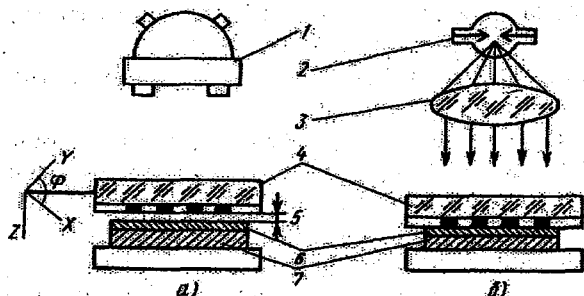
Қуриштиш температурасини танлаш учун чегара фоторезист парда полимерланиши юз берадиган температура ҳисобланади. Турли турдаги фоторезистлар учун полимерланиш температураси 140°C дан 200°C гача мос келади. Шунинг учун биринчи қуриштиш жараёни одатда полимерлаш температурасидан анча кичик температураларда ўтказилади.

Юқори сифатли фоторезист пардаларни олиш учун уларни икки босқичда олдин 18°C-20°C температурада 15-30 дақиқа, кейин 90°C-100°C температурада 30-60 дақиқа қуриштилади.

Қуриштиш жараёнини инерт газ муҳитида ўтказиш мақсадга мувофиқдир. Акс ҳолда, ҳавода фоторезист оксидлани-

ши мумкин. Фоторезистларни қуритишда инфрақизил қиздиришдан ҳам фойдаланилади.

Экспозиция ва бирга қўшиш. Бу амал фотоандозадан тасвирни пластинкага кўчиришни таъминлайди ва улар бир-бири билан боғланган (III.47-расм).



III.47-расм. Контактли фотолитографияда бирга қўшиш (а) ва кўчириш (б) амал схемалари: 1-микроскоп; 2-симобли лампа; 3-конденсор; 4-фотоандоза; 5-андоза билан фоторезист-оралиғи; 6-фоторезист; 7-пластинка.

Фотоандоза тасвир ўлчамларини аниқ узатиш учун шаклни кўчириш вақти ва очилтириш вақтини бир вақтда ва ўзаро боғланган ҳолда ўзгартириш керак. Танланган кўчириш тажрибалар орқали аниқланади. Кўчириш ортиқча ва кам бўлса, фоторезист қатламларида, шакл ўлчамларида ўзгаришлар юз бериши мумкин. Кўчиришда ёруғлик нури сифатида одатда спектри қисқа тўлқинли соҳада жадал нурланувчи қуввати 100–500Вт ли юқори ва ўта юқори босимли симоб лампадан фойдаланилади. Қисқа тўлқинли спектр соҳаси кўпчилик фоторезистлар энг катта сезгирлиги (300–450 нм) га мос келади. Бу нур конденсор 3 орқали фотоандозага тушади. Контактли фотолитографияда ажрата олиш қobiliят кўчирувчи пластинка 7 билан фотоандоза 4 орасидаги контактни мустаҳкамлигига боғлиқ. Андаза 5 билан фоторезист 6 оралиғи ҳисобига френел дифракцияси пайдо бўлиб, тасвир контурини бузади. Оралиқни камайтириш учун вакуум ёки пневматик ушлагич билан андозани пластинкага қисилади.

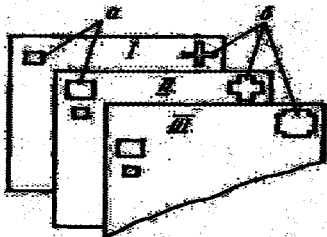
Ҳозирги замон аниқ қурилмалари ёрдамида бирга қўшиш ва кўчириш, иккита бирга қўшиш — визуал ва фотоэлектрик усуллардан фойдаланилади. Аниқлик ажратиби олиш ва жараён унумдорлиги усулни танлаб олинишига боғлиқ. Бирга қўшишнинг қурилма аниқлиги $\pm 0,1$ мкм етказиш мумкин. Бироқ ҳақиқий ҳолда $\pm(0,7 \div 0,8)$ мкм га эришилган.

Автоматик қурилмаларда ишлаганда фотоандозада маҳсус белгилар: шаффофмас штрихлар ва тагликда едирилган ариқчалар қўйилади. Ариқча кенлиги штрих кенлигидан 2-4 марта катта бўлиши керак.

Оператор олдин микроскоп 1 ёрдамида хомаки бирга қўшишни амалга оширади, сўнг аниқ бирга қўшишни амалга оширувчи фотоэлектрик системани улайди.

Бирга қўшиш белгилари жараёни аниқлигини таъминлашда асосий роль ўйнайди.

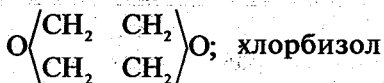
Шуни эсда сақлаш керакки, едиришда бирга қўшиш фигураларининг ўлчами ўзгаради. Контактли фотолитография учун бирга қўшиш фигураларини турлари III.48-расмда кўрсатилган.



III.48-расм. Бирга қўшиш фигураларининг I, II, III турлари:
а) пластинкада; б) фотоандозада.

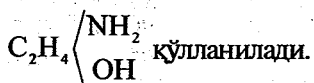
Фоторезистларда яширин тасвирни очилтирганда қатламнинг керакли қисмлари кетказилади, ундан сўнг плас-тинка сиртида ҳимояланган шакл қолиб, у фотоандозадаги расмга мос келади.

Негатив резистларни очилтирувчилар сифатида диоксан



толуол $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ ва бошқалардан фойдаланиш мумкин.

Позитив расмларни очилтириш учун ишқорий эритмалар: 0,3%-0,5% ли КОН эритма; 1%-2% ли тринатрийфосфат Na_3PO_4 эритма; органик ишқорлар — этаноламинлар



Очилтириш жараёнида очилтиргич температураси ва рН қийматини назорат қилиш катта аҳамиятга эга. рН нинг 0,1

га ўзгариши элемент ўлчамларини яхлитлашдан 10% оғишига олиб келади.

Негатив резистлардан кўчириладиган қисмларни кетказиш органик эритмалар ёрдамида олиб борилади. Очилтирилган қатламни қуритиш, очилтиргич қолдиқларини кетказиш ва тагликда шаклни едириш жараёнида унинг химоя хоссасини яхшилаш мақсадида фоторезистни қўшимча термик полимерланиш учун ўтказилади. Қуритиш 120°C - 180°C температурада олиб борилади.

Задублаш. Фоторезистни кислотага чидамлиёлигини задуб қилиш билан амалга оширилади, яъни бунда ниқоб тўла полимерланади. Задублаш жадал ультрабинафша нур билан нурлантириш ёки термик ишлов бериш билан олиб борилади. Кўпинча, иккинчи усул қўлланилади. Олдин 100°C - 120°C қуритиш, кейин 200°C - 220°C температурада 30-40 дақиқа задублаш қилинади.

Едириш. Тагликдаги шаклни ҳар хил таркибдаги едиргичларда турли режимда едирилади. Умумий ҳолда, фоторезистни химоя ниқоби орқали едирганда едиргичлар маҳаллий таъсир қилиши, газ ажралиб чиқмаслиги, фоторезист ниқоб ва таглик яхши ҳўлланилиши керак. Энди анча кенг тарқалган таглик материаллар Si, SiO_2 , кйришмасиликатли шишалар Si_3N_4 , Al, Au, Mo ларни едириш хусусиятларини кўрамыз.

Монокристалл кремнийни едириш сув қўшилган системали HNO_3 -HF кўп қўлланиладиган едиргичда олиб борилади. Фоторезистни кучли бузувчи HF оз бўлган едиргичдан фойдаланиш мақсадга мувофиқ. Поликристалл кремнийни едириш учун секин едиргичлардан фойдаланган маъқул, чунки у тез едирилади. МОЯ-тузилишли затворлар сифатида қўлланиладиган юпқа поликристалл-кремний қатламини едириш учун эритма таркиби: эритма А-40 қисмли HNO_3 , 1 қисмли HF, 1 қисм 1%ли эритма AgNO_3 ; эритма Б-2 қисм пропиленгликол, 2 қисм — ионсизлантирилган сувни қўллаш яхши натижалар беради.

Едиришдан олдин иккала эритма 1:1 нисбатда аралаштирилади ва 5 дақиқа уй температурасида ушлаб турилади.

Кремний тўрт оксиди SiO_2 HF- NH_4F тизимли едиргичларда едирилади. Анча кенг тарқалган едиргич таркиби: 7 қисм 40% сувли NH_4F эритмаси ва 1 қисм HF дан иборат.

Аралашмасиликатли шишаларни едириш юқоридаги едир-гичларда амалга оширилади. Кремний тўрт оксидга нисбатан шиша тезроқ едирилади. Шунинг учун водород фторидли кислота (HF) кичик таркибда қўлланилади.

Нитрид кремнийни водород фторид ёки ортофосфорид кислотада қиздириш билан едирилади.

Алюминийга ортофосфорид кислота H_3PO_4 асосидаги едир-гичларда 60°C-70°C гача қиздириш билан ишлов берилади. H_3PO_4 кислотанинг қовушқоқлиги юқори бўлганлиги учун тагликдан газ ажралиши қийинлашади. Шунинг учун едирилмаган қисмлар ҳам бўлиши мумкин. Шу сабабли эритма 30-50Гц частотада силкиниб туриши тавсия қилинади. Олтинга ишлов бериш учун зар сувидан фойдаланилади. Таркиби $KI:I_2:H_2O$ бўлган едиргич яхши натижалар беради.

Фоторезистни кетказиш. Фотолитография технологик жараёни охириги амали фоторезистни кетказиш кейинги босқичларни сифатли бажарилишига олиб келади. Бу босқичларга диффузия, оксидлаш, металлалаш қиради. Фоторезистни олтингугурт кислотали қайнаган тузилиши бузилган полимерда; органик эритмаларда ишлов бериш йўли билан; плазма-кимёвий, термик ёки фототермик усулларда кетказилади. Олтингугурт кислотада фоторезист эриши анча юқори, лекин металлалашган тагликларда фоторезистларни кетказиш учун органик эритмалар: ацетон, метил-этилэтон, целлюлоза ишлатилади.

Пластинкалар эритмада 20-24 соат ушлаб турилади, кейин шишган фоторезист дока билан олиб ташланади.

Хулоса қилиб айтганда, контакт фотолитографияда технологик жараён боришини III.47-расмдаги амаллар орқали бажарилади.

Оптик фотолитографияда ажрата олиш қобилиятини кучайтириш — ишчи майдон диаметрини бирданига ошириш ҳозирги замон технологияси асосий масалаларидан биридир. Турли материалларда тасвирни барпо қилиш усуллари уч йўналишда: проекцион фотолитография, рентгенолитография, электронолитография ривожланиб бормоқда.

Бу усулларнинг контактли фотолитографиядан фарқи, биринчидан фотоандозани тагликка суртилган фоторезист билан механик контакт йўқлиги, иккинчидан, ифлосликларга сезгир эмаслиги, резист турига боғлиқ эмаслиги

юқоридаги икки тур фотолитографияда мавжуд бўлса, рентген фотолитографияда юқоридаги афзалликдан ташқари ажрата олиш қобилияти 1,5-2 баробар каттадир. Албатта, бу усулларни ўзига яраша камчиликлари мавжуд. Булардан бирига қўшиш операциясини бажариш ва мураккаб фотока-тодлар яратиш зарурлигидир.

Назорат саволлари

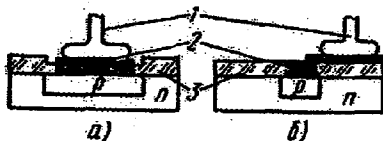
1. Фотолитография жараёни нима учун зарур?
2. Фотолитография жараёнида амаллар кетма-кетлигини айтинг.
3. Фоторезистлар хоссалари қанақа ва унга қандай талаблар қўйилади?
4. Фоторезистни тагликка ўтқазиш усулларини айтинг.
5. Фотоандоза нима ва қандай вазифани бажаради?
6. Фотоандозаларга қандай талаблар қўйилади?
7. Фоторезист қандай усулларда кетказилади?
8. Фотолитографиянинг асбоблар технологиясидаги роли-ни айтинг.

19-БОБ. ОМИК КОНТАКТЛАР ВА КОНТАКТ ТИЗИМЛАР

19.1. УМУМИЙ МАЪЛУМОТЛАР

Омик контакт деганда, унда асосий бўлмаган ток ташувчиларнинг пуркаши бўлмай, вольт-ампер тавсифи чизигий бўлган металл — яримўтказгич контакти тушунилади. Омик контакт ҳар бир яримўтказгичли асбоб ва ИМС да элементлар ва ташқи занжирлар орасидаги электр алоқани амалга оширишни таъминлайди.

Планар асбобларда оддий контактлар (III.49, а-расм), ди-электрик қатлам сиртида вужудга келтирилган контактлар (III.49, б-расм), тайёрланади. Кенг тарқалган контактлар қўлланилиши фаол соҳа ўлчами анча камайишига ҳамда ташқи муҳитнинг яқин бўлмаган таъсирлардан сақлайди.



III.49-расм. Планар асбобларнинг контактлар схемалари: 1-чиққич; 2-контакт; 3-диэлектрик қатлам.

Контактга бир қанча талаблар қўйилиб, унинг бажарилиши асбобни электрик ва механик хоссалари ҳамда қайси шаклда тайёрлангани турғунлигини тақозо қилади.

Контакт тўғриламайдиган (унинг қаршилиги электрик ток йўналиши ўзгариши билан ўзгармаслиги), яъни вольт-ампер тавсифи чизигий (яъни унинг қаршилиги токка боғлиқ бўлмаслиги керак); p - n -ўтишнинг тик ҳам параллел йўналишларида жуда кичик қаршиликка эга бўлиши, юқори иссиқлик ўтказувчанликка ва яримўтказгичга яхши ёпишқоқликка (оксидга ҳам) эга бўлиши, асосий бўлмаган заряд ташувчиларнинг пуркалмаслиги; яримўтказгич ва чиққич материалларнинг температуравий кенгайиш коэффициенти бирига яқин бўлиши талаб қилинади.

Бу талаблардан бирортасининг бажарилмаслиги асбоб тавсифини ёмонлаштиради. Агар омик контакт ночизигий вольт-

ампер тавсифига эга бўлса, унда асбобнинг вольт-ампер тавсифи бузилади. Контакт қаршилигининг ошиши асбобни тўғрилаш ва кучайтириш хоссаларини ёмонлаштиради. Агар контакт пуркаловчи бўлса, у асбобнинг тескари токи ошишига олиб келади.

Албатта, контактнинг барча талабларга жавоб берадиганларини топиш қийин.

19.2. КОНТАКТ МАТЕРИАЛЛАР ВА КОНТАКТ ТИЗИМЛАРНИНГ КЎРИНИШЛАРИ

Металл — яримўтказгичнинг контакти ўрнашганда ҳосил бўлган электрик тўсиқ электронларнинг металл ϕ_m ва яримўтказгич ϕ_s чиқиш ишларининг фарқи билан аниқланади. Шоттки моделига асосан, металл — яримўтказгич контакт, агарда $\phi_m < \phi_s$ (n -тур яримўтказгич учун) ва (p -тур яримўтказгич учун) бўлса омик бўлади. Бироқ реал шароитларда металл-яримўтказгич $\phi_m < \phi_s$ қисмидаги энергетик ҳолатларнинг таъсири натижасида кўп ҳолларда омик контактни олиш қийин бўлади. Яримўтказгичда контакт соҳаси яқинида юқори легирлашни яратиш контакт сифатини яхшилайди. Бундай соҳа яримўтказгич қандай электр ўтказувчанликка эга бўлган бўлса, у ҳам шундай электр ўтказувчанликка эга бўлиб, натижада n^+-n -ёки p^+-p -турдаги тузилмалар ҳосил бўлади.

Юқори легирланган соҳани эритиш, диффузия ёки ион киритиш усулида мос киришмалар киритиш билан ҳосил қилади. Бундай соҳаларни Ge, Si, GaAs ва бошқа яримўтказгичларда омик контактлар яратиши билан ҳосил қилинади. Бироқ баъзи бир кенг зонали яримўтказгичларда хусусий қарама-қарши белгили нуқсонлар билан киришмаларнинг компенсация эффекти туфайли улар асосида контактлар олиш қийин. Контактнинг инжекцион хоссасини камайитириш учун рекомбинацияни эффектив марказлари бўладиган чегарага киришмалар киритиш керак. Иккинчи усули яримўтказгич сиртини қайта ишлаш натижасида бузилган қатламни ҳосил қилиш билан камайитириш мумкин.

Контакт материал талабларига кўпроқ яхши жавоб берадиган алюминийдир. Алюминий юқори ўтказувчанликка эга, у пластик, кремнийга яхши ёпишади, кремний SiO_2 билан

ўзаро таъсирлашмайдиган едиргичларни қўллаш билан SiO_2 ва Si_3N_4 да осон фотолитографик ишлови берилади. Алюминий кремний билан турғун металлургик тизимни ҳосил қилади. Алюминий пардага термобосим усулида чиққичларни осон кавшарлаш мумкин.

Алюминийнинг контакт материал сифатида қуйидаги камчиликлари бор: 700°C га ва ундан юқори температурада кремний икки оксидини ҳимоя пардаси билан фаол тикланиш реакцияси натижасида *p-n*-ўтиш қисқа туташиб қолиши мумкин; кавшарлаш мураккаблиги ва электролитик ўтиришни амалга ошириб бўлмаслиги; икки қатламли тузилма олтин-алюминий турғун интерметалл бирикма ҳосил қилади, у кейинчалик контактни издан чиқарди ва асбоб умуман ишдан чиқади (бу ҳодиса адабиётларда маълум «тўқ қизил чума» деб аталади); занглаш ва чекли механик мустаҳкамлиги ва бошқалар.

Алюминийдан контакт материал сифатида частотаси 1 ГГц гача бўлган кам қувватли кремний асбобларини тайёрлашда фойдаланиш мумкин.

Юқори сифатли контактларни кўп қатламли тизимлар асосида олиш мумкин. Унда ўтиш қаршилиги кичик, оксид қатламлар тикланиш имкониятига эга, яримўтказгичга кирган контакт саёз чуқурликни таъминлайди. Ундан ташқари, металл контакт қатлам ва чиққич металл билан бирига мос келган юқори ўтказувчанликка эга қатлам ҳосил қилиш учун фойдаланилади.

Контакт қатламлар олишда титан, хром, ванадий, молибден, вольфрамдан фойдаланилади.

Титан юқори занглашишга чидамлилиги ва механик мустаҳкамлиги ҳамда турғун металлургик тизимни ҳосил қилиш қобилияти сабабли кремний қатлами билан пастки контактлашувчи сифатида кремнийда контакт тизимларини яратишда қўлланилади.

Бир қатламли титан контактидан фойдаланиш мумкин эмас, чунки титан солиштирма қаршилиги ($5,8 \cdot 10^{-7}$ Ом·м) ва тез оксидланади. Кремний сиртига ўтказилган титан қатлами тўғриламайдиган контактни вужудга келтиради ва кейинги металл қатлам учун у ёпишқоқдир.

Титан пардалар кремнийда кўп қатламли омик контактларни вужудга келтиришда қўлланилади. Буларга Si-Ti-Au, Si-Ti-Mo-Au, Si-Ti-Mo-Cr-Au ва бошқаларни кўрсатиш мумкин.

Контакт қатлам сифатида фойдаланадиган хром пардалар кремний билан тўғриламайдиган контакт ҳосил қилади ва ундан кейин суркаладиган металлга яхши ёпишқоқликни таъминлайди. Хром камчилиги алюминийга ўхшаб SiO_2 билан 470 К температурада фаол ўзаро таъсирлашмайди. Ундан ташқари, хром одатда механик кучланиш ҳолатда туради ва етарли даражада говак.

Ўтказгич қатлам материал сифатида алюминий ва олтиндан кўп фойдаланилади. Кумуш ва мис осонгина оксидланиши сабабли бу мақсадлар учун анча кам қўлланилади.

Контакт тизимларда ўтказувчи қатлам вужудга келтириш учун юқори ўтказувчанликка эга бўлган кимёвий инерт олтиндан фойдаланиш мумкин. Бироқ бундай пардаларнинг кремний ва SiO_2 га ёпишқоқлиги ёмон. Шунинг учун оралик қатламларни Al, Ti, Cr, Mo, Ta лардан яратиш зарурлиги аён бўлади. Si-Ti-Au, Si-Cr-Au, Si-W-Au, Si-Mo-Au ва бошқалар омик контакт тузилмаларда олтин ташқи ўтказувчи қатламни вужудга келтириш учун фойдаланилади.

Ажратувчи, тўсиқ қатламларни яратиш учун одатда платина, титан, молибден пардалар қўлланилади. Платина анча яхши ажратувчи хоссага эга, чунки қалинлиги 0,05 мкм бўлган платина парда контакт ва ўтказувчи қатламларни вужудга келтириш учун фойдаланадиган кўпгина металллар орасидаги ўзаро таъсирни йўқотади.

Ажратувчи қатламсиз контакт тизим турғун бўлмайди. Чунки, икки қатламли Cr-Au тизимда, металллар ўзаро диффузияси туфайли, контакт қаршилиги ошишига олиб келувчи қаттиқ эритмаларни ҳосил бўлишига олиб келади.

19.3. ОМИК КОНТАКТЛАР ВА КОНТАКТ ТИЗИМЛАРИНИ ВУЖУДГА КЕЛТИРИШ УСУЛЛАРИ

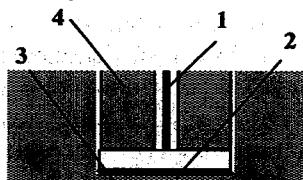
Омик контактлар одатда қотиштириш, электрокимёвий ёки кимёвий ўтказиш, бўшлиқда (вакуумда) буғлантириш, термобосим ёки ультратовуш усулида тайёрланади.

Қотишмали усул билан омик контактларни олиш жараёни куйидагича олиб борилади. Кристалл пластинка сиртига юпқа металл қатлам, металл сим ёки шарча ўрнатилиб, уларни суюлиш температурасигача қиздирилади. Бунда яримўтказгичда озгина миқдорда суюлиш бўлади. Сояиши натижасида

эритма билан яримўтказгич тизимида легирланувчи кириш-
ма металл билан кристалланади. Натижада, яримўтказгич ўтка-
зувчанлигига мос келган юқори легирланган қатлам вужудга
келади ва $Me-n+-n$ - ёки $Me-p+-p$ -турдаги тузилма пайдо бўла-
ди. Қотиштириш жараёнида яримўтказгичнинг металл билан
ҳўлланувчанлиги катта аҳамиятга эга. Ҳўлланувчанликни ях-
шилаш учун яримўт-казгич сирти киришмалардан ва оксид
қатламлардан тозаланади. Қолдиқ сирт пардаларини кетка-
зиш учун флюслар қўлланилади. Қотиштириш билан олин-
ган яримўтказгич-металл контакт уй температурасида катта
қолдиқ кучланиш пайдо бўлмаслиги учун яримўтказгич ва
металллар иссиқликдан кенгайиш коэффициентлари қиймат-
лари бўйича бир-бирига яқин бўлиши керак. Металл етарли
даражада пластик бўлиши мақсадга мувофиқ бўлади.

Саноатда махсус мослама ёрдамида омик контакт билан
бирликда $p-n$ -ўтиш ҳосил қилинади (III.50-расм).

Омик контактларни электрокимёвий усулда олиш жара-
ёни электролитик ваннада
тузларни ҳосил қилувчи
электродлар орасидан оқаёт-
ган ток ўтиши катодда ме-
таллни ўтказиш ҳисобига
рўй беради.



III.50-расм. Қотиштириш усулида

омик контакт ва $p-n$ -ўтишни
олиш схемаси: 1-алюминий сим;
2-кристалл; 3-омик контакт;
4-мослама (графитдан тайёрланган).

Кимёвий ва электрокимё-
вий ўтказиш асосан никель
ва олтин контактлар олиш
учун қўлланилади.

Контактни олишда ки-
мёвий ўтказиш жараёни
эритмада тикланувчи реа-
гент ёрдамида туздан металлни тиклаб, яримўтказгич сир-
тига ўтказиш амалга оширилади.

Никелни кимёвий ўтказиш n -турдаги кремний қар-
шилигини анча камайтириш имконини берувчи фосфат
электролитларида юз беради. Кремнийни никеллашда анча
кенг тарқалган эритмалардан бири таркибига қуйидаги-
лар киради: 30 г/л никель хлориди, 12 г/л натрий ги-
пофосфит; 60 г/л лимонно-кислий натрий; 50 г/л алю-
миний хлорист.

Ҳар бир квадрат сантиметрга 2 см^3 эритма олинади ва никеллаш 92°C – 96°C да 10–12 мин давом этади. Никелни ўтказиш ишқорий эритмаларда pH – $3 \div 10$ да юз беради. Никель барқарор бўлиши учун жараён бошида эритмага

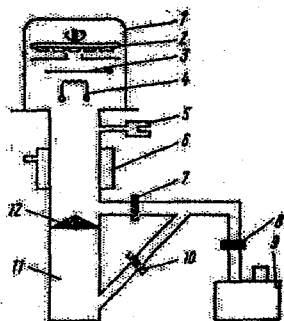
2–4 см^3 аммиак эритмаси қўшилади. Бунда электролит яшил рангдан қўк рангга айланади. Никеллаш температура-сида аммиак тезда учиб кетади. Шунинг учун эритмага дав-рий равишда аммиак қўшилиб турилади, бунда ранг доимо қўк бўлиши керак.

Олтинни ўтказиш асосан электрохимёвий усулларда, яъни олтин хлор ёки калий дицианоаурат $\text{KAu}(\text{CN})_2$ асосидаги иш-қорий электролитларда ўтказилади. Ишқорий электролитларда ток зичлиги $20\text{--}40 \text{ А/м}^2$ ва температураси $300\text{--}340\text{ К}$ бўлганда олтинни ўтказиш тезлиги $0,025\text{--}0,05 \text{ мкм/мин}$ дан ошмайди.

Планар технология ривожланиши билан омик контакт-ларни тайёрлаш учун вакуумда пуркаш усули қўлланила бошланди. Бу усул ҳозирги пайтда микросхемалар тайёрлаш учун кенг қўлланилмоқда. Вакуумда пуркаш металлни қиздирилган чул-гам ёрдамида буғлантириш билан амалга оширилади. Чулғамлар ёки кичик қайиқчалар ёрдамида қиздиришда яримўтказгич сир-ти турли киришмалар билан ифлосланиши мумкин. Ундан сақ-

ланиш учун жараён бошида тўсиқлардан фойдаланиш мумкин. Икки ёки ундан ортиқ металл қатламларни олишда, одатда, бир-бири билан боғлиқ бўлмаган қиз-диргич тизимлари билан таъ-минланган қурилмалар қўлланилади.

Термик буғлантириш чуқур вакуумда ўтказила-ди. Металл контактларни олишда вакуумда пуркаш-нинг турли қурилмалари мавжуд. Биз бу ерда сано-атда кенг қўлланиладиган вакуумда пуркаш қурил-масини III.51-расмда кўрсатамиз.



III.51-расм Вакуумда пуркаш қурил-маси: 1-ишчи камера (қолпоқ); 2-яримўтказгич пластинка; 3-тўсиқ; 4-буғлантиргич; 5-манометр; 6-ушла-гич; 7-кран; 8-кран; 9-форвакуум насос; 10-кран; 11-диффузион на-сос; 12-очувчи-ёпувчи мослама.

Курилманинг ишчи 1 камерасига яримўтказгич 2 пластинкалар, 4 буғлантиргич ва 3 тўсиқ жойлаштирилган. Ишчи ҳажмдаги босим 5 асбоб ёрдамида ўлчанади.

Бошлангич вакуумни ҳосил қилиш учун 9 форвакуум насос ёрдамида 11 диффузион насос 12 клапани ва 10 кран ёпиқ ҳолга ўтказилади. 7 ва 8 кранлар очиқ. Ишчи ҳажмда босим 10 Па бўлганда 7 кран ёпилиб, 10 кран ва 12 клапан очилади. Натижада, диффузион насос орқали вакуум олинади. Қолдиқ газлар ва ёғ буғларини конденсирлаш учун суяқ азот билан тўлдирилган 6 тузоқ хизмат қилади.

Термик буғлантиришда материалларни буғлантириш учун W, Ta симли, Mo, Ta тасмали ёки кварц, графит, керамика қиздиргичлардан фойдаланилади. Бу материаллар буғлантирилувчи жуда кўп материаллар билан ўзаро таъсирлашмайди.

Металл пардаларни қоплашда катод чангланиш усули буғлантирилувчи металлни қиздириш ўрнига уни инерт газ ионлари билан, кўпинча аргон ионлари билан бомбардимон қилинади. Катод чангланиш усули олдин биз кўрган едириш усулига ўхшайди ва бунда катод-нишон металлдан тайёрланиб, унинг асосида парда ҳосил бўлади. Катод чангланиш усули билан ҳар қандай металлдан пардалар олиш мумкин. Парда қалинлиги ва сифати катод токининг қиймати ва инерт газ босими билан аниқланади. Катод чангланиш тезлиги чангланиш коэффиценти — катодни ташлаб чиқувчи металллар атомлари миқдори унинг бомбардимонлари ионлар сонига нисбати билан аниқланади. Чангланиш коэффиценти чангланувчи металл ионининг энергиясига ва тушиш бурчагига боғлиқ. Катод чангланиш курилмаларида яримўтказгич сиртини бошлангич тозалаш имконияти ҳам мавжуд.

Бу катод чангланиш усулининг камчилиги шуки, унинг аппаратураси мураккаб ва металл пардаларда газ молекуларидаги киришмаларнинг бўлиб қолишидир.

Алюминий асосида омик контактлар тизимини яратиш
Алюминий пардаларни қоплаш учун вакуумда ($5 \cdot 10^{-3}$ Па) термик буғлантириш усули кенг қўлланилади.

Сифатли пардани электрон нур қиздиргичда алюминий симларини қиздириш билан олиш мумкин. Бунда алюминийда буғланиш тезлигини электрон оқим қувватини ўзгартириш билан кенг оралиқда ўзгартириш мумкин.

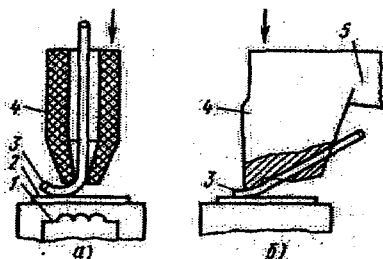
Қувват ошиши билан металл конденсирлаш тезлиги чизикли ўсади. Электрон нур қуввати 6 кВт ва таглик билан осилган сим орасидаги масофа 0,25 м бўлганда конденсация тезлиги тахминан 0,15 мкм/с ни ташкил қилади.

Маълумки, ҳосил бўлган парда тузилмаси ва контакт сифати таглик сирти сифатига ва температурага боғлиқ. Шунинг учун алюминий пардани кремний тагликка ўтказишда температура 600К дан 820К гача бўлган оралиқ танланади. Бу температуралар ошиши алюминий пардани анча катта донадорликка олиб келади. Ундан ташқари, 770К-820К оралиқ температурада алюминийнинг кремнийга ёпишқоқлиги анча ошиб кетади. Кристалл билан парда ўртасида суялма бўлишидан сақланиш учун таглик температураси 950К дан ошмаслиги керак.

Пардани қоплаш учун таглик юқори даражада тозаланган бўлиши керак. Бунинг учун улар фторид кислота (HF), ацетон билан (1:10) аралашмада ва тоза ацетонда уч мартаба ювиб ўтказилади.

Электрик ўтказувчанлиги *n*-тур бўлган кремнийда омик контакт қаршилигини камайтириш учун олтиндан парда қопланади. Бунинг учун вакуумда молибденли тигелдан термик буғлантириш усулидан фойдаланилади. Сўнг, 640К-670К температурада термик ишлов берилади.

Бошқа материаллар асосида контакт тизимларини яратиш
Кремнийга Ti-Au тизимли икки қатламли омик контакт-



III.52-расм. Термобосим (а) ва ультратовуш пайвандлаш (б) усулларида

контактни ҳосил қилиш: 1-қиздиргич; 2 – кристалл, 3- чикқич; 4- сим дозатори; 5-ультратовуш тебранишлар концентратори.

ни яратиш учун иссиқликдан буғлантириш ёки катод ўтказиш усулидан фойдаланилади. Олдин вольфрам спиралда титан термик буғлантириб, титан парда қопланади. Титанни оксидланишдан сақлаш учун ишчи камерада босим 10^{-9} Па сатҳида ушлаб турилади. Титан қатлам қопланганидан сўнг молибденли ёки тантал

қайиқчалардан термик буғлантириш усули билан унга олтин парда қопланади. Кремний тўрт оксиди (SiO_2)га титанни яхши ёпишқоқлиги туфайли, кенг тарқалган SiO_2 пардага контакт тизимларни яратиш мумкин. Олтин ўрнига ўтказгич қатлам сифатида никель ёки қумуш қопламалардан ҳам фойдаланиш мумкин.

Молибден ёки тантал қозончаларда ингичка симларни кетма-кет иссиқлик буғлантириш усули билан хром ва олтин қопламалар ўтказиш билан Cr-Au контакт тизими яратилади. Хром парда қоплангандан сўнг, хром ва олтин таркибли қатлам қопланади, кейин тоза олтин парда қопланади. Хром парда қалинлиги ~ 100 нм, олтин парда эса ~ 300 нм ни ташкил қилади. $T=1170\text{K}$ да бериладиган термик ишлов Cr-Au омик контакт тизим хоссаларини яхшилайди.

Контакт қатлам сифатида молибдендан ҳам фойдаланиш мумкин. Молибден пардани одатда электрон нур ёрдамида ўтказилади.

Металл пардага ингичка металл симлар контакти

Яримўтказгич сиртига қопланган металл пардага ингичка металл симлар контактини термобосим ёки ультратовуш пайванд усулларида олиш мумкин (III.52-расм). Ингичка металл симларни (кўпинча олтин ёки алюминий) термобосим усулида ҳам қиздириш, ҳам босим остида олинади.

Термобосим усулидан фарқли равишда, босим остида, ультратовуш пайвандлашда ва тебранишларда ишқаланишлар ҳисобиға юпқа сирт пардалар бузилади ва у материалларнинг ўзаро зич контактини таъминлайди. Механик босим ва ишқаланиш контакт ҳосил қилувчи материаллар аралашishiға ва симларнинг сирт билан мустаҳкам бўлишға олиб келади. Шу усулда яримўтказгични пластинка ёки кристаллида, талаб даражада қалинликдаги n^+ - ёки p^+ - турли юқори легирланган кичик қаршиликли омик контактларни осонгина олиш мумкин.

Назорат саволлари

1. Омик контакт қандай контакт?
2. Омик контактга қўйиладиган талабларни айтинг.

3. Электрод материаллар қандай танланади?
4. Омик контактлар қандай усулларда олинади?
5. Омик контактни электролитик ўтқазуш усулини айтинг.
6. Контакт тизими нима?
7. Пуркаб қоплаш учун вакуум қурилмасини тушунтиринг.
8. Металл пардага ингичка симлар қандай уланади?

20- БОБ. ЯРИМЎТКАЗГИЧЛИ АСБОБЛАР СИРТНИИ МУСТАҲКАМЛАШ ВА ҲИМОЯ ҚИЛИШ

20.1. УМУМИЙ МАЪЛУМОТЛАР

Ҳозирги замон радиоэлектроникасида асосий бош талабларидан бири бутун аппаратлар ва блоклар, алоҳида элементлар ишининг мустаҳкамлиги ва чидамлилигидир. Аниқланганки, яримўтказгичли асбоблар ва ИМС турғун ва мустаҳкам ишлаши яримўтказгич сирт ҳолати ва унинг ташқи муҳит билан ўзаро таъсири хусусиятлари билан боғланган. Асбобнинг берилган ишлатиш шароитлари натижасида сирт ҳолатлари турғун бўлиши, айниқса *p-n*-ўтиш чиққан жойларини ташқи муҳит таъсиридан мустаҳкам ҳимоялаш керак.

Кейинги йилларда ҳимоя қатламлари сифатида кремний тўрт оксиди SiO_2 , кремний нитриди Si_3N_4 , алюминий оксиди Al_2O_3 ёки шу материалларнинг комбинацияси асосидаги қатлам материалларни қўллаш кенгаймоқда. Баъзи бир ҳолларда тез эрийдиган силикатли ёки халькогенидли ҳимоя пардалардан муваффақиятли фойдаланилмоқда.

Ҳимоя қопламалари бошқа вазифаларни ҳам бажаришини 17-бобда изоҳлаб берган эдик. Бироқ ҳозирги замон конструкцияларида ҳимоя пардалар сифатида кремний органиклар: лак, компаунд ва бошқалар кенг қўлланилмоқда.

20.2. АСБОБНИНГ ЭЛЕКТРИК ПАРАМЕТРЛАРИГА *p-n*- ЎТИШ СИРТ ҲОЛАТИ ТАЪСИРИ

Электрон-ковак ўтиш сирти деганда, яримўтказгич кристалл ёки яримўтказгич пластинка сиртига чиққан қисм тушунилади. *p-n*-ўтиши чиққан яримўтказгич материал сирт ҳолати, *p-n*-ўтишдан ташқари қолган яримўтказгич ҳажмининг физик хоссасига нисбатан асбобнинг электрик параметрларига анча кучли таъсир қилади. Агар яримўтказгич кристалл ичидаги *p-n*-ўтиш ташқи таъсирлардан мустаҳ-

кам ҳимояланган бўлса, кристалл сиртига чиққан p - n -ўтиш эса қўшимча ҳимояланиши керак.

Ундан ташқари, яримўтказгич материал сиртининг тузилиши чексиз узун кристаллнинг энергетик зонасидан бошқача бўлади. Сирт тузилиши қисман узилган атомлардан ташкил топади. Чунки, ҳар бир атомга ковалент боғланиш учун жуфтликлар етишмайди, унда бу боғланишлар тўйинмаган бўлиб қолади ва у энергетик ҳолатга эквивалент бўлиб, сатҳлар ман қилинган зона ичида ётади.

Шундай қилиб, электронларни эгаллаб олиш йўли билан атомлар ўз алоқаларини тўлдиришга интилади. Натижада яримўтказгич материал турига қарамай акцептор сатҳлар ҳосил бўлади.

Шу билан бирга яримўтказгич материалда газ ва суюқлик кўринишдаги ўзга модда атомларнинг адсорбцияси натижасида юқоридаги сатҳлардан ташқари қўшимча сирт ҳолатлари ҳосил бўлиши мумкин. Адсорбциялашган атомларнинг хоссаларига боғлиқ равишда яна ҳосил бўлган сатҳлар акцептор ёки донор бўлиши мумкин.

Агар яримўтказгич материал сиртига электронларни эгаллаб оладиган атом ёки молекула адсорблалса, унда акцептор сатҳлар ҳосил бўлади. Агар бу ҳолда яримўтказгич материал электрон ўтказувчанликка эга бўлса, унда электронлар ўтказувчанлик зонасидан ёки донор сатҳдан Ферми сатҳида, пастда ётувчи акцептор сатҳни тўлдиршига интилади. Бу эса кристалл сиртига тўғридан-тўғри жойлашган электронлар билан тўла бўлмаган юпқа яримўтказгич қатлам ҳосил бўлишига олиб келади. Бу ерда мусбат зарядланган донор марказлар ҳосил бўлади. Ҳосил бўлган электр майдон шундай йўналганки, яримўтказгич материал ҳажмидан келаётган электронларни итаради ва энергетик тўсиқни вужудга келтиради.

Бунда яримўтказгич — муҳит чегарасида энергетик зона ва яримўтказгич материал сиртида инверсион қатлам вужудга келиши мумкин.

Газ молекулалари ёки буғлари адсорбцияси физик ёки кимёвий бўлиши мумкин. Физик адсорбция ҳолида буғлар ва газлар қаттиқ жисм ионлари таъсирида яримўтказгич сиртида ушланиб қолади.

Кимёвий адсорбцияда молекулалар атомларга диссоцияланади, яримўтказгич материалнинг сирт атомлари билан улар орасида турғун кимёвий алоқалар ҳосил бўлиши билан валент электронлар қайта тақсимланиши юз беради. Шундай, сув буғлари иккала механизмлар ёрдамида яримўтказгич материал сиртига адсорбцияланади, бунда дастлабки икки-уч қатлам яримўтказгич панжара атомлари билан кучли боғланган бўлиб, қўзғалмас бўлиб қолади, қолган қатламларда (физик) сув молекулари яримўтказгич материал сирти бўйлаб кўчиши мумкин.

Шундай қилиб, турли газлар ва буғлар адсорбцияси яримўтказгич сирт яқин соҳасида фазовий зарядларни ҳосил қилишига олиб келади. Анча фаол кимёвий ютилувчи газларга кислород ва сув буғлари киради. Кислород, азон ҳамда хлорнинг ўтириши манфий ишорали сирт зарядларни пайдо бўлишига олиб келади. Сув буғлари, спирт, ацетонларнинг ўтириши мусбат зарядларни ҳосил қилади.

Яримўтказгич материалнинг нам сиртига ўтирган металл ионлари (масалан, натрий миқдори 10^{14}см^{-2} гача) бўлади ва ионли ўтказгич бўлиб қолиши мумкин. Шундай яримўтказгич сиртига чиққан p - n -ўтишга ташқи электрик майдон қўйилиши сиртий ион токини ҳосил қилади ва бу ток p - n -ўтишни ҳажмий токидан бир неча марта юқори бўлади.

Бундан ташқари, асбобларнинг электрик параметрлари ўзгаришида инверсион қатламларнинг ҳосил бўлиши билан боғлиқ бўлган сирқиш токи анча катта рол ўйнайди. Чунки, p - n -ўтишга яқин яримўтказгич соҳасида пайдо бўлган инверсион қатлам яримўтказгич сиртига чиқувчи p - n -ўтишга туташган инверсион канал p - n -ўтиш самаравий майдонини оширади ва асбобнинг тескари токини ошишига олиб келади. Шундай қилиб, ион ёки канал ўтказувчанлик ҳисобига асбоб тескари токи анча ошади.

Тескари токнинг ўзгариш хусусияти бўйича қайси механизм асосий рол ўйнашини билиш мумкин. Ионлар токлари учун кучланишга боғланиш чизигий, канал токи эса кучланишнинг квадрат илдизига пропорционал ўзгаради.

Электрон-ковак ўтишларда тешилиш кучланиши камайиши ҳам каналларнинг мавжудлиги билан боғланган. Тешилиш кучланиши p - n -ўтишнинг канал соҳасида ҳажмга нисбатан кичик, чунки канал ўтказувчанлиги таглик материал-база ўтказувчанлигидан каттадир.

Асосий бўлмаган заряд ташувчилар сиртий рекомбинация тезлиги яримўтказгич материал сирт ҳолатига таъсир қилувчи зарурий параметрлардан биридир.

Сиртий рекомбинация тезлиги юқорида кўрилган яримўтказгич қатлам сиртидаги бузилишлар ва адсорбция механизмлари ҳисобига ҳажмий рекомбинацияга нисбатан анча юқори бўлади. Шунинг учун асосий бўлмаган заряд ташувчиларнинг яшаш вақти фақат ҳажмий нуқсонлар орқали аниқланадиган вақтдан анча кичик.

Транзисторларда сирт рекомбинацияси ошиши заряд ташувчилар кўчиши коэффициенти камайишига ва кучайтириш коэффициенти пасайишига олиб келади. Асбобларнинг узоқ вақт ишлаши давомида уларнинг электрик параметрлари ёмонлашади. Бунга асосий сабаб, биринчи ўринда *p-n*-ўтишли яримўтказгич кристалл сиртий ҳолатининг ўзгаришидир. Яримўтказгич кристалл сирт ҳолати ўзгариши ташқи муҳитни ўзгариши ва уни яримўтказгич материалга таъсири туфайли содир бўлади. Шу сабабли *p-n*-ўтишли яримўтказгич кристалл сиртининг ҳимояси сифатига фақат тайёр асбоб электрик параметрларигина эмас, балки уларнинг мустаҳкамлиги ва хизмат вақти ҳам киради.

Яримўтказгичлар технологиясида *p-n*-ўтишли яримўтказгич кристалл сиртига ташқи агрессив муҳит таъсирини йўқотиш учун турли усуллардан фойдаланилади. Бу эса, асбобнинг электр параметрларини иш давомида турғун ва узоқ вақт сақлаш имконини беради.

20.3. ОРГАНИК ҚОПЛАМАЛАР ЁРДАМИДА СИРТНИ ҲИМОЯЛАШ

Электрон-ковак ўтишлар сиртини ташқи атмосфера таъсиридан ҳимоялаш учун намга чидамли лак ёки компаунд қопламалардан ҳозиргача фойдаланилиб келинмоқда. Бу усул биринчи навбатда планар бўлмаган асбоблар, яъни қотишмали, қотишма-диффузион, меза-қотишмали ва меза-диффузион асбобларни тайёрлашда қўлланилади.

Лаклар ва компаундлар билан ҳимоялаш энг содда технологик усулдир. Уларнинг сиртига оддий шприц билан суркалади, бунда албатта фақат сирт қопланмасдан, унинг атрофи ва кезакнинг маълум қисми ҳам лакланади. Крем-

ний органик компаундлар тиристор тузилмалардаги ёқларни ҳимоялаш учун кенг қўлланилади. Айтиб ўтиш керакки, сиртни лаклаш ёки компаунд билан қоплашдан олдин, қоида бўйича, у оксидланади ёки бошқа анча мустаҳкам воситалар билан ҳимояланади.

Электрон-ковак ўтишларни ҳимоя қилиш учун материаллар сифатида турли кремний органик лаклар ва компаундлардан фойдаланилади. Улар нисбатан намга юқори чидамли ва яхши диэлектрик хоссаларга эга эканлиги билан ажралиб туради (III.8-жадвал).

III.8-жадвал

Тури	Қуритиш режими		Солиштирма қаршилиги ρ , Ом·см	
	вақти, соат	температураси, °С	20°Сда	200°Сда
Лак				
М-49	5	200	10^{14}	10^{12}
К-55	3	150	10^{13}	10^{12}
К-1	4	150	10^{12}	10^{10}
ПЭ-518	3	200	10^{14}	10^{12}
КО-961	1	20	10^{14}	10^{12}
Эмаль РПЭ-401	5	200	10^{14}	10^{12}
Компаунд	12	100	10^{13}	10^{12}
Эмаль ЭС-50	2	180	10^{14}	10^{11}

Электрон-ковак ўтишли яримўтказгич кристалл сиртини ҳимоялаш учун лаклар ва компаундлар билан биргаликда кремний органик вазелинлар қўлланилмоқда. Вазелинлар асосан майда дисперсион тўлдиргич қўшилган кремний органик суюқликлардан олинади. Улар юқори изоляцияон хоссага эга (20°С температурада солиштирма қаршилиги 10^{14} Ом·см, 150°да эса 10^{12} Ом·см, электрик мустаҳкамлиги 15 кВ/м).

Вазелинларнинг лаклар ва компаундлардан афзаллик фарқи шундан иборатки, улар яримўтказгич кристаллга суркалгандан сўнг механик кучланишларни ҳосил қилмайди.

Органик ҳимоя қопламаларининг бошқа бир зътиборли кўринишларидан бири, силанлаш усули бўлиб, унда яримўтказгич сиртидан кремний органик полимер пардалар олинади. Бу ҳолда

парда тўғридан-тўғри яримўтказгич сиртида мономер гидролиз жараёнида ҳосил қилинади. Масалан, органогаалоидосилан $R_{4-i}SiX_i$ ($i = 1, 2, 3$), гидролизи реакцияси ҳисобига парда вужудга келади. Бу ерда R-органик радикал, булар сифатида метил CH_3 , этил C_2H_5 , фенил C_6H_5 ; X-мономерни гидролизловчи қисми, масалан, галоид Cl, Br ишлатилади.

Гидролиз -полимерлаш реакцияси олдиндан суёқ метилхлорсилан ёки силанли эритма ва уларнинг карбон водород аралашмаларида намланган намуналари, силанлар ва уларнинг аралашма буғларида маълум вақт ушлаб турилиб ўтказилади.

Ботириш усули юқори ҳимояли хоссага эга бўлган пардани (айримлари яхши ёпишқоқликни ва сув ўтказмасликни) таъминлайди, бироқ галоидосилан гидролизи пайтида анча миқдорда водород хлорид пайдо бўлади. Бу эса, алюминий контактларни емириши мумкин. Бироқ силанли эритмаларга водород хлоридни нейтралловчи киритиш мумкин. Эритмада галоидосилан концентрациясини бошқариш ҳисобига ботириш жараёни бошқарилувчидир. Парда қалинлиги 0,3 мкм дан ошмайди.

Сиртни силанлаш усулининг полимер лаклар ва компаундларни механик қоплаш усулига нисбатан асосий афзаллиги яримўтказгич сирти билан ҳимоя пардаси орасидаги кимёвий боғланишнинг мавжудлигидир. Бу фақат сиртга юқори ёпишқоқликни таъминламасдан, нуқсонларни камайтириб, ўтишларнинг тескари тавсифномасини яхшилаш имконини беради. Ундан ташқари, эритмаларда силанлаш усули, мураккаб ускуналар талаб қилмаган ҳолда, ҳимоя пардалари гомоген ўсиши учун ҳам шароит яратади.

20.4. КРЕМНИЙ ОКСИД ВА НИТРИДЛАР БИЛАН ҲИМОЯЛАШ

Яримўтказгичли асбоблар ва ИМСлар ишлаб чиқариш технологиясида кремний тўрт оксиди SiO_2 ва кремний нитриди Si_3N_4 кенг қўлланилмоқда. Асбобни планар тайёрлашда ҳимоя пардалар SiO_2 ва Si_3N_4 бошлангич тагликка *p-n*-ўтишларни ҳосил қилишдан олдин қопланади.

Ҳимоя пардалар SiO_2 ва Si_3N_4 орқали маҳаллий диффузия ўтказилиши яримўтказгич кристалл сиртига чиқ-

қан *p-n*-ўтишни ташқи таъсирдан ҳимоялаган ҳолда ажратиш имконини беради.

Диэлектрик SiO_2 ва Si_3N_4 ҳимоя пардаларни олиш усуллари 17-бобда батафсил берилган. Бу ерда биз қотишмали, қотишма-диффузион ва меза- қотишмали усулларда олинган *p-n*-ўтишларни ҳимоялаш усуллари ҳақида тўхталамиз. Бу турдаги асбобларга ҳимоя пардалари SiO_2 ва Si_3N_4 *p-n*-ўтишлар ва омик контактлар олингандан сўнг қопланади.

Электрон-ковак ўтишли кремний кристалл сиртида оксидли ҳимоявий пардаларини кучли кимёвий оксидловчиларда ишлов бериш йўли билан олинади. Кўпинча оксидловчи сифатида азот кислотадан фойдаланилади. Кремний сиртида ҳосил бўлувчи ҳимоя пардасини бир жинслилиги ва қалинлиги кўпинча кимёвий оксидланиш режимига боғлиқ.

Электрон-ковак ўтишли яримўтказгич пластинкалар сиртига оксидли ҳимоявий пардалар қоплаш учун кислород таркибли бирикмаларнинг сувли эритмаларидан ҳам фойдаланиш мумкин. Бу бирикмалар кремний билан ўзаро таъсирлашиб кислород ажралади ва сиртни оксидлайди. Натижада, юпқа ҳимоя пардасини ҳосил қилади. Бундай эритмалар сифатида қуйидаги аралашмаларни кўрсатиш мумкин: 100 мл сув ва 50мг натрий ацетати; 200 мл сув ва 70 мл ортофосфор кислота; 100 мл сув ва 50мл олтингургут кислота; 150 мл сув ва 10 г двунатрийфосфат ва бош-қалардан фойдаланиш мумкин. Бу аралашмаларда 250-350°C температурада 10-15 соат ишлов берилади.

Кремний пластинкалар ва *p-n*-ўтишли кристалларни катализатор қатнашган ис газ муҳитида ишлов бериш билан бир жинсли SiO_2 ҳимоя пардаларини олиш мумкин. Катализатор сифатида метан ёки этилен ишлатилади. Бу усул қотишмали ёки диффузион тузилмаларда ҳимоявий пардаларни олиш имкониятини беради.

20.5. МЕТАЛЛ ОКСИД ПАРДАЛАР БИЛАН ҲИМОЯЛАШ

Металл оксид пардалар яримўтказгич материал сиртида ҳимоя қопламасини ҳосил қилади. Бу пардалар солиш-тирма қаршилиги 10^{14} - 10^{15} Ом-см бўлиб, намга барқарор ва иссиққа чидамлидир.

Яримўтказгичли асбоблар ишлаб чиқаришда *p-n*-ўтишли кристалларни ҳимоялаш учун алюминий, титан, бериллий, цирконий ва бошқалар оксидлари асосидаги ҳимоя пардалари қўлланилади. Намунавий материал қум кўринишида олинади. Ташувчи восита сифатида эса галоген ёки водороднинг галогид бирикмаларидан фойдаланилади. Ҳимоя пардаларини ўтказиш реакцион камераларда олиб борилади, унда манба ва яримўтказгич материал орасига градиентли температура ўрнатилади. Манба (қум) температураси яримўтказгич температурасидан юқори бўлади, чунки реакция маҳсулотлари *p-n*-ўтишлар сиртига ўтириши керак.

Манба ва яримўтказгич материал орасидаги температура градиенти ошиши натижасида ҳимоя пардасининг ҳосил бўлиш тезлиги ўсади. Al_2O_3 , BiO , TiO_2 , ZrO_2 ҳимоя пардаларни ўтказиш учун манба температурасини 800-1200°C диапазонда, *p-n*-ўтишли кристалл температурасини 350-500°C диапазонда ушлаш керак. Манба ва яримўтказгич кристалл орасидаги масофа температура градиентига боғлиқ равишда 10-20 см бўлиши керак.

Электрон-ковак ўтишли яримўтказгичли пластинкада ҳимоя пардаси ҳосил бўлишнинг технологик жараёни кварц найда олиб борилиб, унинг бир учига манба, масалан, Al_2O_3 , ли тигел ва иккинчи томонига *p-n*-ўтишли кристаллар жойлаштирилади. Кварц найдан олдин ҳаво чиқарилиб, кейин керакли миқдорда ташувчи реагент киритилади.

III.9-жадвалда металл оксидли ҳимоя пардаларини қоплаш режими берилган.

III.9-жадвал

Манба материали	Ташувчи реагентлар	Манба температураси °C	Пластика температураси °C
Al_2O_3	HCl, HBr	800-1200	400-500
BeO	HCl, HBr	900-1200	450-500
TiO_2	HCl, HBr, Cl_2	800-1000	480-500
ZrO_2	HCl, HBr	1000-1200	490-800

Юқорида кўрилган металл оксидли ҳимоя пардаларидан ташқари, *p-n*-ўтишли яримўтказгич материалларни ҳимоялаш учун 7,5% полиэтилен ва 92,5% полибутилендан ташкил топган аралашмада эриган қўроғошин сурикни манба

сифатида ишлатиш мумкин. Бу аралашма аралаштирилади ва *p-n*-ўтиш сиртига суркалади. Куриштиш температурасини 120-140°C деб танланади. Манба сифатида руххромат $ZnCrO_4$ ҳамда $ZnCO_3$, $SrCrO_4$ ва Pb_3O_4 лардан иборат аралашмадан ҳам фойдаланиш мумкин. Бундай аралашмада суспензия ҳосил қилиш учун учувчи эритмаларни аралаштириб ҳосил қилинади ва *p-n*-ўтишли кристалл сиртига суркалади. Шундан сўнг 200°C температурада термик ишлов бериш натижасида металл оксидли ҳимоя пардаси ҳосил бўлади.

Ҳимоя пардалари манбалари сифатида ишқорий ер металлари: титанатлар, цирконатлар ва станнатлардан фойдаланиш ҳам мумкин.

III.10-жадвалда яримўтказгичлар технологиясида ҳимояловчи, ажратувчи ва ниқоб қатламлари сифатида кенг фойдаланувчи материалларнинг таққослама тавсифномалари берилган.

III.10-жадвал

Материал тавсифномаси	SiO_2	Si_3N_4	Al_2O_3
Тақиқланган зона, эВ	8,0	4,5	5,0
Нисбий диэлектрик сингдирувчанлиги (паст частотали)	4,0	6-9	8-9
Сингдириш кўрсаткичи	1,4-1,5	2,0	1,7-1,8
Энг катта солиштирма қаршилиги, Ом·см	$10^{15}-10^{16}$	$10^{15}-10^{16}$	$10^{14}-10^{15}$
Кремний билан энг кичик сирт заряд зичлиги, cm^{-2}	10^{10}	10^{12}	$10^{11}-10^{12}$
Электрик мустаҳкамлиги, В/см	10^7	10^7	10^6
Термик кенгайиш коэфф. 200°Cда, K^{-1} (Si учун $4,5 \cdot 10^{-6}$)	$0,4 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$
Нисбий радиацияга чидамлиги	1	10	100

20.6. ШИША ПАРДАЛАР БИЛАН ҲИМОЯЛАШ

Шиша пардалар билан ҳимоялаш кўпчилик турдаги яримўтказгичли асбоблар ва ИМСлар учун қўлланилади. Шиша билан ҳимоялаш асбоблар электрик параметрларни яхшилаиди. Чунки, шиша қатлами *p-n*-ўтишда кўчувчи ионлар билан боғланади ва электрик параметрини маромга келтиради. Шишали ҳимоявий парда асбобнинг турғунлигини, мустаҳкамлигини ва ишлаш муддатини орттиради.

Шиша тўғридан-тўғри яримўтказгич сиртига ёки ҳимоя қатлами устига суркалиши билан бирга чиққичларининг маълум қисмига ҳам қопланиши мумкин.

Кремнийли асбобларни ҳимоялаш учун боросиликатли, фосфоросиликатли ва қўрғошин-силикатли шишалар, мос равишда: $m \cdot \text{S}_2\text{O}_3 \cdot n \cdot \text{SiO}_2$; $m \cdot \text{P}_2\text{O}_5 \cdot n \cdot \text{SiO}_2$; $m\text{PbO} \cdot n \cdot \text{SiO}_2$ лар қўлланилади. Албатта, анча мураккаб таркибли шишалар: алюминиборосиликатли $m \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n \cdot \text{BrO}_3 \cdot p \cdot \text{SiO}_2$, рухборосиликатли $m \cdot \text{ZnO} \cdot n \cdot \text{BrO}_3 \cdot p \cdot \text{SiO}_2$ ва бошқалардан ҳам фойдаланиш мумкин. Ундан ташқари, шиша таркибига модификаторлар: Li_2O ; K_2O ; Na_2O ; CaO ; BeO ва ноёб ер металлларнинг оксидлари қўшилади.

Кўп ҳолларда шишани органик эритувчилар (масалан, спиртда) коллоид эритма кўринишида олинади.

Олинган эритма ёки суспензия сепиш усулда таглик сиртига ўтказилади ва 600-700°C да сиртни эритгандан сўнг бир жинсли юпқа қатлам (0,1 мкм гача) олинади.

Кремний асосидаги *p-n*-ўтишларни ҳимоялашда алюмосиликат шишалар кенг қўлланилмоқда. Чунки, бу шишаларнинг термик кенгайиш коэффициенти кремнийнинг термик кенгайиш коэффициентиغا деярли яқин. Оксидланган кремний сиртига шишани ўтқазиш ҳимояланишни янада яхшилайдди. Бунга асосий сабаб, кремний оксид қатлам шиша билан кремний орасидаги ёпишқоқликни оширади.

III.11-жадвалда кўп қўлланиладиган алюмосиликат шишалар таркиби келтирилган.

III.11-жадвал

Шиша бирикма номери	Таркиблар, %				
	SiO_2	Al_2O_3	BeO	CaO	Na_2O
1	35	35	29,9	-	0,1
2	10	55	34,9	-	0,1
3	45	20	34,9	-	0,1
4	10	60	-	29,5	0,5
5	5	45	-	49,5	0,5

Алюмосиликатли шиша одатда оксид пардани 0,2 мкм дан юпқа бўлмаган қатламли кремний кристаллига суркалади. Агар оксид қатлами ундан кам бўлса, оксид қатлам

орқали яримўтказгич материалга натрий ионлари кириб бориши мумкин. Бу эса p - n -ўтиш электрик параметрлари-ни ёмонлаштиради. Шунинг учун алюмосиликатли шишалар асосан SiO_2 қатлами мавжуд яримўтказгичли кристалларда қўлланилади.

Ҳимоя пардалари сифатида халькогенид шишалар ва мураккаб таркибли шишалар ҳам қўлланилади.

Назорат саволлари

1. Кремний p - n -ўтишларни қандай ҳимоялаш усуллари бор?
2. Лақлар ва компаундлар нима мақсадларда ишлатилади?
3. Силанли ҳимоялаш деганда нимани тушунасиш?
4. Металл оксид пардалар хоссаларини айтиш.
5. Шиша пардалар p - n -ўтишларни қандай ҳимоялайди?

21-БОБ. ЯРИМЎТКАЗГИЧЛИ АСБОБЛАР ТАЙЁРЛАШ ТЕХНОЛОГИЯСИ

21.1.УМУМИЙ МАЪЛУМОТЛАР

Турли яримўтказгичли асбобларнинг ажойиб физик хоссаларини тушуниш ва уларнинг лойиҳалаш принципларини эгаллаш учун технологик тайёрлаш йўлларини ва яримўтказгич тузилмаларни олиш усулларини билиш зарур. Яримўтказгичли асбоблар ишлаб чиқариш технологиясига қўйилган талаблар асбобларнинг фойдаланиш тавсифлари ва иқтисодий кўрсаткичлари: такрорийлик оралиғи ва тезкорлиги, қуввати, мустаҳкамлиги, ўлчами, массаси, тайёрлашнинг қийинлиги ва таннарни билан аниқланади.

Технологик маршрут. Ҳар хил яримўтказгичли асбобларни тайёрлаш усуллари турли кўринишдадир. Бироқ барча ҳолларда яримўтказгич кристалл умумий технологик амаллардан кетма-кет ўтказилади. Бунинг учун технологик маршрут тузилади. Намуна маршрутга илк яримўтказгич қуйманинг кириш назорати, пластинкаларга механик ва кимёвий ишлов бериш, эпитаксиал қатлам ўстириш, диэлектрик ҳимоявий парда олиш, бу пардага фотолитографик ишлов бериш, *p-n*-ўтиш олиш учун киришма маҳаллий диффузияси, омик ўтишлар олиш учун юпқа металл пардалар ва интеграл микросхемаларнинг пасив таркибларини ўтказиш, резисторлар ва улаш ўтказгичлари, пластинкаларни кристалларга ажратиш, йиғиш, ҳимоялаш, электр параметрларини ўлчаш ва асбобларни турли режимларда чидамлилигини синашлар киради.

Ишлаб чиқаришда лойиҳаланган яримўтказгичли асбоб намуна маршрут асосида тайёрланади.

Электр ўтиш турлари. Кўпчилик яримўтказгичли асбоблар тузилмасининг асосий элементи электр ўтиш бўлиб, уларга турли солиштирма қаршиликка эга бўлган турли ўтказувчанлик соҳасига эга бўлган яримўтказгичнинг иккита соҳасида вужудга келган ўтиш қатлами ва металл

яримўтказгич контакти натижасида ҳам вужудга келган ўтишлар киради. Агар яримўтказгич икки соҳасининг бири n -тур, иккинчиси p -тур бўлса, бундай ўтишни электрон-ковак ўтиш ёки p - n -ўтиш дейилади. Кўпчилик кенг тарқалган асбобларнинг хоссалари p - n -ўтишларда юз берадиган жараёнлар билан аниқланади. Масалан, n -тур соҳа ва p -тур соҳаларда киришмалар концентрацияси анча юқори бўлса, унда p - n -ўтиш вольт-ампер тавсифномасининг кўриниши оддий p - n -ўтиш тавсифномасидан кескин фарқ қилиб, тавсифнома N кўринишда бўлади. Бундай p - n -ўтишлардан тайёрланган диодларни туннел диодлари дейилади.

Электрон-ковак ўтишлар симметрик ва носимметрик бўлиши мумкин. Симметрик ва носимметрик бўлиши ток ташувчилар концентрациясининг p - n -соҳаларда киришмалар тақсимооти билан аниқланади. Симметрик p - n -ўтишларда $n_p = p_p$ шарт бажарилади, бу ерда n_p - n -турдаги яримўтказгичдаги электронлар концентрацияси; p_p - p -турдаги яримўтказгичдаги коваклар концентрацияси. Шундай қилиб, симметрик p - n -ўтишнинг иккала соҳасидаги асосий ток ташувчи зарядлар концентрацияси бир-бирига тенг бўлар экан. Бироқ амалда носимметрик ўтишлардан фойдаланилади. Носимметрик ўтишлар икки хил кўринишда ҳосил бўлиши мумкин, яъни $n_p > p_p$ ёки $p_p > n_p$, бунда фарқ 100-1000 марта бўлиши мумкин. Киришмалар билан юқори легирланган (масалан, $p_p > n_p$ ўтишда p -соҳа) кичик омли соҳа эмиттер дейилади. Киришмалар билан кичик легирланган ($p_p > n_p$ ўтишда n -соҳа) юқори омли соҳа-база дейилади.

Агар носимметрик p - n -ўтишнинг p -соҳаси анча юқори ўтказувчанликка, яъни киришмалар анча юқори легирланган бўлса, бундай ўтишларни p^+ - n -ўтишлар дейилади. Худди шундай n -соҳа анча юқори ўтказувчанликка эга бўлса n^+ - p -ўтиш дейилади.

Электр ўтишларни ҳосил қилиш учун қўлланиладиган яримўтказгичли материал модда хилига қараб, гомоген ва гетероген ўтишларга бўлинади. Бир жинсли яримўтказгич материалда ҳосил қилинган ўтишларни гомоген ўтиш ёки гомоўтишлар дейилади. Бунга кремний, германий, галлий арсениди ва бошқалар киради. Гетероўтишлар эса, турли яримўтказгичлар орасида вужудга келган ўтиш бўлиб, уларга германий-кремний, германий-галлий арсениди ва бошқа-

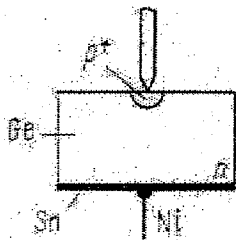
лар киради. Яримўтказгич сиртига металлни ўтказиш билан олинган ўтишии Шоттки ўтиш дейилади. Ўтишларнинг яна бир тури, агар n - ва p -соҳалар оралиғида хусусий электрўтказувчанлик i -соҳа вужудга келтирилган бўлса, бундай тузилмалар p - i - n , p^+ - i - n^+ ва шунга ўхшаш белгиланади. Булардан ташқари, яримўтказгичли тузилмаларга транзисторларнинг p - n - p ёки n - p - n , тиристорларнинг n - p - n - p тузилмаларини ва бошқаларни мисол қилиб кўрсатиш мумкин.

Электр ўтишлар кескин ва текис p - n -ўтишларга бўлинади. Кескин ўтишда киришмалар концентрациясининг ўзгариш соҳа қалинлиги фазовий заряд соҳаси қалинлигидан етарли даражада кичик бўлади. Соҳа қалинлиги деганда, киришма концентрация градиенти йўналишидаги ўлчам тушунилади. Текис ўтишлар — электр ўтишларда киришма концентрациясининг ўзгариш соҳа қалинлиги фазовий заряд соҳаси қалинлигига яқин бўлади. Ўтиш майдонига қараб нуқтавий ва ясси электрон-ковак ўтишларга ҳам бўлинади. Ясси ўтишлар тайёрланиш усулларига қараб қотишмали, диффузион, ион, планар, эпитаксиал, планар-эпитаксиал ва бошқаларга бўлинади.

21.2. ЭЛЕКТРОН-КОВАК ЎТИШЛАРНИ ТАЙЁРЛАШ ТЕХНОЛОГИЯСИ

Яримўтказгичли асбобларни ишлаб чиқариш технологияси жуда тез ривожланиб бормоқда. Биз бу ўринда яримўтказгичли асбобларни ишлаб чиқариш ва тайёрлаш асосларини ташкил қилувчи бош технологик усулларига тўхталамиз.

Нуқтавий ўтишлар. Нуқтавий p - n -ўтишларни тайёрлаш учун n -турдаги германийдан фойдаланилади. Олдиндан силлиқланган пластинкага диаметри 20-30 мкм бўлган бериллий бронзадан қилинган нина-зонд маҳкамланади. Кейин электрокавиарлаш усулида зонд орқали қисқа вақтли импульсли қувватли ток ўтказилади. Контакт жой зонд материални эришигача қиздирилади ва мис германий ичи томон диффузияланиб, зонд ости-

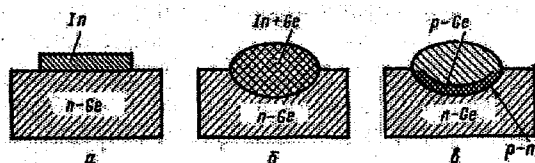


III.53-расм. Нуқтавий p - n -ўтиш тузилмасининг кўриниши.

да унча катта бўлмаган ҳажмда p -тур соҳани ҳосил қилади, чунки мис германий учун акцептор киришма вазифасини ўтайди (III.53-расм). Баъзан p - соҳада концентрацияни ошириш учун нина учига акцептор киришма (In ёки Al) ўтқазилади. Бунда контактнинг ўтказувчанлиги 100 мА/В га етади.

Нуқтавий ўтишларнинг контакт майдони жуда кичик бўлганлиги учун p - n -ўтиш сифими кичик бўлади. Шунинг учун улардан юқори ва ўта юқори такрорийликли диодлар тайёрлашда фойдаланилади.

Қотишмали p - n -ўтишлар. Қотишмали усулни қўллаганда, силлиқланган ва едирилган монокристалл германий n -тур пластинкага уч валентли кичкина металл парча индий ўрнатилиб (III.54, а-расм), кейин инерт газ муҳитида ёки вакуумда 550-600°C температурагача қиздирилади. Бунда индий шу темпера-

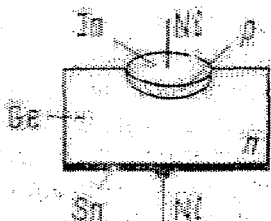


III.54-расм. Қотишмали p - n -ўтиш тузилмасини ҳосил бўлиши.

турада эрийди ва ҳосил бўлган томчи германийни ўзида эритади (III.54, б-расм). Маълум вақт ўтгандан сўнг печка ўчирилади. Совуқ индийда германийнинг эрувчанлиги кам, шунинг учун совиш натижасида германий қайта кристаллана бошлайди ва томчи тубида p -турдаги қайта кристалланган юпқа қатлам ҳосил бўлади.

Қайта кристалланиш пайтида германий индий атомларини эгаллаб олади. Совиган томчининг қолган қисми етарли тозаликдаги индий бўлиб омик контакт вазифасини бажаради. Унга ташқи чиққич, одатда ингичка никель сими кавшарланади.

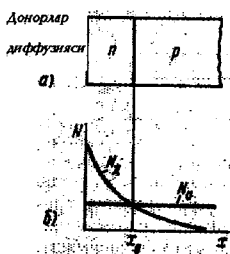
Германий пастки қисмига қалай ўтқазилиб, у n - германий учун омик контакт вазифасини ўтайди. Бу ерда ҳам ташқи чиққич сифатида никель



III.55-расм. Қотишмали p - n -ўтиш тузилмаси.

симидан фойдаланиш мумкин (III.55-расм). Ҳосил бўлган p - n -ўтишлар кескин ўтишлар бўлиб, уларнинг майдони нуқтавий p - n -ўтишларга нисбатан катта бўлганлиги учун сизими анча катта. Шунинг учун бундай ўтишлар асосан қувватли диодлар ва транзисторлар тайёрлашда қўлланилади.

Диффузион p - n -ўтишлар. Диффузион p - n -ўтишни яратиш учун яримўтказгичга киришмаларнинг газ кўринишида, суюқ ва қаттиқ фазадаги диффузиясидан фойдаланилади. Усуллардан бири газ муҳитда диффузияни кўрамыз. Бу ҳолатда юпқа яримўтказгич пластинка, масалан, кремний n -тур акцептор буғи билан тўлдирилган модда (бор) буғ печкага ки-

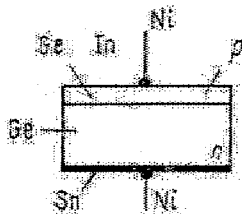


III.56-расм. Диффузион p - n -ўтишнинг ҳосил бўлиши.

ритилади ва юқори температурагача қиздирилади. Кристаллга кирган киришма диффузия чуқурлиги технологик режими (температура ва диффузия вақти) боғлиқ ва осон бажарилади. Диффузия тугагандан сўнгра пластинканинг бир томони ва тўрт ёқлари бошланғич n -тургача едирилади ва қолган бир томонида p -тур диффузион қатлам қолади. III.56-расмда диффузион p - n -ўтишнинг ҳосил бўлиши, III.57-расмда диффузион p - n -ўтиш тузилмаси кўрсатилган.

Диффузион усул текис p - n -ўтишларни олишни таъминлайди. Ундан ташқари, бу усул битта пластинкада кўплаб ўтишларни олиш имконини беради.

Планар p - n -ўтишлар. Бу усулнинг келиб чиқиши барча p - n -ўтишлар асосидаги диод, транзистор ва контактлар таянч яримўтказгичининг кичик қалинлик сирт текислигида жойлашган. Планар технология (ингилизча planar-ясси сўздан олинган) диффузион технологияни ривожланиш маҳсулидир. Ярмўтказгич сиртида ўтказилган ҳимоя қатлам тирқиши орқали киришма диффузияси натижасида олинган ўтишни планар ўтиш дейилади. Кремнийда ҳимоя қатлами сифатида кремнийнинг ўзида вужудга келтирилган кремний оксидидан фойдаланилади.

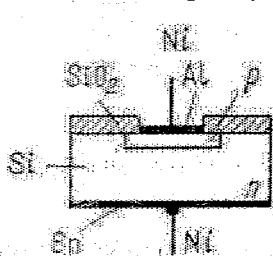


III.57-расм. Диффузион p - n -ўтиш тузилмаси.

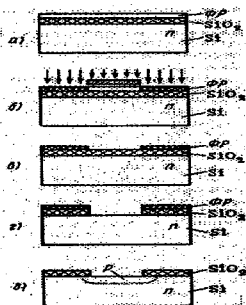
Планар p - n -ўтишнинг вужудга келиш технологик жараён босқичлари III.58-расмда кўрсатилган. Планар технологиянинг асосини фотолитография ташкил қилади. Оксидланган монокристалл кремний пластинка сиртига фоторезист (ФР) юпқа қатлам ўтказилади (III.58, а-расм). Фоторезист парда ниқоб орқали ультраби-нафша нур билан ёритилади (III.58, б-расм). Фоторезист экспозицияланган жойи полимерланади ва эримай-диган бўлиб қолади. Натижада, едир-гичда едирилган полимерланмаган жойи ювилиб кетади (III.58, в-расм).

Кейин оксид қатлам очилган жой едиригичлар билан едирилади, фоторезист билан ҳимояланган жой эса қолади (III.58, г-расм). Бу амалдан кейин таглик кремний пластинкага диффузия ўтказилади. Киришма диффузияси фақат тирқиш орқали ўтказилади.

Диффузия юқори температурада ўтказилганлиги учун сирт яна оксидланиб қолади. Фотолитографиядан фойдаланган ҳолда оксидланиб қолган жой едирилади ва очилган жойга металл контакт ўтказилади. Бу амаллар натижасида битта пластинкада бир неча ўн ва ҳатто юзлаб бир хил диод тузилмаларни олиш мумкин. Олинган бу планар p - n -ўтишлар тузилмаси кристалларга кесилади. Баъзан, диодларни йиғиш ишини осонлаштириш учун пластинка иккинчи томонига омик



III.59-расм. Планар p - n -ўтиш тузилмасининг умумий кўриниши.



III.58-расм. Планар p - n -ўтишнинг вужудга келиши технологик жараён босқичлари.

контактлар ўтқазилиши мумкин. Планар p - n -ўтиш тузилмасининг умумий кўриниши III.59-расмда кўрсатилган.

Планар технологияни германийда ҳам қўллаш мумкин. Бу ҳолатда кремний оксид парда германий сиртига кремний органик бирикмаларини термик буглатиш билан ўтқазилади. Планар усулда олинган асбоблар гуруҳининг электр параметридаги фарқлар жуда кичик. Чунки, бу асбоблар яримўтказгичли битта пластинкадан бир-

лик технологияда олинади. Шунинг учун ҳам планар технология микроэлектроникани асосини ташкил қилади.

Эпитаксиал p - n -ўтишлар. Эпитаксиал усулда электрон-ковак ўтишларни олиш турли тагликларда яримўтказгичли эпитаксиал пардаларни ўстиришга асосланган. Агар ўсган яримўтказгич эпитаксиал қатлам ўтказувчанлиги таглик ўтказувчанлигига қарама-қарши бўлса, унда p - n -ўтиш ҳосил бўлади (III.60-расмда таглик сифатида p -германий бўлиб, унга n -турдаги эпитаксиал германий парда ўтқазилган.

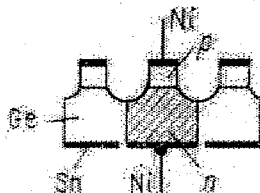


III.60-расм.
Эпитак-
сиал p - n -ўтиш.

Ҳозирги вақтда турли тагликларда эпитаксиал пардаларни ўстириш усули ишлаб чиқарилиши импульсли диодлар, юқори такрорийликли транзисторлар ва бошқа яримўтказгичли асбобларни ишлаб чиқаришда кенг қўлланилмоқда. Эпитаксиал усул интеграл микросхема-лар тайёрлашда кенг қўлланилади.

Ион легирлаш билан p - n -ўтишлар олиш. Кейинги йилларда ион легирлаш усулида p - n -ўтишларни олиш самарали ўрганилмоқда ва амалиётда кенг қўлланилмоқда. Ион манбаларда акцептор ёки донор заррачалар ион оптик тизимда оқимни ҳосил қилиб уни 40-800 кэВ энергиягача тезлаштирилиб яримўтказгич пластинка — мўлжалга тўғриланади. Ионларни яримўтказгич пластинка чуқурлигига кириб бориши уларнинг энергиясига боғлиқ бўлиб, легирланиш даражаси ионлар оқими билан мўлжални нурлантириш вақтига боғлиқ.

Меза-ўтишлар. Бирлик технологик жараёнларда яримўтказгичли асбобларнинг катта гуруҳда тайёрлашда меза-ўтишлар олинади. Бунда n -турдаги кремнийда диффузион усулда p -қатлам олинади (III.61-расм). Маълум чуқурликда текис p - n -ўтиш олингандан кейин ниқоб орқали ушбу ўтишга лак суркалади. Едириш амали билан нусха олинади. Шундан кейин пластинка p - n -ўтишларга кесилади. Алоҳида олинган элемент ёки кристаллча стулчага ўхшаб кетганлиги учун бундай тузилмаларни меза-ўтиш-



III.61-расм. Меза-ўтишлар.

лар (испанча mesa-столча) дейилади ва бу технологияни меза-технология дейилади. Меза-технология бўйича олинган бир гуруҳ ўтишларнинг параметрларида фарқ кам бўлади. Бу технология яхши ўрганилган ва юқори такрорийликли транзисторларни ишлаб чиқаришда кенг қўлланилади.

21.3. ДИОДЛАР ОЛИШ ТЕХНОЛОГИЯСИ

Яримўтказгичли диодлар тайёрлаш ҳақида баъзи маълумотларни келтирамиз. Диодлар p - n -ўтиш ёки металл яримўтказгич контакти заминида тайёрланади ва турли-туман ва зифаларни бажаради.

21.3.1. ПАСТ ЧАСТОТАЛИ ТЎҒРИЛОВЧИ ДИОДЛАР

Бундай диодлардан одатда саноат частотасидаги (50Гц) ўзгарувчан токларни тўғрилаш учун фойдаланилади. Улар булардан ҳам юқорироқ частоталарда ишлай олади. Йўл қўйиладиган энг катта тўғри ток катталигига қараб мазкур диодларни уч турга ажратилади: кичик қувватли диодлар (тўғри ток 0,3 А гача), ўрта қувватли диодлар (тўғри ток 0,3 А дан 10 А гача), катта қувватли диодлар (тўғри ток қуввати 10 А дан юқори). Ҳозирги вақтда тўғриловчи диодлар кремний асосида тайёрланади. Кейинги пайтда бундай диодлар галлий арсениди асосида ҳам тайёрланадиган бўлди.

Ясси (планар) кремний тўғриловчи диодларнинг p - n -ўтиши n -тур электрик ўтказувчанликли кремний плас-тинкасига алюминий ёки борни киритиш, p -тур кремний кристали плас-тинкасига фосфорни диффузиялаш усулида шаклланади. p - n -ўтишнинг юзини йўл қўйиладиган (рухсатланадиган) тўғри ток қўйматиға қараб аниқланади: кремний p - n -ўтишлари учун рухсатланадиган тўғри ток зичлиги 200 А/см², кремний кристаллининг дастлабки қалинлиги 0,2-0,4 мм.

Ҳақиқий p - n -ўтишларнинг тешилиши кўпинча яримўтказгич сирти яқинида, яъни p - n -ўтишнинг сиртга чиқиши жойида рўй беради. Шунинг учун p - n -ўтишнинг сиртга чиқадиған қисми унинг марказий қисмидан қалинроқ қилинади.

Тўғриловчи ясси (планар) диодларнинг частотавий хоссалари диод базасида ноасосий заряд ташувчиларнинг жамғарилиши ва сўрилиши жараёнларига боғлиқ. Шунинг учун дастлабки кремний кристаллига олтин диффузияланади, у ноасосий заряд ташувчилар вақтини камайтиради ва ишлаш частоталарини кўғаради. Бундай частотавий диодлар 100 кГц частотали ўзгарувчан тоқларни тўғрилай олади.

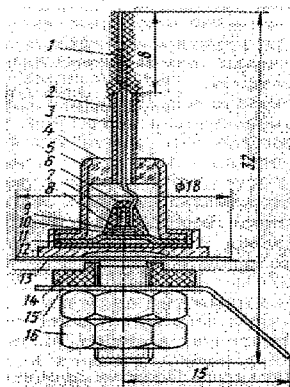
Ташқи таъсирлардан ҳимоялаш ва иссиқликни тез олиб кетишни таъминлаш мақсадида *p-n*-ўтишли кристаллни корпусга жойланади.

Кам қувватли диодларни одатда эгилувчан ташқи чиқишлари бор пластмасса корпусда, ўрта қувватли диодлар қаттиқ ташқи чиқишлари бор металл-шиша корпусда, катта қувватли диодлар эса металл-шиша ёки металл-керамика корпусда шаклланади. Тўғриловчи диоднинг қиёфаси III.62-расмда кўрсатилган.

Айрим диод учун рухсатланадиган кучланишдан юқори кучланишли ўзгарувчан тоқларни тўғрилаш учун саноат тўғриловчи яримўтказгич устунлар ишлаб чиқаради. У кетма-кет уланган тўғриловчи диодлар бирлашмасидан иборат ва иккита чиқишга (электродга) эга. Кремний тўғриловчи устунлар учун энг катта рухсатланган тесқари кучланишлар бир неча киловольт бўлади.

Кремний тўғриловчи диодларнинг ишлаш температура-лар оралиги -60°C дан $+125^{\circ}\text{C}$ ғача.

Германий, галлий арсениди, селен асосидаги тўғрилагичлар ҳам мавжуд.



III.62-расм. Кремний ясси диоднинг тузилиши чизмаси:

- 1-ташқи чиқиш; 2-найча; 3-ички чиқиш; 4-изоляцияр; 5-корпус; 6-ҳимояловчи қатлам; 7- яримўтказгич кристалли устидаги ташқи электрод; 8-*p-n*-ўтишли кремний кристалли; 9-диод тузилманинг асосий соҳаси; 10-кавшар қатлам; 11-кристалл тутгич; 12-корпус оёқчаси; 13-изоляцияловчи шайба; 14-изоляцияловчи втулка; 15-тоқ кетадиган ёпроқча; маҳкамловчи гайкалар.

21.3.2. ИМПУЛЬСДА ИШЛАЙДИГАН ДИОДЛАР

Импульсда ишлайдиган диод ўтма жараёнлар давомийлиги кичик бўлган ва импульсли режимда ишлай оладиган яримўтказгичли диоддир. Дастлаб нуқтавий импульс диодлари ишлаб чиқилган эди. Кейинчалик беқиёс сифатли импульс диодларини планар технология бўйича тайёрланадиган бўлди. Асосий модда-кремний, баъзан галлий арсениди ҳам қўлланилади. Олдин айтганимиздек, бу диодларда тескари қаршилиқни тезроқ тиклаш учун кремнийга олтин киритилади.

Планар импульс диодларни тайёрлашда киришмалар диффузияси кремний оксиди SiO_2 қатламидаги тешиқчалар орқали амалланади. Бундай диодларнинг p - n -ўтиши юзи етарли кичик қилиниши мумкин, бинобарин, p - n -ўтишнинг электрик сифими кичик бўлади.

Планар технология нисбатан содда равишда бир кристаллда кўп диодлар шакллантириш имконини беради. Шу йўсинда импульс диодлари гуруҳи ҳосил қилинади, бунда бир тузилмага йиғилган, лекин электрик уланмаган ёки бир исмли электродлар билан уланган импульс диодлари тўплами ҳосил бўлади. Улардан ҳисоблаш техникасида фойдаланиш қулай бўлади.

21.3.3. ШОТТКИ ДИОДЛАРИ

Бу диодларнинг асосини тўғриловчи металл-яримўтказгич контакти ташкил қилади.

Металл-яримўтказгич тўғриловчи контакти асосида тўғриловчи, импульсда, ўта юқори частоталарда ишлайдиган яримўтказгичли диодлар тайёрланади. Улар p - n -ўтишли диодлардан ўзининг юқорироқ частоталарда ишлай олиши билан фарқ қилади.

Тўғриловчи Шоттки диодлари. Металл-яримўтказгич контакти C_k сифимининг қайта зарядланиши вақти Шоттки диодлари частотавий хоссаларига асосий таъсир кўрсатади. Қайта зарядланиш вақти t база қаршилигига ҳам боғлиқ: $t = r_6 C_k$. Шунинг учун Шоттки контактини n -тур ўтказувчанликка эга бўлган яримўтказгич кристаллида ҳосил қилиш мақсадга мувофиқ, чунки бу кристаллда электронлар ҳаракатчанлиги

ковакларникидан катта. Шу сабабдан яримўтказгич кристалда киришмалар концентрацияси каттароқ бўлиши керак. Аммо, Шоттки потенциал тўсиғи (контакт) кенглиги етарли катта бўлиши керак. Бу икки қарама-қарши талаб оптимал равишда ҳал қилинади.

Мулоҳазалар кўрсатишича, паст частотали тўғриловчи диодлар *p-n*-ўтишлар асосида тайёрланиши маъқул. Аммо, юқори частотали катта амплитудали ўзгарувчан тоқларни тўғрилашда Шоттки диодлари афзалроқдир.

Масалан, Шоттки диодларининг намунали қисми учун рухсат этиладиган тўғри ток 10А, унга мос тўғри кучланиш 0,6В дан ошмайди, рухсат этиладиган тескари кучланиш 20В. Бу диод тўғриланадиган тоқнинг 0,2МГц частотасига мўлжалланган.

Импульс Шоттки диодлари. Бу диодлар учун галлий арсениди афзалроқ материал ҳисобланади, чунки унда ноасосий заряд ташувчилар вақти 10^{-9} с дан ҳам кичик бўлиши мумкин. Бундай диодлар пико ва наносекунд ораликда ишлашга мўлжалланган. Тўғриловчи диодлар фарқли равишда импульс диодлар контакти юзи анча кичик бўлади. Бу диодларнинг сифими 10 пф дан ошмайди.

21.3.4. ЎТА ЮҚОРИ ЧАСТОТАГА МЎЛЖАЛЛАНГАН ДИОДЛАР

Бундай диодлар ёрдамида ўта юқори частотали (ЎЮЧ) сигнал ўзгартирилади ва ишланади. Улар 300МГц дан юқори частоталарда турли радиоэлектрон асбобларда ва ўлчаш техникасида ишлатилади. ЎЮЧ соҳадаги электромагнит тебранишларни вужудга келтириш (генерациялаш) ва кучайтириш, частотани кўпайтириш, сигналларни модуллаш, бошқариш, чеклаш ва ҳ.к. вазифаларни бажариш имконини беради. ЎЮЧ диодлар хиллари: туннел ва қайтарма диодлар, варикаплар, кўчки-учув диодлар, Ганн генераторлари, импульс диодлар, аралаштиргич диодлар, детекторлар, қайта улагич диодлар ва бошқалар.

Аралаштиргич диодлар. Юқори частотали (электромагнитик) сигналларни пастроқ (оралиқ) частотали сигналларга айлантирувчи яримўтказгич диодларни аралаштиргич диодлар дейилади.

ЎЮЧ диодларнинг частотавий хоссалари исталгандек бўлиши учун уларнинг базасига ноасосий заряд ташувчилар ки-

ритилмаслиги, базада уларнинг яшаш даври, потенциал тўсиқ сифимининг қайта зарядланиш вақти кичик бўлишлиги, база қаршилиги паст бўлишлиги (диодда қувват кам исрофланиши) керак.

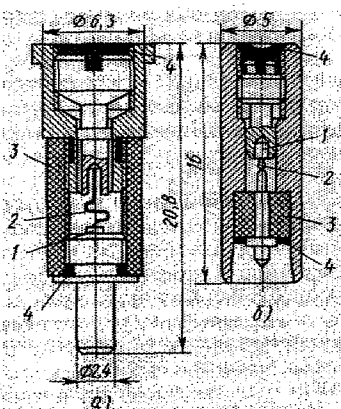
ЎЮЧ диодлар ишончилигини ошириш учун уларнинг тешилиш кўчкисимон бўлиши керак.

Бу талаблардан келиб чиқадиган хулоса шуки, ЎЮЧ диод учун дастлабки яримўтказгич модданинг тақиқланган зонаси кенгроқ бўлиши, ноасосий заряд ташувчилар яшаш вақти кичик бўлишлиги, асосий заряд ташувчилар ҳаракатчанлиги катта бўлишлиги (солиштирма қаршилиқ г кичик бўлишлиги) керак. Бу талабларни галлий арсениди кристали яхшироқ қаноатлантиради.

Аралаштиргич ЎЮЧ диодлар сифатида Шоттки диодлари анча кенг қўлланилади. Тўғриловчи ўтишнинг ўлчамлари диоднинг қандай частоталар оралиғида ишлашига боғлиқ равишда танланади. Масалан, жуда юқори частоталар (ўнларча ва юзларча ГГц частоталар, яъни миллиметр оралиқдаги тўлқин узунликли сигналлар) учун Шоттки ўтиши 2-3 мкм диаметри бўлади. Бу ўлчам оддий фотолитография учун чегаравий бўлиб, бунда фоторезист кимёвий едириш ўрнига ион-плазма едиришдан фойдаланилади.

ЎЮЧ занжирларига киритиш қулай бўлиши учун ЎЮЧ — диодларни турли корпусларга жойлаштирилади (III.63-расм). III.63, а-расмда тасвирланган диодлар 12 ГГц гача частоталарда, III.63, б-расмдагилари эса 30 ГГц гача қўлланилади.

Интеграл ЎЮЧ микросхемалар учун ё кичик корпусли, ёки корпуссиз (сирти диоксид пардаси билан қопланган) ЎЮЧ диодлардан фойдаланилади.



III.63-расм. Баъзи ЎЮЧ диодлар тузилишлари: 1-яримўтказгич кристалли; 2-контакт пружинаси; 3- керамика втулка; 4- гипс ёпувчи қуйма.

Детектор диодлар. Бу диодлар (электромагнитик) сигнални ошкорлаш (қайд қилиш) учун қўлланилади.

Қайта улагич диодлар. Бундай диод ЎЮЧ қувват катталигини бошқарувчи қурилмаларда қўлланилади.

21.3.5. СТАБИЛИТРОНЛАР

Яримўтказгичли стабилитрон кучланишни барқарорлаш учун хизмат қиладиган диод бўлиб, унда тескари йўналишда электрик тешилиш соҳасида кучланиш токка жуда суст боғланган, яъни ток ўзгаради-ю, аммо кучланиш деярли ўзгармас қолаверади. Электрик тешилиш кўчкисимон ёки туннелланиш тешилиш бўлади.

Стабилитроннинг энг асосий параметри стабиллаш (барқарорлаш) кучланиши U_{cm} бўлиб, у p - n -ўтишнинг кенглиги ёки диод базасининг солиштирма қаршилигига боғлиқ. Шунинг учун турли стабилитронлар турли U_{cm} га (3 дан то 400В гача) эга бўлади.

Яна бир муҳим параметр-стабиллаш кучланиши U_{cm} нинг температуравий коэффиценти α_{cm} дир:

$$\alpha_{ct} = \frac{1}{V_{ct}} \frac{\Delta V_{ct}}{\Delta T} \Big|_{I_{ct}} = \text{const.}$$

Бу коэффицентининг қиймати турли стабилитронлар учун турлича.

Паст вольтли стабилитронларни кучли легирланган кремний асосида тайёрланади. Уларда $U_{ct} < 6В$ бўлиб, туннел тешилиш содир бўлади, $\alpha_{ct} < 0$.

Юқори вольтли стабилитронларда p - n -ўтиш кенгроқ бўлиши керак. Шунинг учун уларни кучсиз легирланган кремний асосида тайёрланади, улар кўчкисимон тешилиш туфайли кучланишни барқарорлайди, $\alpha_{ct} > 0$.

Кўпчилик стабилитронлар ана шу турга мансуб. Стабилитронлар параметрларини яхшилаш учун технологик чоралари ишлаб чиқилган.

Стабилитронлар ҳам, тўғрилагич ва бошқа диодлар сингари, корпусларга жойланади ёки ҳимоявий қопламали корпуссиз кўринишда ишланади.

Стабилитронларни тайёрлашда p - n -ўтишларни қотиштириш ва диффузион усуллар қўлланилади. Бунда бир вақтда кириш-мани кремний кристалининг икки тарафидан киритилса, бу тарафлар орасига кучланиш берилганда бир-бирига қарши уланган иккита p - n -ўтиш ҳосил бўлади. Бундай стабилитронларни икки анодли стабилитронлар дейилади. Улар турли қутбли кучланишларни стабиллаш учун қўлланилади.

21.3.6. СТАБИСТОРЛАР

Яримўтказгичли стабистор-кучланишни барқарорлашга мўлжалланган диод бўлиб, унда муайян ораликда тўғри кучланиш токка жуда суст боғлиқ бўлади. Уларда $U_{cm} \sim 0,7$ В. Бир неча стабистор кетма-кет уланса, анча катта U_{cm} олиш мумкин. Стабисторларнинг асосий қисми p - n -ўтиши паст омли кремнийда ҳосил қилинган кремний диодларидир.

Стабисторлар учун $\alpha_{ct} < 0$. Бу температура ошганда p - n -ўтишдаги потенциал тўсиқ баландлиги пасайиши ва шу тўсиқдан кўпроқ заряд ташувчилар ўтиши сабабларидандир.

Стабисторларни мусбат α_{ct} ли стабилитронларга кетма-кет улаб, стабилитронлар U_{cm} ларини температура билан ўзгартишини бартараф қилинади.

Кремний стабисторларидан бошқа, саноат яна селен поликристаллари асосидаги стабисторлар ишлаб чиқаради. Уларни тайёрлаш содда, нархи паст. Бироқ селен стабисторларнинг ишлаш муддати камроқ (1000 соат) ва ишлаш температура-лари оралиғи торроқ ($-25 \div +60^\circ\text{C}$).

21.3.7. ТУННЕЛ ДИОДЛАР

Бу диодлар легирловчи киришмалар зичлиги етарлича катта бўлган (айниган) яримўтказгичда шаклланган p - n -ўтиш асосида тайёрланади. Электрон ва ковак соҳалар ўтказувчанлиги катта бўлганлиги сабабли p - n -ўтиш кенглиги кичик (10^{-2} мкм чама-сида) бўлади, яъни бошқа диодлардагидан икки тартиб (~ 100 марта) юпқа бўлади. Бундай юпқа қатлам потенциал тўсигидан заряд ташувчилар туннелланиб (сирқиб+) ўта олади.

Тескари кучланишлар соҳасида ҳам туннел диодда туннелланиш содир бўлади. Саноатда галлий арсениди ва германий асосида туннел диодлар мунтазам ишлаб чиқарилмоқда.

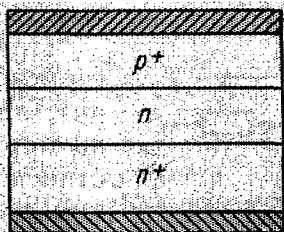
21.3.8. ВАРИКАПЛАР

Варикап — ўзгарувчан сиғимли диоддир. Вари (vary) — ўзгариш, кап (capacitance) — сиғим маъносини англатади. $p-n$ -ўтиш (ёки металл-яримўтказгич контакти) электрик сиғими қўйиладиган ташқи кучланишга боғлиқ эканлиги маълум. Варикап диодлар ана шу хоссага асосланиб ва муайян мақсадларга мўлжалланиб тайёрланади. Унинг бир тури тузилиши III.64-расмда кўрсатилган. Унинг асосий параметрлари: варикап сиғими C_v , сиғим бўйича устма-уст тушиш коэффициенти K_c , варикап асллиги Q_v .

$p-n$ -ўтишда кучланиш ўзгарганда сиғим ўзгариши ва бу сиғимнинг қайта зарядланиш $p-n$ -ўтиш яқинидаги соҳаларда асосий заряд ташувчиларнинг кўчиши билан боғлиқ. Бу жараённинг вақтий доимийси $\tau = \epsilon \epsilon_1 \rho$.

Паст частоталарда ишлатиладиган варикапларда $p-n$ -ўтишнинг дифференциал қаршилиги ва сиғими кўпайтмаси $r_{p-n} C_v$ катта бўлиши керак. Шунинг учун кенг тақиқланган зонали яримўтказгич моддалардан (кремний, галлий арсениди ва бошқалар) фойдаланиш мақсадга мувофиқ.

Варикаплар асосан юқори ва ўта юқори частоталарда қўлланилади. Бундай варикапларда базанинг r_b дифференциал қаршилиги кичик бўлиши керак, бунинг учун эса дастлабки яримўтказгич моддада заряд ташувчилар ҳаракатчанлиги катта бўлиши зарур (галлий арсениди, $n-Ge$ ва бошқалар).



III.64-расм. Базаси қаршилиги кичик бўлган варикап тузилиши.

21.3.9. ДИОДЛАРНИНГ ИШОНЧЛИЛИГИ

Диодларнинг ишончлилиги радиоэлектрон тузилмаларнинг бошқа қисмлари ишончлилигидан анча юқори бўлади.

Ишончлиликнинг миқдорий баҳоси асбобларнинг муайян муддатда ишлаш қобилиятининг бузилиши, яъни ишдан чиқишлар сони билан аниқланади.

Ишдан чиқишларнинг икки кўриниши бор:

1) ҳалокатли, яъни тўсатдан бир ёки бир неча асбобнинг кескин ишдан чиқиб қолиши;

2) шартли ёки аста-секин асбобнинг асосий параметрларининг ўзгариши оқибатида ишдан чиқиб қолиши.

Ишдан чиқиб қолишларнинг сабаби асбобнинг шакллантириш ёки технология жараёнида йўл қўйилган камчиликлар, нотўғри фойдаланиш бўлиши мумкин.

Масалан, температура ўзгарганда туташган қисмларнинг иссиқликдан кенгайиш коэффициентлари ҳар хил бўлишидан контакт механик равишда бузилади ёки яримўтказгич кристали қовжираб кетиши мумкин. Электродларнинг ички чиқиқлари баъзан куйиб қолиши мумкин.

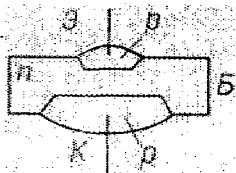
Кўпинча асбобдан нотўғри фойдаланиш ҳалокатли ишдан чиқишга олиб келади. Масалан, диодни схеманинг қизийдиган элементлари яқинига жойланса, диодни атроф билан иссиқлик алмаша олмайдиган қилиб маҳкамланса ҳам диод қизиб кетади.

Шартли ишдан чиқишларнинг сабаби яримўтказгич кристали сиртида ва ҳажмида юз бериб турадиган баъзи физик ва механик жараёнлар бўлади. Яримўтказгич сирти барқарорлигини бузувчи сабаб намлик бўлиб, уни бартараф қилиш учун асбоб корпусига намни ютувчи модда жойланади. Аммо, изоляторларда микродарзлар бўлса, кўп вақт давомида диод корпуси ичига диод сифатини бузадиган анча нам кириб олиши мумкин.

Ишдан чиқишларнинг яна кўп сабаблари мавжуд ва асбоблар тайёрлашда уларнинг олдини олиш чоралари ўрганиб борилади.

21.4. ТРАНЗИСТОРЛАРНИ ОЛИШ ТЕХНОЛОГИЯСИ

Қотишмали транзисторлар. Транзистор техникасининг



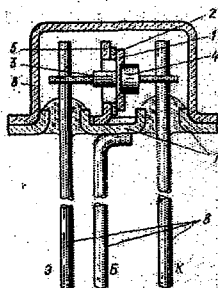
III.65-расм. Қотишмали транзистор тузилмаси.

бошланғич ривожланиш даврида транзисторларни фақат германийга киришмаларни қотишма усулида киритиб олганлар. Иккита бир-бирига яқин жойлашган $p-n$ -ўтишли транзистор тузилма III.65-расмда кўрсатилган. Қотишмали транзисторларнинг кенг тарқалган конструкциялардан бири III.66-расмда кўрсатилган.

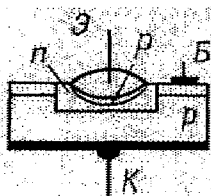
Қотишмали транзисторларда жуда юпқа база олиш қийин, шунинг учун улар паст ва ўрта такрорийликлар учун мўлжалланган. Уларни қувватли қилиб ҳам тайёрлаш мумкин. Бундай транзисторлар олиш учун p - n -ўтишлар юқори майдонга, коллектор чиққич эса корпусга уланган бўлади. Корпус асоси мис пластинкадан қилинади. Қотишмали транзисторларнинг камчилигига чегара такрорийлигининг ($f_a \leq 20 \text{ МГц}$) унча катта эмаслиги ва технологик тайёрлашда параметрларда анча катта фарқлар мавжудлигини кўрсатиш мумкин.

Қотишма бўлаги таглик пластинкага ўрнатилади ва қиздирилади. Қотишмани суолтириш натижасида эмиттер ўтиш ҳосил бўлади. Бироқ юқори температураларда бир вақтнинг ўзида суюлиш билан бирга кристалл ичидаги суюлмадан киришмалар диффузияси рўй беради. Донор ва акцептор киришмалар кристалл қалинлиги бўйича нотекис тақсимланади, чунки бу киришмалар ҳар хил чуқурликка диффузияланади (масалан, сурма диффузияси индийга нисбатан тез). Натижада, кристаллдан нотекис тақсимланган киришмали n -турдаги диффузион қатлам ҳосил бўлади. Коллектор вазифасини таглик пластинка p -турдаги германий бажаради (III.67-расм).

База соҳа орқали асосий бўлмаган зарядларнинг кўчиши, асосан, электр майдон дрейфи билан амалга оширилгани учун, бундай транзисторларни дрейф транзисторлари дейилади. Дрейф транзисторларнинг база қалинлиги 0,5—1 мкм. Шунинг учун ҳам, ишчи такрорийлик 500-1000 МГц етади. Бу транзисторларнинг камчилиги эмиттерда тескари кучланишнинг кичиклиги ҳамда юқори кучланиш ва катта қувватли транзисторларни ишлаб чиқаришни қийинлиги.



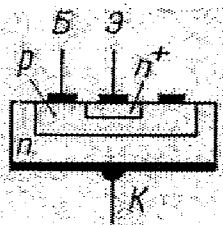
III.66-расм. 1-Ge кристалл; 2-кристалл ушлагич; 3-эмиттер электроди; 4-коллектор электроди; 5-база ҳалқа; 6-корпус; 7-таглик; 8-чиққич; 9-асоси.



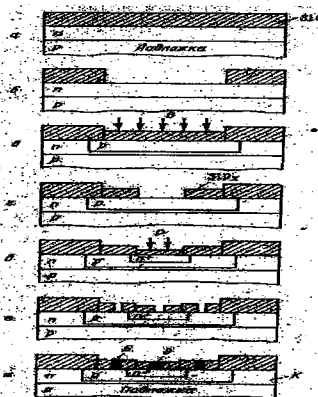
III.67-расм. Қотишма-диффузион транзистор тузилмаси.

Диффузион-планар транзисторлар. Бу кўринишдаги транзисторларни тайёрлаш кремний оксидини олиб унда очилган парда тирқишлар орқали киришма атомларининг диффузия усулидан фойдаланилади. Технологик амаллар кетма-кетлиги III.68-расмда кўрсатилган. Планар транзисторни тайёрлаш учун n -турдаги кремний олиниб ниҳоясида коллектор вазифасини ўтайдиган пластинка олдин сув буғи ёки кислород муҳитига жойлаштирилиб сиртида зич парда SiO_2 ҳосил қилинади (III.68, а-расм). Фотолитография усулида парда тирқиш (III.68, б-расм) ҳосил қилиниб, у орқали акцептор-бор диффузия қилинади (III.68, в-расм). Бунда пластинкада p -тур база қатлами ҳосил бўлади. Шу вақтнинг ўзида оксидланиш юз беради. Ҳосил бўлган оксид пардадан яна тирқиш (III.68, г-расм) очилиб, у орқали донор-фосфор камроқ чуқурликка диффузия қилинади. Натижада n^+ -турдаги эмиттер қатлам ҳосил бўлади (III.68, д-расм).

Кейин яна ҳосил бўлган SiO_2 қатлам едирилиб (III.68, е-расм), тирқишга алюминий контактлар пуркалади ва термобосим усулида чиққичлар уланади (III.68, ж-расм). Диффузион-планар транзистор тузилмасининг умумий кўриниши III.69-расмда кўрсатилган.

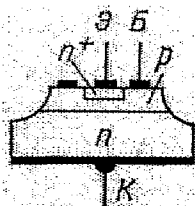


III.69-расм. Диффузион-планар транзистор тузилмасининг умумий кўриниши.



III.68-расм. Диффузион-планар транзисторнинг олиниши.

Меза-планар транзисторлар. Транзисторларнинг актив қисмини меза-тузилма кўринишда яратиш учун эмиттер ва базанинг маълум қисмларини иккилама едириш билан олинади (III.70-расм). Бу транзисторларни битта яримўтказгич пластинкада бир технологик циклда кўплаб миқдорда тайёрлаш мумкин, шунинг учун параметрларида фарқлар кам.

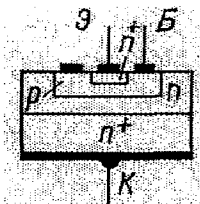


III.70-расм. Меза-планар транзистор тузилиши.

Меза-планар транзисторлардаги ўтишлар кичик сифимга ва унча катта бўлмаган база қаршилигига эга. Бу транзисторларнинг чегара такрорийлиги бир қанча юз мегагерцга боради.

Эпитаксиал-планар транзисторлар.

Бундай транзисторларда коллектор икки қатлам: юқори омли базага туташувчи ва кичик омли контактга туташувчи бўлади. Транзисторларда кичик омли электрон ўтказувчанлиги монокристалл таглик яримўтказгичга юқори омли эпитаксиал қатлам ўстириш билан олинади. Кичик омли таглик n^+ коллектор соҳасини ҳосил қилади. База ва эмиттер соҳалар SiO_2 ларда тирқиш орқали иккилама диффузия усулида тайёрланади. Натижада, n^+-p-n^+ ҳажмий қаршилиги кичик эпитаксиал коллектор, коллектор соҳасининг кичик S сифими ва коллектор ўтиши етарли даражада юқори тешилиш кучланишга эга бўлган дрейф транзистор олинади (III.71-расм).

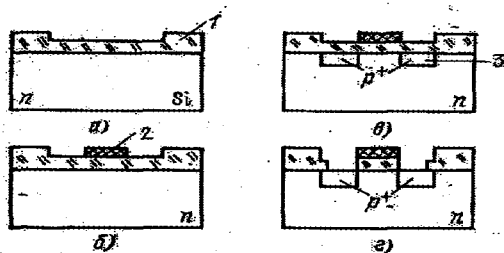


III.71-расм. Эпитаксиал-планар транзистор тузилиши.

Ҳозирги вақтда ишлаб чиқаришда асосан қўш қутбلى транзисторларни меза-планар ва эпитаксиал-планар технологик усулларида фойдаланилмоқда. Микроэлектроникада транзистор тузилмаларини олишнинг охириги технологияси кенг қўлланилмоқда.

МДЯ-транзисторлар. Бундай транзисторларни олиш учун таглик n -турдаги кремний сиртига қалин SiO_2 ўстирилади, кейин алоҳида қисмлардан оксид кетқазилиб, ўрнига яна юпқа SiO_2 қатлам ўстирилади (III.72, а-расм). Шу юпқа SiO_2 сиртига поликристалл кремний парда ўтқазилади ва фотолито-графия олиб борилади (III.72, б-расм). Кейин пайнов ва манба соҳалари устидаги оксид едирилиб тирқишлар ҳосил қилинади. Кейинги босқичда манба ва пайнов соҳалар диффузия усулида легирланади (III.72, в-расм). Юқори температурада ўтқазилган диффузия натижасида манба ва пайнов сирти оксидланиб қолади. Шунинг учун охириги амалда оксид қатлам едирилиб (III.72, г-расм) металл электродлар ўтқазилади.

Затвор сифатида поликристалл кремнийнинг қўлланили-



III.72-расм. МДЯ транзисторнинг олиниш технологияси: 1-SiO₂-қатлам; 2-поликремний; 3-легиранган пайнов ва манба соҳалар.

ши чегара кучланишини 0,5-1,0 В гача камайтиради. Бу эса ИМСларда катта афзалликларни келтиради.

21.5. ИНТЕГРАЛ МИКРОСХЕМАЛАР ОЛИШ ТЕХНОЛОГИЯСИ

Электроника — электронлар ва бошқа заррачаларнинг турли муҳитда (вакуумда, газда, қаттиқ жисмда), шунингдек, атомлар, молекулалар, кристалл панжаралари ичида электромагнит майдонлар билан ўзаро таъсирини ўрганадиган фан соҳасидир. Унинг амалий вазифалари мазкур ўзаро таъсирдан фойдаланиб, электромагнитик энергияни бошқа энергия турларига айлантирадиган ва аксинча иш бажарадиган электрон асбоблар яратиш усулларини, электрон асбоблар ишлаб чиқариш технологиясининг илмий асосларини ишлаб чиқишдир.

XX аср бошида пайдо бўлган электроника бир неча тараққиёт босқичларини босиб ўтди, бу жараёнда унинг элемент базасининг бир неча авлоди ўзгарди: электровакуум асбобларнинг дискрет электроникаси, яримўтказгичли асбобларнинг дискрет электроникаси, микросхемалар интеграл электроникаси (микроэлектроника), функционал микроэлектрон схемаларнинг интеграл электроникаси (функционал микроэлектроника).

Биз қуйида микроэлектроника ҳақида қисқача маълумот берамиз.

Микроэлектроника электрониканинг илмий-техник йўналиши бўлиб, физик, кимёвий, схемотехник ва бошқа усуллар туркуми ёрдамида юқори даражада ишончли ва тежамли микроминиатюр электрон схемалар ва қурилмаларни тадқиқлаш, лойиҳалаш, ишлаб чиқариш муаммоларини қамраб олади.

Микроэлектрониканинг биринчи масаласи — энг ишончли электрон схемалар ва қурилмалар яратишдир. Бу масала электрон аппаратурани тайёрлашнинг сифатли энг янги усулларида фойдаланиб ечилади, электрон аппаратуранинг дискрет элементларидан фойдаланишдан воз кечиб, интеграл микросхемалар яратиш йўлидан борилади. Бунда электрон схеманинг актив элементлари (резисторлар, конденсаторлар) ва уловчи элементлари яримўтказгич кристаллининг сиртида ёки ҳажмида, ёинки диэлектрик тағлик сиртида ягона технологик даража (циклда) шакллантирилади. Схема ичидаги улушларнинг энг кам бўлишлиги мазкур қурилмаларнинг ишончилилик даражасини оширади.

Микроэлектрониканинг иккинчи масаласи — электрон схемалар ва қурилмалар нархини пасайтиришдир. Интеграл микросхемалар технологияси амаллари кетма-кет олиб борилганда баъзи кераксиз амаллар қолдирилади, схема-лар такомилланиб қурилмалар нархини камайтиради.

Мазкур икки масаланинг ечими билан биргаликда электрон асбобларнинг массаси ва ҳажми кескин камаяди.

Интеграл микросхема (микросхема) микроэлектрон маҳсулот бўлиб, электромагнитик ва б. сигнални ўзгартириш, унга ишлов бериш ёки ахборотни жамғариш вазифаларини бажаради, унда бир бутун сифатида электрик равишда уланган элементлар юқори даражада зич таҳланган бўлади.

Интеграл микросхема қисқача ИМ ёки ИМС кўринишида белгиланади.

ИМнинг таҳланиш зичлиги ундаги элементлар сонининг ҳажмига нисбатидир. ИМ даги элементлар сони интеграция даражасини аниқлайди.

10 тагача элементли ИМни биринчи, 10 тадан 100 тагача элементли ИМни иккинчи, 100 дан 1000 тагача элементли ИМни учинчи интеграция даражали дейилади. 1000дан ортиқ элементли ИМни катта интеграл схема

(КИС) дейилади. Бундан анча катта сондаги элемент-ларга эга бўлган ўта катта интеграл схемалар (ЎКИС) ҳам ишлаб чиқарилади.

21.5.1. ИНТЕГРАЛ МИКРОСХЕМАЛАРНИ ТАЙЁРЛАШ ТЕХНОЛОГИЯСИНИНГ АСОСИЙ БОСҚИЧЛАРИ

Ҳар қандай микросхемани ишлаб чиқаришда қуйидаги босқичлардан ўтишга тўғри келади: яримўтказгич пластиналарини ёки диэлектрик тагликни тайёрлаш ва тозалаш; йиғиш, синаш ва ўлчаш, охири амаллар. Агар микросхема корпусга жойланадиган бўлинса, йиғиш тайёргарлиги корпуслар деталлари (қисмлари) ва тугунларини тайёрлашдан иборат бўлади, агар ИМ ни корпуссиз қилинадиган бўлса, йиғишдан олдин жипсловчи таркиблар ва арматура (чиқиш рамкалари, тасмалар ва б.) тайёрланади.

Ҳар қандай ИМ чиқарилганда ҳам назорат амаллари бажарилади ва якуний синовлар ўтказилади. Ундан кейин бўяш, лакаш, маркаш, тахлаш амаллари бажарилади.

Пластиналар, тагликларни тайёрлаш. Яримўтказгич пластиналар ва диэлектрик тагликлар микросхемалар тузилмаларини тайёрлаш учун асосий тайёрлама бўлади. Ҳозирги вақтда саноатда кўпчилик яримўтказгичли микросхемаларни ишлаб чиқаришда кремний ишлатилади, чунки у бир қатор ўрганилган ва саноатда ўзлаштирилган германийга нисбатан бир қатор афзалликларга эгадир: кремнийнинг тақиқланган зонаси кенгроқ, бу эса ишлаш температуралари оралиғи каттароқ бўлишлигини, тескари тоқлар кичик бўлишлиғи ва температурага камроқ боғлиқ бўлишлигини, каттароқ қаршиликли резисторлар тайёрлаш имконини таъминлайди. Кремний асосидаги *p-n*-ўтишларнинг тешилиш кучланиши каттароқ ва тешилиш температураларда содир бўлади. Кремнийнинг зичлиги германийникидан тахминан 2 марта кам кремний асосидаги тузилмалар массаси нисбатан шунча марта кам бўлади.

Бошқа яримўтказгичларга нисбатан кремнийда дислокациялар ҳосил бўлишининг критик кучланиши анча каттаки, бу 150 мм гача бўлган диаметрли ва 100 кг ортиқ массали дислокациясиз монокристаллар ўстириш имкони-

ни беради. Яна бир фазилат кремний пластинкалари сиртида яхши диэлектрик ва ҳимоявий хоссали SiO_2 оксид пардаларини ўтқазиш осон.

Микросхемалар ишлаб чиқаришда галлий арсениди ва бошқа яримўтказгич бирикмалар ҳам қўлланади.

Микросхемалар параметрларига қўйиладиган талабларга мос равишда муайян маркали ва муайян кристаллографик йўналишли яримўтказгич танланади. Гибрид ва пардавий микросхемалар учун шиша, ситал, фотоситал, керамик тагликлар қўлланилади. Кейинги вақтларда полимер тагликлар, диэлектрик қатламли металл тагликлар ($\text{Al-Al}_2\text{O}_3$), сапирнинг монокристалл диэлектрик тагликлари қўлланилмоқда.

Олдинги бобларда баён қилинганидек, пластиналар ва тагликларга механик ишлов берилади ва улар кераксиз киришмалардан тозаланади, бунда зарурий кимёвий ишлов ҳам бажарилади. Тузилмалар олишдан олдин қуруқ тозалаш амалга оширилади.

Тузилмалар тайёрлаш. Бу босқичда пластинкалар ва тагликларнинг горизонтал текислигида керакли шаклдаги, ўлчамдаги, тайинли ўзаро жойлашиши ва вертикал текисликда кераклича қалинликдаги, киришмалар кириши чуқурлигига эга бўлган элементлар (микросхема қисмлари) ҳосил қилинади. Тузилмалар тайёрлашнинг барча усуллари учта гуруҳга бўлиниши мумкин: 1) топология (қиёфа)ни шакллантириш усуллари; 2) пардалар ҳосил қилиш усуллари; 3) пластиналарни легирлаш ва яримўтказгич қатламлар ўтқазиш усуллари. Микросхемалар тузилмалари фақат гуруҳий усулда тайёрланади. Пластиналар ёки тагликлар гуруҳи бир вақтда ишловга дучор қилинади ва уларнинг ҳар бирида битта эмас, балки кўп тузилмалар шакллантирилади. Тузилмалар ҳосил қилиш усуллари олдинги бобларда батафсил кўрилган эди.

Микросхемаларни йиғиш. Йиғиш деганда қисмлар ва тугунларни улаш жараёни тушунилади, унинг оқибатида тайёр маҳсулот (буюм) олинади. Корпусли ИМларни йиғиш учун тузилмаларни тайёрлаш билан бир вақтда корпусларнинг қисмлари ва тугунлари, корпуссиз ИМларни йиғиш учун эса жипсловчи таркиблар ва тузилмалар қисмларининг уловчи арматура тайёрланади. ИМларни йиғиш қуйидаги амаллардан иборат: тузилмалар корпуслар асосларига, чиқиш рамка-

ларига ёки қўшимча тагликларга ўрнатилади; осма кристаллар, таркибловчилар тахталар (платалар)га ўрнатилади; электродлар учлари контактловчи юзачалар ва ИМнинг ташқи учларига уланади, жипслаш амалга оширилади.

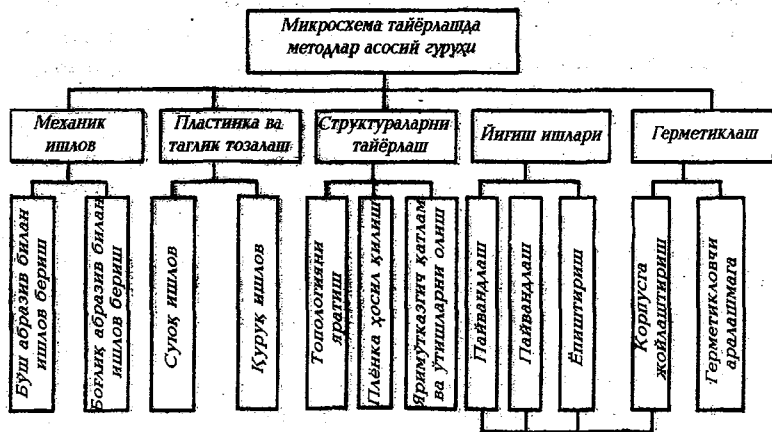
Синовлар ва ўлчашлар. Жипслаш (герметизация)дан кейин яширин нуқсонларга эга бўлган ИМларни аниқлаш учун технологик синовлар ва ўлчашлар бажарилади. Технологик синовлар иқлимий, механик ва электрик синовларга бўлинади. Иқлимий синовларда ИМнинг намликка, иссиқликка, совуққа чидамлилиги текширилади. Механик синовларда тузилманинг ва ИМ ичидаги уланмаларнинг механик мустаҳкамлиги текширилади. Электрик синовларда эса ток ўтказиши ва ИМнинг барқарор ишлай олиши текширилади, шунингдек, ИМ параметрлари ўлчанади.

Охирги амаллар. Охирги амалларга бўёқ бериш, лаклаш, гальваник қопламалар қилиш, маркалаш, ИМни аппаратурага улайдиган чиққишлар қилиш ва ниҳоят, тахлаш ишлари киради.

Энди баъзи масалаларга тўхталиб ўтамиз.

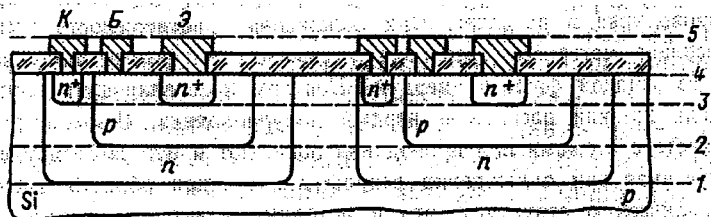
ИМларни тайёрлаш усулларининг асосий гуруҳлари III.73-расмда кўрсатилган.

Микросхемалар элементлари бирин-кетин кўп марта маҳаллий ишлов бериш оқибатида олинадиган технологик қатламлар тарзида ҳосил қилинади. Масалан, III.74-расмда тас-



III.73-расм. ИМ ларни тайёрлаш усулларининг асосий гуруҳлари.

вирланган қўш қутбли транзисторлар асосида тайёрланадиган яримўтказгичли ИМ ҳолида маҳаллий ишлов беш марта амалга оширилган.



III.74-расм. Қўш қутбли транзистор асосидаги ИМ тузилмаси кесмининг қисми: 1- биринчи технологик қатлам- яккаловчи ўтишларни ҳосил қилиш; 2- иккинчи қатлам-база — коллектор ўтишларни ҳосил қилиш; 3- учинчи қатлам - эмиттер — база ва контакт яқинида p^+ -соҳаларни ҳосил қилиш; 4- тўртинчи технологик қатлам- металл қатлам ўтқазуш; 5- бешинчи қатлам-контактлар топологияси, ток келтирувчи йўллар, контакт майдончалар ҳосил қилиш.

Бундай технологияда ҳар бир кейинги қатлам олдингисига аниқ мос тушиши зарур.

21.5.2. ИНТЕГРАЛ МИКРОСХЕМАЛАР ТУРЛАРИ

Интеграл микросхемаларни тайёрлаш технологияси, қандай вазифаларни бажариши ва бошқа белгилари бўйича турли синфларга бўлинади.

Тузилиш — технологик белги бўйича яримўтказгичли, гибрид ИМ лар фарқ қилинади.

Яримўтказгичли ИМ — бу барча элементлари ва элементлараро уланмалари яримўтказгич ҳажми ва сиртида ҳосил қилинган интеграл микросхемадир.

Гибрид ИМ — бу бир қисми муайян яримўтказгич технологияда бажарилиб, сўнг пардавий технология бўйича тайёрланган микросхеманинг умумий тағлигига жойлаштирилдиган интеграл микросхемадир.

Яна мослаштириб жойланган интеграл схемалар ҳам мавжуд, уларда баъзи элементлар (одатда пассив элементлар) кристалл пластинаси сиртига пардавий технология усулида ўтқазилган.

Бажарадиган вазифалари бўйича аналогли ИМ, рақамли ИМ лар бўлади.

Аналогли ИМлар узлуксиз функция қонуни бўйича ўзгарувчи сигнални ўзгартиш ва ишлов бериш учун мўлжалланган интеграл микросхемадир.

Рақамли ИМ лар дискрет функция қонуни бўйича ўзгарувчи сигнални ўзгартириш ва ишлов бериш учун мўлжалланган интеграл микросхемадир. Рақамли ИМ лар дискрет ишлов бериш қурилмаларида (ЭХМ, автоматика тизимлари ва ҳ. к. да) қўлланилади.

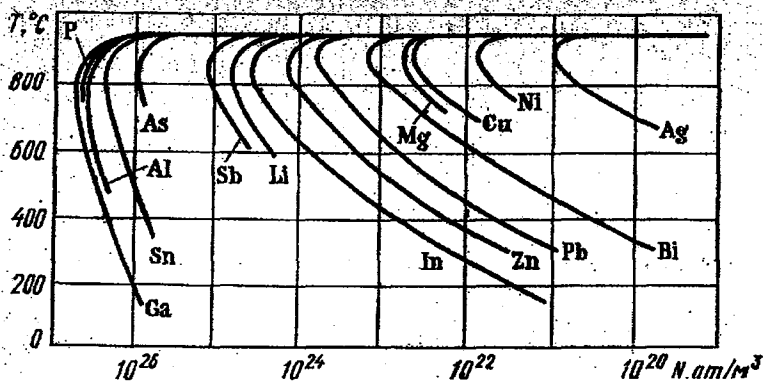
Микроэлектроника фан, техника ва технологиянинг энг тез ривожланаётган соҳасидир. Бу соҳа бўйича кўп тадқиқотлар, техник ва технологик ишланмалар мавжуд, бу йўналишда назарий ва тажрибавий изланишлар катта қўламда давом этапти. Микроэлектрониканинг тобора тараққий қилиб боришига шубҳа йўқ.

Микроэлектроника асосларини ҳатто қисқача баён қилиш учун бутун бир китоб ҳажми етишмайди. Шу боисдан ва ўқув қўлланма олдига қўйилган вазифаларни назарда тутиб, бу улкан соҳа ҳақида қисқача маълумот бериш билан чекланамиз.

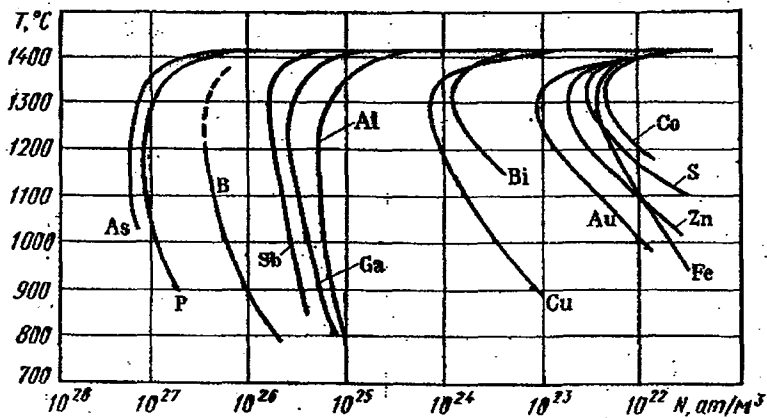
Назорат саволлари

1. Электрон-ковак ўтишлар олишнинг қандай технологик усуллари бор?
2. Эпитаксиал-планар ўтиш тузилмасини чизинг ва тушунтиринг.
3. Планар технологиянинг аҳамияти қандай?
4. Дiodлар қандай тайёрланади?
5. Дiodларнинг қандай хиллари бор?
6. Транзисторлар олишнинг қандай усуллари бор?
7. МДЯ-транзистор қандай тайёрланади?
8. Транзистор параметрларини яхшилашда эпитаксиянинг роли қандай?
9. Интеграл микросхема деб нимани тушунасиз?

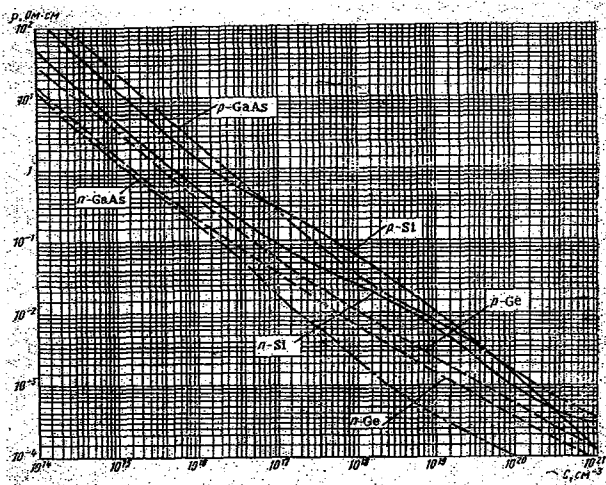
ҚҰШИМЧАЛАР



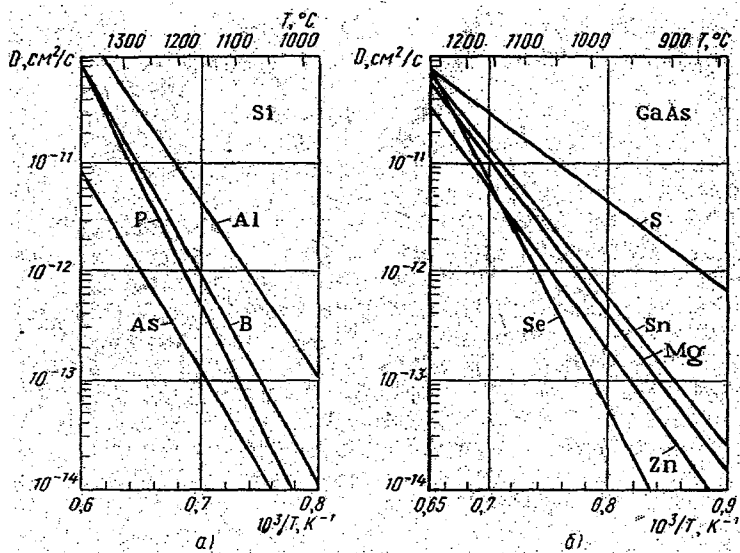
1-расм. Кремнийда киришмалар эрувчанлигининг температурага бoғлиқлиги.



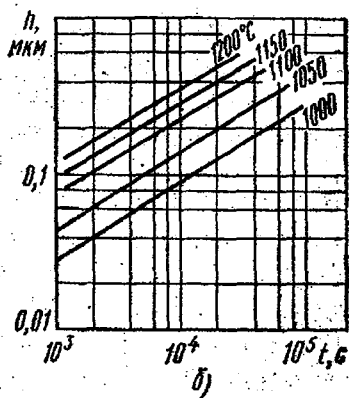
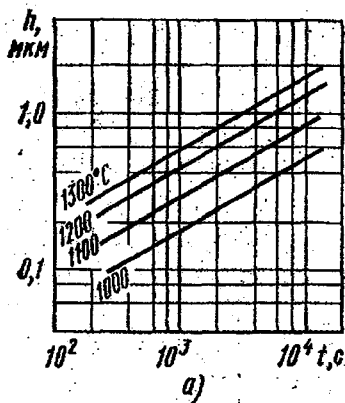
2-расм. Германийда киришмалар эрувчанлигининг температурага бoғлиқлиги.



3-расм. Si, Ge ва GaAs солиштира қаршиликларининг киришмалар концентрациясига боғлиқлиги.



4-расм. Кремнийда (а) ва галлий арсенидида (б) киришмалар диффузия коэффицентларининг температурага боғлиқлиги.



5-расм. Турли температураларда кремнийни ниқоблаш учун керакли бўлган SiO_2 оксиди қалинлигининг диффузия вақтига боғлиқлиги:
 а) фосфор диффузиясида; б) бор диффузиясида.

Яримўтказгичларнинг электрик хоссалари

Хоссаси	Кремний	Германий	Галлий арсениди	Галлий фосфиди
Тақиқланган зона кенлиги, эВда 0Кда	1,21	0,756	1,52	2,34
..... 300Кда	1,10	0,66	1,43	2,26
..... Тақиқланган зона кенлигини температура коэффициенти, 10^{-4} , эВ/К.....	4,1	-4,4	-5,0	-3,67
Хусусий солиштира қаршилиги, Ом·см 300К да ..	$2,5 \cdot 10^5$	47	$3,7 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^{16}$
Киришмасиз яримўтказгич за- ряд ташувчилар- нинг ҳаракат- чанлиги, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, 300да:				
электронлар	1450	3900	10500	300
коваклар	480	1900	425	100
Заряд ташувчи- ларнинг хусусий концентрацияси, см^{-3} , 300Кда	$1,45 \cdot 10^{12}$	$2 \cdot 10^{13}$	10^7	10^5
Киришмасиз яримўтказгичда заряд ташувчи- ларнинг ҳара- катчанлигининг температурага боғлиқлиги, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$:				
электронлар	$1300(T/300)^{-2}$	$4500(T/300)^{-1,6}$	$8500(T/300)^{-1}$	$110(T/300)^{-1,5}$
коваклар	$500(T/300)^{-2,7}$	$3500(T/300)^{-2,33}$	$420(T/300)^{-2,1}$	$75(T/300)^{-1,5}$

2-жадвал

Яримўтказгичларда кенг тарқалган киришмалар
электрик табиати

Ярим-ўтказгич	Нейтрал киришма	Донорлар	Акцепторлар	Чуқур сатҳ ҳосил қилувчи киришмалар
Кремний	H, N, C, Ge, Sn, Pb, Ar	P, As, Sb, Li	B, Al, Ga, In	Cu, Au, Zn, Mn, Fe, S, Ni
Германий	H, N, C, Ge, Sn, Pb, Ar	P, As, Sb, Li	B, Al, Ga, In	Cu, Ag, Au, Zn, Cd, Mn, Ni, Fe, S, Se, Te
Галлий арсениди	H, N, B, Al, In, P, Sb	Si, Sn, Te, S, Se	Zn, Cd, Be, Li	Cr, Fe, V, Ni, Mg, Au, Ge, Mn, Ag
Галлий фосфида	H, N, B, Al, In, As, Sb	Si, Sn, Te, S, Se	Be, Mg, Zn, Cd, C	Cu, O, Ge, Co, Fe, Cr, Mn

3-жадвал

Баъзи бир элементларнинг эриш ва буғланиш температураси

Элемент	Атом массаси	T _{эриш} °C	T _{буғ} °C	Тавсия қилинган буғлатгич моддалар	
				Сим, лента	Тигел
Ag	107,9	961	1047	Mo, Ta	Mo, C
Al	27	660	1150	W	C, BN, TiB ₂ -BN
Au	197	1063	1465	W, Mo	Mo, C
Bi	209	271	698	W, Mo, Ta, Ni	Металлар, оксидлар
Cd	112,4	321	264	W, Mo, Ta, Ni, Fe	Металлар, оксидлар
Co	58,9	1490	1650	WW, Ta	Al ₂ O ₃ , BeO
Cr	52	1800	1205	W, Mo, Ta	-
Cu	63,5	1083	1273	W, Mo, Ta	Mo, C, Al ₂ O ₃
Ge	72,6	959	1251	W, Mo, Ta, Ni	W, C, Al ₂ O ₃
Mg	24,3	651	443	W, Mo, Ta	Fe, C
Mn	54,9	1244	980	-	Al ₂ O ₃
Mo*	95,9	2622	2533	W	-
Ni	58,7	1455	1510	W	Оксидлар
Pd	106,4	1555	1566	-	Al ₂ O ₃
Pt	195	1774	2090	W	ThO ₂ , ZrO ₂
Sb	121,8	630	678	-	Металлар, оксидлар
Si	28	1415	1342	Mo, Ta, Ni	BeO, ZrO ₂ , ThO ₂
Ta*	181	2996	3070	-	-
Ti	47,9	1725	1546	CW, Ta	C, ThO ₂
W*	183,9	3382	3309	-	-
Zn	65,4	419	343	W, Ta, Ni	Fe, Al ₂ O ₃ , C, Mo

4-жадвал

**Поликристаллик кремний пардаларида актив киришмалар
диффузияси параметрлари**

Элемент	Диффузия доимийси D_0 , см ² /с	Киришма фаол энергияси ΔE , эВ	Диффузия коэффициенти D , см ² /с	Температура- T , °C
As	$8.6 \cdot 10^4$	3.9	$2.4 \cdot 10^{-14}$	800
As	0.63	3.2	$3.2 \cdot 10^{-14}$	950
B	$(1.5 \dots 6) \cdot 10^{-3}$	2.4...2.5	$9 \cdot 10^{-14}$	900
B			$4 \cdot 10^{-14}$	925
P	-	-	$6.9 \cdot 10^{-13}$	1000
P	-	-	$7 \cdot 10^{-13}$	1000

5-жадвал

**Электрод қотишма учун қўлланиладиган баъзи
бир элементлар**

Элемент	Эриш температураси T , °C	Бугланиш температураси T , °C	Зичлиги d , г/см ³	ИКК $\cdot 10^6$, 1/K
Al	659.7	996	2.7	23.8
Ag	961.0	1047	10.5	18.7
As	817.0	280	5.7	3.8
Au	1063.0	1465	19.3	14.2
B	2300.0	1365	2.5	8.0
Bi	271.3	698	9.8	14.0
Ga	29.7	1093	5.9	18.0
Ge	936.0	1251	5.4	5.3
In	156.4	952	7.3	33.0
Mo	2620	2533	10.2	5.1
Ni	1455	1510	8.9	13.0
Pt	1773.5	2090	21.4	9.0
Pb	327.4	718	11.3	29.5
Si	1420.0	1343	2.32	4.2
Sb	630.5	678	6.6	10.9
Sn	231.9	1189	7.3	26.7
W	3370.0	3310	19.3	4.5
Zn	419.4	343	7.1	26.3

АДАБИЁТЛАР

1. Зайнобидинов С., Тешабоев А. Яримўтказгичлар физикаси. Т.: «Ўқитувчи» 1999.
2. Тешабоев А., Зайнобидинов С., Эрматов Ш. Қаттиқ жисм физикаси. Т.: «Молия», 2001.
3. Тешабоев А. ва бошқалар. Яримўтказгичли асбоблар физикаси. Андижон: «Ҳаёт», 2002.
4. Болтакс Б. И. Диффузия в полупроводниках. М.: «Физматгиз», 1961.
5. Верховский Е.И. Лазерная технология в производстве интегральных микросхем. М.: «Высшая школа», 1990.
6. Курносов А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. М.: «Высшая школа», 1986.
7. Малышева И.А. Технология производства интегральных микросхем. М.: «Радио и связь», 1991.
8. Мильвидский М.Г. Полупроводниковые материалы в современной электронике. М.: «Наука», 1986.
9. Нашельский А.Я. Производство полупроводниковых материалов. М.: «Металлургия», 1982.
10. Парфенов О.Д. Технология микросхем. М.: «Высшая школа», 1986.
11. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы. М.: «Высшая школа», 1987.
12. Пичугин И.Г., Таиров Ю.М. Технология полупроводниковых приборов. М.: «Высшая школа», 1984.
13. Плазменная технология в производстве СБИС. Под ред. Н. Айнспрука, Д. Брауна. М.: «Мир», 1987.
14. Таиров Ю.М., Цветков В.Ф. Технология полупроводниковых и диэлектрических материалов. М.: «Высшая школа», 1990.
15. Фистуль В.И. Новые материалы. М.: «МИСИС», 1995.
16. Фистуль В.И. Физика и химия твердого тела. Ч. 1. М.: «Металлургия», 1995.
17. Фистуль В.И. Физика и химия твердого тела. Ч.2. М.: «Металлургия», 1995.

МУНДАРИЖА

Муқаддима.....	3
----------------	---

БИРИНЧИ ҚИСМ ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ҲАҚИДА УМУМИЙ МАЪЛУМОТ

1-БОБ. Қаттиқ жисмлар физикасининг асосий тушунчалари

1.1. Кириш.....	5
1.2. Кристаллик ва аморф қаттиқ жисмлар.....	6
1.3. Миллер индекслари.....	7
1.4. Олмос ва сфалерит тузилмалари.....	9
1.5. Металлар. Яримўтказгичлар. Диэлектриклар.....	9
1.6. Кристаллик яримўтказгичларда нуқсонлар.....	12

2-БОБ. Яримўтказгичларда киришмалар

2.1. Ўринбосар ва суқилиш қаттиқ эритмалар.....	25
2.2. Диффузия усули билан киришмалар киритиш.....	26
2.3. Ионлар киритиш усули.....	27
2.4. Эпитаксия усули.....	28
2.5. Трансмутацион легирлаш усули.....	30
2.6. Киришмаларнинг энергия сатҳлари.....	31

3-БОБ. Яримўтказгичларда диффузия ҳодисалари

3.1. Кириш. Диффузия тенгламаси.....	36
3.2. Суқилиш қаттиқ эритмаларида диффузия ҳодисаси.....	38
3.3. Ўринбосар қаттиқ эритмаларда диффузия ҳодисаси.....	39
3.4. Кремнийда диффузия ҳодисалари.....	40
3.4.1. Кремнийда донор ва акцептор киришмалар диффузияси.....	40
3.4.2. Газларнинг кремнийга кириши, эриши ва диффузияси.....	42
3.5. Яримўтказгичларда киришмалар эрувчанлиги.....	44
3.6. Сегрегация коэффиценти.....	47

4-БОБ. Энг муҳим яримўтказгичлар хоссалари	
4.1. Кремний (Si).....	51
4.2. Германий (Ge).....	52
4.3. Галлий фосфида (GaP).....	53
4.4. Галлий арсенида (GaAs).....	54
4.5. Индий фосфида (InP).....	55
4.6. Индий арсенида (InAs).....	55
4.7. Индий антимонида (InSb).....	56

ИККИНЧИ ҚИСМ

ЯРИМЎТКАЗГИЧ МОДДАЛАР ОЛИШ ТЕХНОЛОГИЯСИ

Кириш.....	57
------------	----

5-БОБ. Электрон техникаси моддалари технологияси асосий жараёнлари умумий тавсифи

5.1. Технологик жараён. Асосий тушунчалар.....	57
5.2. Гетероген кимёвий-технологик тизимларнинг асосий жараёнлари.....	59
5.3. Ҳолатлар (фазалар) диаграммалари.....	62
5.4. Газ фазаси орқали ҳайдаш жараёнлари.....	67
5.5. Моддаларни ажратиш ва тозалашнинг бошқа жараёнлари.....	75
5.6. Марказдан қочирма майдонда ажратиш ва тозалаш.....	77

6-БОБ. Кристаллар ўсиши кинетикаси

6.1. Кристалланиш марказлари ҳосил бўлиши.....	79
6.2. Кристаллар ўсиши механизмлари ва кинетикаси.....	86
6.3. Кристаллар ўсишининг сиртий кинетикаси.....	88
6.4. Кристаллар ўсишида кўчиш жараёнлари.....	90

7-БОБ. Яримўтказгичлар ишлаб чиқаришда фойдаланиладиган моддалар

7.1. Тоza модда тушунчаси. Тоza моддалар билан муомала қилиш қоидалари.....	93
7.2. Асосий ва ёрдамчи моддалар.....	94
7.3. Контейнер моддалари.....	99
7.4. Реагентлар.....	103
7.5. Газлар.....	105

8-БОБ. Поликристаллик ва аморф яримўтказгичлар технологияси

8.1. Поликристалларни синтез қилиш.....	111
8.2. Ажратиш жараёнлари.....	115
8.3. Тиклаш жараёнлари.....	123
8.4. Поликристаллик яримўтказгичлар олиш.....	125
8.4.1. Трихлорсиланни тиклаш усулида поликристаллик кремний олиш.....	125
8.4.2. Моносиландан кремний поликристалларини олиш.....	129
8.4.3. Германий поликристалларини олиш.....	131
8.4.4. Галлий арсениди кристалларини олиш.....	134
8.4.5. Индий ва галлий фосфидларини олиш.....	136
8.5. Аморф яримўтказгичларнинг олиниши ва қўлланилиши.....	138

9-БОБ. Монокристаллар ўстириш технологияси асослари

9.1. Кристалларни қаттиқ фазадан ҳосил қилиш.....	145
9.2. Кристалларни суюқ фазадан ҳосил қилиш.....	146
9.2.1. Кристалларни суюлмалардан ҳосил қилиш.....	146
9.2.2. Суюлмаларнинг нормал йўналган кристалланиши усуллари.....	147
9.2.3. Суюлмалардан кристаллни тўртиб олиш усуллари.....	149
9.2.4. Зонавий суюлтириш усуллари.....	150
9.3. Кристалларни эритмалардан ўстириш.....	152
9.3.1. Температура градиентли зонавий суюлтириш усули.....	154
9.3.2. Кварц монокристалларини ўстириш.....	156
9.4. Кристалларни газсимон фазадан ўстириш.....	157
9.5. Керакли шаклдаги монокристалларни ўстириш.....	161

10-БОБ. Яримўтказгич монокристалларни ўстириш

10.1. Киришмалар ҳисоби.....	164
10.2. Компановка.....	165
10.2.1. Дастлабки хом ашёни майдалаш.....	165
10.2.2. Оралиқ технологик босқичлар.....	165
10.2.3. Кимёвий едириш.....	165
10.2.4. Бирикмалар синтези ҳисоби.....	166
10.2.5. Товар монокристалларини ўстириш компановкаси.....	167
10.3. Киришмалар текис тақсимланган монокристаллар олиш.....	167
10.3.1. Бир текис тақсимланишни (бир жинсликни) баҳолаш.....	167
10.3.2. Узунлик бўйича киришмалар бир текис (бир жинс) тақсимланган монокристалларни ўстириш усуллари.....	168

10.3.3. Кўндаланг кесими бўйича киришма бир текис (бир жинс) тақсимланган монокристалларни ўстириш усуллари.....	173
10.4. Мукамал тузилишли монокристаллар ўстириш.....	177
10.4.1. Чохральский усулида монокристаллар ўстириш.....	177
10.4.2. Суюқлик герметизация усули.....	182
10.4.3. Тигелсиз зонавий суюлтириш усули.....	184
10.4.4. Брижмен горизонтал усули.....	186
10.5. Юқори даражада тоза монокристаллар ўстириш.....	188
10.5.1. Элементар (Ge,Si,Te,Se) яримўтказгичларда кислород.....	188
10.5.2. Элементлар (Ge,Si,Te,Se) яримўтказгичларда углерод.....	190
10.5.3. Яримўтказгич бирикмаларда кремний.....	191
10.5.4. Яримўтказгич бирикмаларда кислород.....	192
10.6. Яримўтказгичларнинг лазер технологияси.....	193
10.6.1. Сиртни тозалаш ва рельефини яхшилаш.....	194
10.6.2. Киришмалар киритиш ва уларни қайта тақсимлаш усуллари.....	195
10.6.3. Нуқсонларни куйдириш.....	195
10.6.4. Киришмаларни геттерлаш.....	197
10.6.5. Поликристаллик кремний қаршилигининг ўзгариши.....	197
10.6.6. Аморф ва поликристаллик қатламларнинг қайта кри- сталланиши.....	198
10.6.7. Поликристаллик кремний тасмаларини кристаллаш.....	199
10.6.8. «Диэлектрик устида кремний» қатламини қайта кристаллаш.....	199
10.6.9. Едириш.....	200

УЧИНЧИ ҚИСМ

ЯРИМЎТКАЗГИЧЛИ АСБОБЛАР ТАЙЁРЛАШ ТЕХНОЛОГИЯСИ

11-БОБ. Яримўтказгич материалларга механик ишлов бериш	
11.1. Умумий маълумотлар.....	202
11.2. Пластика ва кристалларга қўйиладиган талаблар.....	202
11.3. Монокристалларни йўналтириш усуллари.....	203
11.4. Қўйма монокристалларни пластинка ва кристалларга ке- сиш усуллари.....	206
11.5. Пластикаларни текислаш ва силлиқлаш.....	210
11.6. Механик ишловдан сўнг пластинкалар ва кристаллар сифатини назорат қилиш.....	212

12-БОБ. Яримўтказгич пластинкалар ва кристалларга кимёвий ва электрокимёвий ишлов бериш

12.1. Умумий маълумотлар.....	214
12.2. Яримўтказгич пластинкаларни органик эритмаларда тозалаб ювиш.....	215
12.3. Кислоталарда юиб тозалаш.....	217
12.4. Сув билан юиб тозалаш.....	217
12.5. Едириш.....	220
12.6. Яримўтказгич пластинка ва кристалларни едириш усуллари.....	224
12.7. Сиртта электрокимёвий ишлов бериш.....	226
12.8. Буг- газли едириш.....	228
12.9. Тагликларга ион-плазма ишлов бериш.....	230
12.10. Тагликларга плазма-кимёвий ишлов бериш.....	232
12.11. Гальваник қопламаларни ўтқазиш.....	234
12.12. Термик ишлов бериш (қуйдириш).....	237

13-БОБ. Қотишмали усулда тузилмалар олиш

13.1. Умумий маълумотлар.....	238
13.2. Қотишмали p-n-ўтишнинг ҳосил бўлишининг физик-металлургик асослари.....	238
13.3. Электрон-ковак ўтишнинг ҳосил бўлиши ва унинг геометрияси.....	239
13.4. Электрод материалларга талаблар.....	241
13.5. Қотишмали тузилмаларнинг сифатини назорат қилиш.....	242

14-БОБ. Эпитаксиал ўстириш усулида тузилмалар олиш

14.1. Умумий маълумотлар.....	244
14.2. Эпитаксиал ўтқазишнинг асосий усуллари.....	245
14.3. Кремний ва германий эпитаксияси.....	249
14.4. Эпитаксиал қатламларни олиш қурилмалари.....	252
14.5. Эпитаксиал тузилмаларни легирлаш.....	255
14.6. A ^{III} B ^V турдаги яримўтказгич бирикмалар эпитаксиясининг технологик хусусиятлари.....	257

15-БОБ. Диффузия усулида тузилмалар олиш

15.1. Умумий маълумотлар.....	268
15.2. Диффузияда киришмалар тақсимооти.....	269
15.3. Планар технологияда диффузия.....	272
15.4. Диффузион тузилмаларни ҳисоблаш усуллари.....	274

15.5. Диффузион тузилмалар параметрларини назорат қилиш.....	282
16-БОБ. Ионлар киритиб легирлаш усулида тузилмалар олиш	
16.1. Умумий маълумотлар.....	285
16.2. Ионлар киритилган тузилмаларни ҳисоблаш усуллари.....	286
16.3. Яримўтказгичли асбоблар технологиясида ион легирлаш жараёнларидан фойдаланиш	291
17-БОБ. Планар технологияда ҳимоявий диэлектрик пардалар	
17. 1. Умумий маълумотлар.....	294
17. 2. Кремнийни термик оксидлаш кинетикаси.....	294
17. 3. Сув бўғида кремнийни термик оксидлаш.....	299
17.4. Куруқ кислородда кремнийни термик оксидлаш.....	301
17.5. Кремний оксид пардаларини пиролитик ўтказиш.....	302
17.6. Кремнийни анод оксидлаш.....	304
17.6. Кремнийни паст температурали ион –плазма оксидлаш.....	305
17. 8.Кремний нитриди қопламаларини олиш. Аралаш қопламалар.....	306
17.9. Ҳимоявий диэлектрик пардаларнинг сифатини назорат қилиш.....	308
18-БОБ. Фотолитография	
18. 1. Умумий маълумотлар.....	313
18. 2. Фоторезистлар.....	315
18. 3. Фотоандозалар.....	320
18.4. Контактли фотолитография.....	321
19-БОБ. Омик контактлар ва контакт тизимлар	
19.1. Умумий маълумотлар.....	330
19.2. Контакт материаллар ва контакт тизимларнинг кўринишлари.....	331
19.3. Омик контактлар ва контакт тизимларини вужудга келтириш усуллари.....	333
20-БОБ. Яримўтказгичли асбоблар сиртини мустаҳкамлаш ва ҳимоя қилиш	
20.1. Умумий маълумотлар.....	340
20.2. Асбобнинг электрик параметрларига р-п-ўтиш сирт ҳолати таъсири.....	340

20.3. Органик қопламалар ёрдамида сиртни ҳимоялаш	343
20.4. Кремний оксид ва нитридлар билан ҳимоялаш.....	345
20.5. Металл оксид пардалар билан ҳимоялаш.....	346
20.6. Шиша пардалар билан ҳимоялаш.....	348

21-БОБ. Яримўтказгичли асбоблар тайёрлаш технологияси

21.1. Умумий маълумотлар.....	351
21.2. Электрон-ковак ўтишларни тайёрлаш технологияси.....	353
21.3. Диодлар олиш технологияси.....	358
21.3.1. Паст частотали тўғриловчи диодлар.....	358
21.3.2. Импульсда ишлайдиган диодлар.....	360
21.3.3. Шоттки диодлари.....	360
21.3.4. Ўта юқори частотага мўлжалланган диодлар.....	361
21.3.5. Стабилитронлар.....	363
21.3.6. Стабисторлар.....	364
21.3.7. Туннел диодлар.....	364
21.3.8. Варикаплар.....	365
21.3.9. Диодларнинг ишончлилиги.....	365
21.4. Транзисторларни олиш технологияси.....	366
21.5. Интеграл микросхемалар олиш технологияси.....	370
21.5.1. Интеграл микросхемаларни тайёрлаш технологияси- нинг асосий босқичлари.....	372
21.5.2. Интеграл микросхемалар турлари.....	375
Қўшимчалар.....	377
Адабиётлар.....	383

МУЛОҲАЗАЛАР УЧУН

ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ
ЎЗБЕК ТИЛ ШАҒУЛЛАШТИРИШ
ЎҚИТТИРИШ ИЛМИЙ-УСОДДА

ЎЗБЕК ТИЛ ШАҒУЛЛАШТИРИШ

ЎЗБЕК ТИЛ ШАҒУЛЛАШТИРИШ

ЎЗБЕК ТИЛ ШАҒУЛЛАШТИРИШ
ЎЗБЕК ТИЛ ШАҒУЛЛАШТИРИШ
ЎЗБЕК ТИЛ ШАҒУЛЛАШТИРИШ

ЎЗБЕК ТИЛ ШАҒУЛЛАШТИРИШ

ЎЗБЕК ТИЛ ШАҒУЛЛАШТИРИШ

ЎЗБЕК ТИЛ ШАҒУЛЛАШТИРИШ
ЎЗБЕК ТИЛ ШАҒУЛЛАШТИРИШ
ЎЗБЕК ТИЛ ШАҒУЛЛАШТИРИШ

ЎЗБЕК ТИЛ ШАҒУЛЛАШТИРИШ
ЎЗБЕК ТИЛ ШАҒУЛЛАШТИРИШ
ЎЗБЕК ТИЛ ШАҒУЛЛАШТИРИШ

ЎЗБЕК ТИЛ ШАҒУЛЛАШТИРИШ
ЎЗБЕК ТИЛ ШАҒУЛЛАШТИРИШ
ЎЗБЕК ТИЛ ШАҒУЛЛАШТИРИШ

А.Тешабоев, С.Зайнобидинов, Э.А.Мусаев

**Яримўтказгичлар ва яримўтказгичли
асбоблар технологияси**

(Ўқув қўлланма)

Тошкент — 2005

Нашр учун масъул
Муҳаррир
Мусахҳиҳа
Компьютерда саҳифаловчи

*Н. Халилов
М. Миркомиллов
М. Ҳайитова
Ф. Шерова*

Босишга рухсат этилди 1.02.2005 й. Бичими 60x108¹/₃₂. Таймс
гарнитура. Шартли босма табоғи 25,0. Нашр табоғи 24,4.
1000 нусха. Нархи шартнома асосида. Буюртма 9.

“ЎАЖБНТ” Маркази, Тошкент, Пахтакор кўчаси, 3

Андоза нусхаси Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус
таълим вазирлигининг “ЎАЖБНТ” Маркази компьютер
бўлимида тайёрланди

«Хега-Принт» босмахонасида чоп этилди.
Тошкент ш., Сирғали тумани,
Спутник 17 мавзеси, 52А уй