



621.31

H-83

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

**М. Т. НОРМУРОДОВ, Б. Е. УМИРЗОҚОВ,
И.П. ПАРМОНҚУЛОВ**

**Электрон техника материаллари
ва қурилмалари технологияси**

*Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим
вазирлиги олий ўқув юртларининг физика ва электроника
соҳаси мутахассисликлари бакалаврлари ва магистрлари
учун дарслик сифатида тавсия этган*

БИБЛИОТЕКА

Бух. ТИП и ЛП

№ 43/24

Дарсликда электрон техника материаллари ва маҳсулотларини ишлаб чиқаришда кечадиган асосий жараёнлар (иссиқлик, масса узатиш ва кимёвий жараёнлар, ҳам ашё материалларига қайта ишлов бериш — ажратиш ва тозалаш усуллари, кристаллаш, шишланиш) нинг хусусиятлари ёритиб берилган. Шунингдек, электрон техникада кенг фойдаланиладиган энг асосий яримўтказгичли ва диэлектрик материаллар (кремний ва арсенид галлий монокристаллари, шиша, керамика, ситаллар ва улар асосидаги маҳсулотлар) ҳамда электрон қурилмалар (структуралар, яримўтказгичли асбоблар ва интеграл микросхемалар) ҳосил қилишнинг технологик жараёнлари, электрон асбобларда фойдаланиладиган юпқа қатламларнинг физикаси ва уларни ҳосил қилиш технологияси ҳамда урганиш усуллари баён қилинган.

Дарслик олий ўқув юртлари бакалавриатурасининг "Электроника ва микроэлектроника" йўналишидаги талабалари, шу йўналишдаги магистрлар ва аспирантлар учун мўлжалланган.

Тақризчилар: А. Мамадалимов — Ўзбекистон Миллий университетининг "Яримўтказгичлар физикаси" кафедраси профессори, академик

Н.Ф. Зикриллаев — Тошкент давлат техника университетининг "Умумий ва амалий физика" кафедраси мудири, ф.м.ф.д.

2103000000-58
Ж М359(04)-2004 Эълонсиз, 2004

ISBN 5-8244-1621-4

© "Mehnat" нашриёти, 2004

© «ЎАЖБНТ» Маркази, 2004

СЎЗ БОШИ

Замонавий ўта мураккаб, кўп босқичли электрон техника қурилмалари тизимларини яратиш ва уларни автоматик бошқариш соҳасида етук мутахассислар тайёрлаш бугунги куннинг энг долзарб вазифаларидан бири бўлиб қолмоқда.

Электрон техника саноати, айниқса, унинг асосий йўналиши — микроэлектроника XX асрнинг иккинчи ярмидан бошлаб жуда тез ривожлана бошлади. Микроэлектрониканинг истиқболи эса юқори талабларга жавоб берадиган, янгидан-янги хусусиятларга эга бўлган материалларни яратиш ва ишлаб чиқариш билан белгиланади. Ўтказгич, ярим ўтказгич ва диэлектриклар соҳасида бундай янги ноёб хусусиятли, кўп компонентли, кўп қатламли материаллар, юпқа ва ўта юпқа плёнкалар ҳосил қилиш учун эса электрон техника материаллари технологиясида ўта замонавий усуллари татбиқ қилиш талаб қилинади. Бунда илғор, тежамли, экологик тоза ва чиқиндисиз ишлайдиган технологик жараёнларни жорий этиш электрон техника соҳасининг ривожланиши учун асосий омил ҳисобланади.

Микроэлектрониканинг ҳар хил даражали интеграцияли интеграл микросхемалар, микройигмалар, микропроцессорлар, мини- ва макро- ЭҲМ каби маҳсулот ва қурилмалари ўзининг эксплуатация параметрларининг яхшилиги, ишончлилиги ва ишлаб бериш вақтининг кўплиги, талаб қиладиган энергия ва таннархининг камлиги, ихчамлиги билан аввалги авлод қурилмаларидан фарқ қиладиган функционал мураккаб радио ва ҳисоблаш қурилмаларини лойиҳалаш ва саноатда ишлаб чиқариш имкониятини берди. Айниқса, катта ва ўта катта интеграл микросхемалар технологияси юқори тезлик билан ривожланиб катта муваффақиятларга эришди. У ҳозирги вақтда халқ хўжалиги ҳамма соҳаларининг амалий камолотга етишида асосий аҳамиятга эга бўлмоқда.

Электрон техника материаллари, маҳсулотлари ва қурилмалари технологиясининг ривожланиш даражаси

и малакали мутахассисларнинг тайёрланиши билан уз-
юқор оғлангандир. Ишлаб чиқаришнинг мураккаблашаётганлиги
вий б тайёрланаётган материаллар номенклатурасининг борган
ҳамда кенгайиб бораётганлиги электрон техника соҳаси
сари хассисларидан технологиянинг назарий асосларини
мута роқ ўрганишни талаб қилмоқда. Бу эса бошқариладиган
чуғу логия яратиш, яратилаётган материаллар ва қурилмалар-
техн таркиб ва хоссаларини олдиндан айтиб беришда каттадан-
нинг ютуқларга эга бўлиш имкониятини беради.

катт алқ ҳўжалигининг ривожланишида, иқтисодиётнинг
ида, илмий-техник жараённинг тезлашувида элект-
ўси техника материаллари, маҳсулотлари ва қурилмалари-
рон технологияси муҳим рол ўйнайди.

нинг лозкур дарслик бешта бобдан иборат бўлиб, 1-бобда
трон техника материаллари ва маҳсулотлари техноло-
элект идаги ва ҳам ашё материалларини қайта ишлашдаги
гия ий жараёнлар кўриб чиқилган. 2-боб ярим ўтказгичли
асос электрикли монокристалл материалларни олиш тех-
ва д гиясига бағишланган. 3-боб электрон асбоблар ва қурил-
нол р ишлаб чиқариш технологиясига бағишланган. 4-боб-
мал лектрон техника қурилмаларини ишлаб чиқаришда энг
да э булган юпқа қатламлар физикаси ва технологияси
зару да сўз юритилган. 5-бобда қаттиқ жисм юзалари ва юпқа
ҳақт амларини ўрганиш усуллари ёритилган.

катт бу дарслик А.Р. Беруний номидаги Тошкент давлат тех-
университети «Электрон техника материаллари физи-
ник ва технологияси» кафедрасининг ўқитувчилари бўлган
каси лифлар томонидан ўқитиладиган «Электрон техника ма-
муа аллари ва маҳсулотлари технологияси», «Электрон ас-
тер лар ва қурилмалар ишлаб чиқариш технологияси», «Юпқа
боб амлар физикаси ва технологияси» ҳамда «Қаттиқ жисм
қат ларини ўрганиш усуллари» фанларининг намунавий ўқув
юза урлари асосида «Электроника ва микроэлектроника»
дас илиши бакалаврлари ва магистрлари учун мўлжаллаб
йўн ган.

ёзи

I БОБ

ЭЛЕКТРОН ТЕХНИКА МАТЕРИАЛЛАРИ ТЕХНОЛОГИЯСИДАГИ ВА ХОМ АШЁ МАТЕ- РИАЛЛАРИНИ ҚАЙТА ИШЛАШДАГИ АСОСИЙ ЖАРАЁНЛАР

1.1. ЭЛЕКТРОН ТЕХНИКА МАТЕРИАЛЛАРИ ТЕХНОЛОГИЯСИДАГИ АСОСИЙ ЖАРАЁНЛАРНИНГ УМУМИЙ ХАРАКТЕРИСТИКАЛАРИ

1.1.1. ТЕХНОЛОГИК ЖАРАЁНЛАР, АСОСИЙ ТУШУНЧАЛАР

Электрон техника материалларини ҳосил қилишнинг *технологик жараёни* хом ашёни ўтказгичлар, ярим ўтказгичлар, диэлектриклар ва магнит материалларига айлантирадиган усуллар ва жараёнларнинг йиғиндисидир. *Технологик схема* деганда мос аппаратларда кечадиган операциялар кетма-кетлиги тавсифланган усуллар тушунилади. *Операция* битта ёки бир қанча ускуналарда кечадиган ҳар хил технологик жараёнлар: иссиқлик, масса алмашинуви, механик, кимёвий ва шу каби жараёнлар йиғиндисидан иборат бўлади. Электрон техника материаллари асосан кимёвий технологик жараён ёрдамида ҳосил қилиниб, улар ўз навбатида бир қанча элементар физикавий, физик-кимёвий ва кимёвий жараёндан ташкил топади. Улар қуйидаги босқичларга бўлинади:

1. Хом ашё тайёрлаш ва реакция зонасига компонентларни олиб келиш.
2. Кимёвий реакция.
3. Ҳосил бўлган маҳсулотларни реакция зонасидан олиб кетиш ва асосий маҳсулотни ажратиб олиш.

Биринчи босқичда кечадиган физикавий жараёнлар натижасида қайта ишланаётган материаллар фақат ташқи шаклларини ёки физикавий хоссаларини ўзгартиради ва иккинчи босқичга кимёвий ўзгармасдан ўтади. Реакцияга киришадиган компонентлар реакция зонасига газларнинг

диффузияси ёки конвекцияси, абсорбцияси ёки десорбцияси, буғларнинг конденсацияси, қаттиқ моддаларнинг суюлтирилиши ёки уларнинг суюқликларда эритилиши, суюқликларнинг буғланиши ёки қаттиқ моддаларнинг возгонкаси орқали олиб келинади.

Иккинчи босқичда кечадиган жараёнлар натижасида бошланғич материалларда чуқур ўзгаришлар юз беради. Бунинг натижасида нафақат физик хоссалар, балки модданинг агрегат ҳолати ва кимёвий таркиби ҳам ўзгаради.

Учинчи босқичда кимёвий ўзгаришлар кузатилмайди, фақат ажратиш бўлади: керакли (асосий) ва қўшимча маҳсулотлар ажратиб олинади ва қолганлари жараён бошига қайтарилади.

Технологик жараённи ташкил этиш ва оптималлашда технологик режимнинг аҳамияти катта. *Технологик режим* деб жараённинг тезлигига, маҳсулотнинг чиқиши ва сифатига таъсир этувчи асосий омиллар (параметрлар) йиғиндисига айтилади.

Электрон техника материаллари ишлаб чиқаришда технологик режимнинг асосий параметрларига: ҳарорат, босим, реагентларни олиб келиш ва аралаштириш усуллари ҳамда бошқалар киради. *Технологик режим параметрларининг* оптимал қийматлари аппаратларнинг сермаҳсуллигини ва ходимлар меҳнат унумдорлигининг максимал бўлишини таъминлаши керак. Технологик жараёнлар вақт бўйича кечиш характериға қараб уч хил бўлади:

1. Даврий.
2. Узлуксиз.
3. Комбинацион.

Даврий жараён алоҳида босқичларнинг битга жойда кечишини ифодалайди ва бунда охириги маҳсулот аппаратдан маълум бир вақт оралиғида тўлиқ ёки қисман олиб турилади.

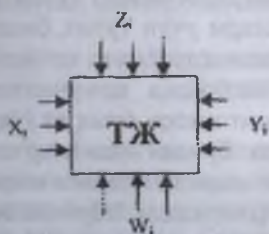
*Узлуксиз жараён*да охириги маҳсулот узлуксиз равишда олиб турилади, бунда узлуксиз ишлаётган аппаратнинг ихтиёрий қисмидаги физик катталиклар ва параметрлар жараённинг кечиш вақтида ўзгаришсиз туради.

*Комбинацион жараён*да узлуксиз жараённинг баъзи бир босқичлари даврий бўлади ёки даврий жараённинг баъзи бир босқичлари узлуксиз бўлади.

Узлуксиз бошқариладиган жараён бошқаларға қараганда бир қатор устунликларға эга.

1.1.2. ЭЛЕКТРОН ТЕХНИКА МАТЕРИАЛЛАРИ ТЕХНОЛОГИЯСИДА МОДЕЛЛАР ТИЗИМИ

Электрон техника материалларини ишлаб чиқаришдаги ҳамма технологик жараёнларнинг замонавий таҳлили тизимли ёндашиш асосида амалга оширилади. Бунда юз берадиган физик-кимёвий ва механик жараёнларни, қайта ишланувчи объектлар ва уларни амалга оширадиган воситаларни ўз ичига оладиган «катта тизим» ёки «катта технологик тизим» каби тушунчалар асосий ҳисобланади. Технологик жараённинг катта тизим сифатидаги схематик кўриниши 1.1- расмда тасвирланган.



1.1-расм. Катта тизим сифатидаги технологик жараён схемаси.

Бу ерда, X_i ($i=1,2,\dots,m$) тизимга киришлар ёки бошланғич маҳсулот хоссаларини аниқловчи параметрлар,

Y_i ($i=1,2,\dots,n$) тизимдан чиқишлар ёки охириги тайёр маҳсулотнинг чиқиш параметрлари,

Z_i ($i=1,2,\dots,l$) маълум технологик жараённи назорат қилувчи ва бошқарувчи омиллар,

W_i ($i=1,2,\dots,k$) жараённи ғалаёнга келтирувчи, назорат қилин-

майдиган, четга оғдирувчи омиллар.

Бу параметрлар гуруҳлари қуйидагича ифодаланади:

1. Кириш параметрлари — X_i .

Бу параметрлар тажриба йўли билан аниқланади, бироқ жараён давомида уларга таъсир қилиб бўлмайди. Масалан: монокристаллар олиш жараёнида печкага юкланадиган бошланғич хом ашё таркиби.

2. Охириги тайёр маҳсулотнинг чиқиш параметрлари — Y_i .

Буларга кириш, бошқарувчи ва назорат қилинмайдиган омиллар таъсир қилиб турадиган тизимдаги ўрганилаётган жараённинг режимлари билан аниқланадиган тавсифлар киради.

3. Бошқарувчи параметрлар — Z_i .

Буларга жараённи бошқариш имкониятини берадиган, маълум бир талаблар асосида таъсир ўтказадиган жараённинг параметрлари киради.

4. Назорат қилинмайдиган (четга оғдирувчи) омиллар — W_i .

Уларнинг қиймати вақт ўтиши билан ихтиёрий ўзгариши мумкин ва жараён давомида уларни ўлчаш мумкин эмас.

Тизимни шакллантириш математик модел ёрдамида амалга оширилади. Бунда тизимнинг чиқиш параметрлари, ҳолат параметрлари ҳамда кириш бошқарувчи ва четта оғдирувчи ўзгарувчилар орасидаги боғланишни ифодаловчи тенглама тузилади.

Электрон техника материаллари технологиясида технологик жараёнларни моделлашдан уни текшириш, бошқариш ва ўргатиш мақсадида фойдаланилади. Мана шундан келиб чиқиб, қуйидаги моделлар тизими фарқланади:

1. Жараёнларни текшириш учун моделлар.

Бундай моделларнинг асосий мақсади объект тўғрисида бутун ёки унинг алоҳида томонлари учун тўлиқ билим олиш ҳисобланади. Уларнинг асосини жараёнлар кечишининг физикавий, физик-кимёвий ва бошқа қонуниятлари тўғрисида тўпланган қарашларнинг қисқа, аниқ ва ўзаро боғланган аксланиши ташкил қилади. Бундай моделлар асосан жараён ва ҳодисаларнинг ички механизмларига кириб бориб, янги билимлар олиш учун ишлатилади. Шунингдек, бундай моделлардан фойдаланиб бошқариш алгоритмларини синтез қилиш ва самарали бошқарувчи таъсирларни танлаш мумкин.

2. Технологияни ҳисоблаш ва оптималлаш учун моделлар.

Бундай моделлар технологик жараённи ҳисоблашда қўлланилади ҳамда улардан лойиҳаланаётган ва ишлаб турган агрегатлардаги жараённи бошқариш бўйича йўриқнома кўринишида ёки автомат рослагичга бериб турувчи қуролма кўринишида фойдаланиш мумкин.

3. Жараёнларнинг вақт бўйича оптимал траекториясини башорат қилиш учун моделлар.

Бундай моделлар асосида аввалги иккита модел ёрдамида олинган қарашлар, тушунчалар ёки натижалар ётди. Бундай моделлардан тезлаштирилган масштабли вақтда жараён қандай кечишини билиш учун фойдаланилади. Масалан: шиша пиширишдан олдин бошланғич шартлар (шиша таркиби, температура ва ҳоказолар) маълум бўлгандан сўнг, пишириш жараёни давомида вақт бўйича бошқарувчи таъсирларнинг оптимал тақсимланишини танлаш учун фойдаланилади.

4. Стабилловчи ёки изма-из мословчи моделлар.

Бу босқичдаги моделлар жуда соддалиги ва жараённинг динамикасини оператив акс эттириши билан фарқ қилади. Бундай моделларни тузаётганда функционал ёндашишдан кўпроқ фойдаланилади.

5. Автоматлашган тизимли ўқитиш ва тренажер комплекс асосида малакани ошириш учун моделлар.

Бундай моделларга бошқарувчи моделларга қараганда миқдор жиҳатдан талаб камроқ қўйилади, лекин сифат жиҳатдан ўхшатиш юқори даражада бўлиши керак.

Шундай қилиб, математик моделлар асосида ЭХМ ёрдамида технологик қурилмалар ва жараёнлар ўрганилади, ҳар хил шароитда уларнинг кечиши моделлашади, оптимал технологик параметрлар топилади ҳамда ишлаётган ёки лойиҳаланаётган конструкциянинг режимлари ишлаб чиқилади.

1.1.3. ҲИСОБЛОВЧИ ТЕХНОЛОГИК ТАЖРИБА ТУШУНЧАСИ

Ҳисобловчи технологик тажриба деганда ЭХМ ёрдамида технологик қурилма ва жараёнларни ўрганувчи математик моделлар асосида текширишларни ташкил қилиш ҳамда ҳар хил шароитларда жараёнлар кетишини моделлаш, оптимал технологик параметрларини топиш ва ишлаётган ёки лойиҳаланаётган конструкциялар режимини топиш тушунилади.

Ҳисобловчи технологик тажрибанинг *идеологик базаси* — математик моделлаш, *услубий базаси* — ҳисобловчи алгоритмлар назарияси, *техникавий базаси* — замонавий ЭХМлардир.

Технологик жараёнларни лойиҳалашда технологик тажрибани ҳисоблашнинг асосий вазифалари гурт гуруҳга бўлинади:

1. Технологик жараёнлар таҳлили.

Бундан қуйидаги асосий масалаларни ечишда фойдаланилади:

1. Технологик жараённинг “турғун ишлай олишлик диапазони” аниқлаш.

2. Технологик жараённи юргизишнинг критик шароитини аниқлаш.

3. Технологик параметрларнинг жараённи юргизиш режимларига ва унинг чиқиш параметрларига таъсир даражасини белгилаш.

4. Жараённинг технологик режимлари ва технологик қурилмалар конструкцияси ўзгаришларининг жараён сифати кўрсаткичларига таъсирини текшириш.

5. Технологик қурилмада жараённинг асосий параметрларини назорат қилиш ва бошқариш учун керак бўладиган датчиклар жойлаштириладиган асосий нуқталарни аниқлаш.

II. Технологик жараёнлар синтези.

Бу гуруҳ масалаларига қуйидагилар киради:

1. Ишлаётган технологик қурилма учун жараённинг технологик режимини оптималлаш.

2. Ишлаётган технологик қурилманинг конструкция параметрларини оптималлаш.

3. Ишлаётган технологик қурилманинг технологик режимларини ва конструкция параметрларини бир вақтда оптималлаш йўли билан ишлаётган технологик жараённи лойиҳалаш.

III. Диагностика.

Диагностика масалаларига қуйидагилар киради:

1. Технологик қурилма ва технологик жараёнларнинг бутунлигича ишончлилиқ характеристикаларини аниқлаш.

2. Технологик жараённинг тўғри ишлаётганлик диагностикаси.

3. Ҳар қил таъсирлар иштирокидаги технологик жараённинг ишлай олишлик турғунлигини текшириш.

4. Диагностика жадвалини автоматлашган ҳолатда қуриш.

IV. Башорат.

Башорат масалалари гуруҳига қуйидагилар киради:

1. Технологик жараён сифат кўрсаткичларини башорат қилиш.

2. Технологик жараён сифат кўрсаткичларига кутилаётган техникавий ютуқларнинг таъсирини баҳолаш.

3. Жараённи ўтказишнинг янги схемаларини ва янги технологик режимларини лойиҳалаш ва текшириш.

I.1.4. ТЕХНОЛОГИК ЖАРАЁНЛАРНИ МОДЕЛЛАШ ВА ОПТИМАЛ БОШҚАРИШ

Бошқарилувчи объект сифатида кўпчилиқ реал технологик жараёнлар ностационар, ночизикли, кўп ўлчамли, кўпгина ички тесқари боғланишли бўлади. Уларни реал эксплуатация қилиш шароитида, яъни динамик ҳолатда ўзгарувчиларнинг ўзаро боғланишларининг даражаси ва шакли тўғрисидаги дастлабки ахборот жуда кам ёки умуман бўлмайди. Шу сабабли бошқарилувчи объект сифатидаги технологик жараёнларни адекват математик тавсифлаш мураккаб-

лашади. Оптимал бошқариш учун моделларни ишлаб чиқишни технологик жараёнларни лойиҳалаш босқичида амалга ошириш мумкин. Математик модел асосида технологик жараёнларни оптимал бошқариш масалаларини ечиш технологик жараёнларни бошқаришнинг автоматлашган тизимлари (ТЖ БАТ) ёрдамида бажарилади. ТЖ БАТ — бу инсон-машина тизимидан иборат бўлиб, у ахборотларни автоматик йиғиш ва қайта ишлашни таъминлайди ҳамда шу асосда қабул қилинган бошқариш мезонларига мос ҳолда бошқарилувчи технологик объектларни бошқарувчи таъсирларни ишлаб чиқади ва амалга оширишни таъминлайди.

Ташкилий ишлаб чиқариш иерархиясидаги эгаллаган сатҳга биноан ТЖ БАТ пастки (бирламчи) ва юқориғи (иккиламчи) сатҳли ҳамда кўп сатҳли тизимларга фарқланади. Пастки (бирламчи) сатҳли тизимларга таркибида бошқа ТЖ БАТ бўлмаган агрегатларни, қурилмаларни, ишлаб чиқариш участкаларини бошқарадиган ТЖ БАТлар киради. Иккиламчи сатҳли ТЖ БАТларга қурилмалар гуруҳини, цехларни, ишлаб чиқариш корхоналарини бошқарадиган автоматлашган тизимлар киради, бунда алоҳида участкалар ўзларининг бошқарувчи тизимларига, яъни бирламчи сатҳли ТЖ БАТларига эга бўлиши мумкин. Лекин уларнинг оператив хизматчилари, иккиламчи сатҳли ТЖ БАТнинг оператив хизматчиларига бўйсунди.

Технологик жараёнларни моделлаш ва бу асосда бошқарувчи алгоритмларни синтез қилиш объектнинг ички хоссалари билан келишилган рационал таъсирларни оптимал танлашга қаратилган.

1.2. ИССИҚЛИК УЗАТИШ ЖАРАЁНЛАРИ

Жисмлар орасида иссиқлик кўчиши ёки иссиқлик алмашуви жараёнининг ҳаракатлантирувчи кучи температура фарқи бўлиб, бунинг натижасида термодинамиканинг иккинчи қонунига биноан иссиқлик ўз ҳолича иссиқроқ жисмдан иссиқлиги камроқ жисмга ўтади.

Иссиқлик тарқалишининг учта усули мавжуд:

1. Иссиқлик ўтказувчанлик ҳисобига.
2. Иссиқлик нурланиши ҳисобига.

3. Конвекция.

Реал шароитларда иссиқлик алмашишининг бу турлари алоҳида қузатилмасдан кўпинча улар бир-бири билан боғлиқ ҳолда биргаликда намоён бўлади. Масалан, конвекция кўпинча иссиқлик нурланиши билан биргаликда кечади, ғовак жисмларда иссиқлик ўтказувчанлик конвекция ва ғоваклардаги нурланиш билан, иссиқлик нурланиши эса иссиқлик ўтказувчанлик ва конвекция билан кечади.

1.2.1. ИССИҚЛИК ЎТКАЗУВЧАНЛИК ҲИСОБИГА ИССИҚЛИК УЗАТИШ

Иссиқлик ўтказувчанлик ҳисобига иссиқлик узатишнинг асосий қонуни Фурье қонунидир. Бу қонунга биноан, иссиқлик оқимиға перпендикуляр бўлган dS сирт юзаси элементиға dt вақт ичида тушаётган dQ иссиқлик миқдори температура градиенти dT/dx га, сирт юзаси элементи dS га ва вақт dt га тўғри пропорционалдир:

$$dQ = -\lambda_T dT/dx dS dt, \quad (1.1)$$

бу ерда, λ_T — иссиқлик ўтказувчанлик коэффиценти бўлиб, сон жиҳатдан бирлик юзадан бирлик вақт ичида температура градиенти бирга тенг бўлганда ўтадиган иссиқлик миқдориға тенг бўлиб, моддаларнинг физик характеристикаси ҳисобланади ва унинг қиймати Вт/(м·град): металлар учун — $2 \div 417$; суюқликлар учун — $0,1 \div 0,7$; газлар учун — $0,0062 \div 0,165$ атрофида бўлади.

Фурье қонунини бошқача қуйидагича ёзиш мумкин:

$$J = -\lambda_T dT/dx, \quad (1.2)$$

бу ерда, J — иссиқлик оқимининг зичлиги ёки бирлик юзадан бирлик вақт ичида узатилаётган иссиқлик миқдори.

Кўзгалмас муҳитда температуранинг тақсимланиши умумий кўринишда иссиқлик ўтказувчанликнинг дифференциал тенгламаси ёки Фурье тенгламаси кўринишида ифодаланади:

$$dT/dt = a_T \nabla^2 T, \quad (1.3)$$

бу ерда, $a_T = \lambda_T / (\rho c_p)$ — температура ўтказувчанлик коэффиценти, ρ — муҳитнинг зичлиги, c — солиштира иссиқлик сизими; a_T нинг ўлчами m^2/s бўлиб, жисмларнинг иссиқлик инерция хоссасини ифодалайди.

Иссиқлик ўтказувчанлик ҳисобига иссиқлик узатиш мувозанатлашган жараёнда $dT/dt = 0$ га тенг ва (1.3) тенглама

$a \nabla^2 T = 0$ кўринишга эга бўлади. Бу ерда $a_T = 0$ га тенг бўлолмайди, шу сабабли ифодани қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\nabla^2 T = 0. \quad (1.4)$$

(1.4) тенглама кўзгалмас муҳитда иссиқлик режими мувозанатида иссиқлик ўтказувчанликнинг дифференциал тенгламаси ҳисобланади.

1.2.2. ИССИҚЛИК НУРЛАНИШИ ҲИСОБИГА ИССИҚЛИК УЗАТИЛИШИ

Конденсирланган жисмлар (қаттиқ, суюқ) узлуксиз нурланиш спектрига эга бўлади. Иссиқлик нурланишининг интенсивлиги температура ошиши билан ошиб боради ва температура $T > 600^\circ\text{C}$ да конденсирланган жисмлар орасидаги нурли иссиқлик алмашуви бошқа усулларга нисбатан устунликка эришади.

Иссиқлик ва ёруғлик нурланишининг физик табиати бир хил бўлиб, бир хил қонунларга, яъни қайтиш, синиш ва ютилиш қонунларига бўйсунди. Улар бир-биридан фақат тўлқин узунликлари билан фарқланади: кўринадиган нурлар учун тўлқин узунликларининг қиймати $0,4 \div 0,8 \text{ мкм}$, кўринмайдиган иссиқлик (инфрақизил) нурларининг тўлқин узунликлари эса $0,8 \div 40 \text{ мкм}$ га тенг бўлади.

Киздирилган жисмдан чиқаётган нурлар оқими бошқа жисм сиртига тушганда унинг бир қисми қайтади, бир қисми ютилади, бир қисми эса жисмнинг ичидан ўтиб кетади. Агар жисмга тушаётган нурларнинг умумий энергиясини — Q , ютилаётган энергияни — $Q_{\text{юр}}$, қайтган энергияни — $Q_{\text{қайт}}$, жисм ичидан ўтиб кетган энергияни — $Q_{\text{ўт}}$ деб белгилаб олсак, унда:

$$Q = Q_{\text{юр}} + Q_{\text{қайт}} + Q_{\text{ўт}}. \quad (1.5)$$

(1.5) тенгламанинг ўнг ва чап тарафини Q га бўлиб ва белгилашлар киритиб қуйидаги тенгламани ҳосил қиламиз:

$$A + R + D = 1, \quad (1.6)$$

бу ерда, $A = Q_{\text{юр}} / Q$ — ютилиш коэффициенти; $R = Q_{\text{қайт}} / Q$ — қайтиш коэффициенти; $D = Q_{\text{ўт}} / Q$ — ўтиш коэффициенти. Бўлиши мумкин бўлган хусусий чегаравий ҳоллар:

$A = 1$ бўлган ҳол, бунда $R = D = 0$, жисм юзасига тушаётган нурларнинг ҳаммасини ютади. Бундай жисмлар абсолют қора жисм дейилади.

$R=1$ бўлган ҳол, бунда $A=D=0$, жисм ўзига тушаётган нурларнинг ҳаммасини қайтаради. Бундай жисмлар абсолют оқ жисм дейилади.

$D=1$ бўлган ҳол, бунда $A=R=0$, жисм тушаётган нурларнинг ҳаммасини ўтказиб юборади. Бундай жисмлар абсолют шаффоф ёки диатермик жисм дейилади.

Табиатда абсолют жисмлар бўлмайди. Ярим ўтказгичли ва диэлектрик материаллар тушаётган ёруғлик квантларининг энергия диапазонлари тақиқланган зона кенлигидан кичик бўлган нурлар учун юқори шаффофликка эга. Ҳар қандай тўлқин узунлигидаги тушаётган нурлар энергиясининг фақат бир қисминигина ютадиган, қайтарадиган ва ўтказиб юборадиган жисмлар кулранг жисмлар дейилади. Иссиқлик нурланишининг асосий характеристикаларидан бири бу жисмнинг интеграл нур чиқариш (нурланиш) қобилияти E_T бўлиб, у берилган T температурада бирлик вақтда тўлқин узунлигининг барча интервалида ($\lambda = 0$ дан $\lambda = \infty$ гача) жисмнинг бирлик юзасидан нурланаётган энергия миқдоридир:

$$E_T = Q / (st), \quad (1.7)$$

бу ерда, Q – жисмдан нурланаётган энергия.

Нур чиқара олиш қобилиятининг тўлқин узунлик интервалига (λ дан $\lambda + d\lambda$ гача) нисбати иссиқлик нурланишининг спектрал характеристикаси ҳисобланади. Уни жисмнинг нурланиш интенсивлиги дейилади ва қуйидаги нисбат билан ифодаланади:

$$I_{\lambda} = dE_T / d\lambda. \quad (1.8)$$

E_T ва I_{λ} бир-бири билан қуйидаги ифода орқали боғланган:

$$E_T = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} I_{\lambda} d\lambda \quad (1.9)$$

Абсолют қора жисм ҳар қандай температурада, берилган тўлқин узунлигида энг кўп нурланиш интенсивлигига эга бўлади. Абсолют қора жисмнинг нурланиш интенсивлиги Планк тенгламаси билан аниқланади:

$$I_{\lambda T} = c_1 \lambda^{-5} / [\exp(-c_2 / (\lambda T)) - 1], \quad (1.10)$$

бу ерда, T – абсолют температура, λ – нурланишнинг тўлқин узунлиги;

$$c_1 = 3,22 \cdot 10^{16} \text{ Вт/м}^2; \quad c_2 = 1,24 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м}^2.$$

(1.9) ифодани $\lambda=0$ дан $\lambda=\infty$ гача интеграллаб, абсолют қора жисм учун нурланишнинг тулиқ энергияси ёки нур чиқара олиш қобилиятининг ифодасини ҳосил қиламиз:

$$E_{\text{от}} = \sigma_0 T^4, \quad (1.11)$$

бу ерда, $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \text{ К}^4)$ — абсолют қора жисмнинг нур чиқариш константаси.

(1.11) формула Стефан-Больцман қонунини ифодалайди. Бу қонунни кулранг жисмлар учун ҳам қўллаш мумкин:

$$E_r = \varepsilon \sigma_0 T^4, \quad (1.12)$$

бу ерда, $\varepsilon = \sigma/\sigma_0$ — нисбий нур чиқариш коэффициентини ёки кулранг жисмнинг қоралик даражаси, σ — кулранг жисмнинг нур чиқариш коэффициентини. ε нинг қиймати доим бирдан кичик бўлиб, температурага боғлиқ ҳолда 0,01дан 0,96 (қора қуя)гача бўлади.

Кулранг жисмларнинг нур чиқариш қобилияти билан ютиш қобилияти Кирхгоф қонуни орқали боғланган бўлиб, бунга биноан ҳар қандай жисмнинг нур чиқариш қобилияти E_r нинг нур ютиш қобилияти A_r га нисбати температура бир хил бўлганда ўзгармас катталиқ бўлиб, абсолют қора жисмнинг нур чиқариш қобилиятига тенг бўлади:

$$\frac{E_r}{A_r} = \frac{E_{\text{от}}}{A_{\text{от}}} = E_{\text{от}}, \quad (1.13)$$

бу ерда, $A_{\text{от}} = 1$ — абсолют қора жисмнинг ютиш қобилияти. Шу сабабдан нотекис сиртли жисмларнинг ютиш қобилияти иссиқлик нурларининг кўп марта қайтиши ҳисобига силлиқ сиртга қараганда анча юқори бўлади.

1.2.3. ИССИҚЛИКНИНГ КОНВЕКЦИЯ ҲИСОБИГА УЗАТИЛИШИ

Суюқ ва газсимон жисмларда иссиқликнинг узатилиши ўша муҳитнинг механик узатилишига ўзвий боғланган бўлади, яъни суюқлик оқимининг гидродинамик шаронтига боғлиқ бўлади. Суюқлик ва газларнинг массаси қанча кўпроқ турбулент (қуюнсимон) ҳаракатланса ва унинг заррачалари кучлироқ аралаштирилса, конвекцияли иссиқлик узатиш шунча интенсив бўлади. Суюқликларнинг асосий массасида иссиқлик узатилиши асосан иссиқлик ўтказувчанлик ва

конвекция ҳисобига рўй беради. Бундай биргаликдаги ис-
сиқлик узатиш конвектив иссиқлик узатиш дейилади. Идиш
деворига яқинлашиб борилган сари турбулент ҳаракатнинг
интенсивлиги камаяди, иссиқлик ўтказувчанликнинг ҳис-
саси ошиб боради, натижада иссиқлик алмашуви камаяди.
Девор яқинида иссиқлик узатилиши фақат деворга нормал
бўлган иссиқлик ўтказувчанлик билангина амалга оширила-
ди, натижада бу соҳада маълум бир температура градиенти
ҳосил бўлади. Мана шу қатлам гидродинамик чегаравий
қатлам $\delta_{\text{гидр}}$ га ўхшатилиб иссиқлик чегаравий қатлам $\delta_{\text{исс}}$
дейилади, лекин уларнинг қалинликлари бир-биридан фарқ
қилади. Иссиқлик чегаравий қатламда иссиқлик ўтказувчан-
лик асосий рол ўйнайди (1.2-расм). Қовушқоқликнинг
ошиши билан $\delta_{\text{гидр}}$ ошишига ўхшаб, суюқликнинг иссиқлик
ўтказувчанлигининг ошиши $\delta_{\text{исс}}$ қалинлигининг ошишига
олиб келади. Иссиқлик чегаравий қатлам $\delta_{\text{исс}}$ чегарасида ис-
сиқлик узатилишининг интенсивлиги температура ўтказув-
чанлик коэффиценти a , орқали ифодаланади.

Оқим турбулентлигининг кучайиши иссиқлик чегара-
вий қатлам $\delta_{\text{исс}}$ нинг камайишига олиб келади. Бу эса ис-
сиқлик узатилиш интенсивлигида конвекциянинг таъсири
ошиб бориши билан ифодаланади. Шундай қилиб, конвек-
тив иссиқлик ўтказиш жараёни мураккаб механизмга эга. У
соддалашган совутиш қонуни билан аниқланади. Бунга
биноан dS девор юзаси элементи орқали dt вақт ичида уз-

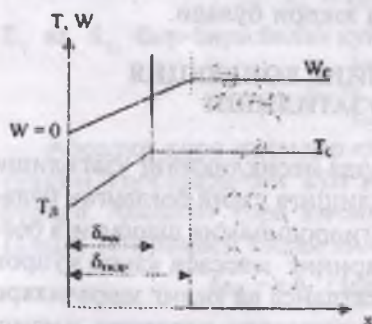
тилаётган иссиқлик миқдо-
ри dQ девор ва суюқлик
температуралари фарқига,
 dS ва dt га тўғри пропорци-
онал бўлади:

$$dQ = -\alpha(T_s - T_c)dS dt. \quad (1.14)$$

Мувозанат ҳолатида:

$$Q = -\alpha(T_s - T_c)St, \quad (1.15)$$

бу ерда, α — иссиқлик уза-
тиш коэффиценти дейила-
ди ва тажриба йўли билан
аниқланади.



1.2-расм. Иссиқлик ва гидродинамик
чегаравий қатламларнинг структураси.

1.3. МАССА УЗАТИШ ЖАРАЁНИ

Масса узатиш жараёни бир фазадан бошқа фазага модда узатиш билан ифодаланади. Бунда битта ёки бир нечта компонентларнинг бир фазадан бошқа фазага кўчиши натижасида гетероген ёки гомоген тизимлар (газлар аралашмаси, суяқ ёки қаттиқ эритмалар ва бошқалар) ҳосил бўлиши мумкин.

Масса узатиш мураккаб жараён бўлиб, бунда битта фаза чегарасида ёки фазалар фарқини чегараловчи сирт орқали ва бошқа фаза чегарасида модда узатилса *масса узатиш* дейилади. Ҳар бир фаза ичида модданинг тақсимланиши молекуляр ва конвектив диффузия йўли билан боради. Шу сабабли масса кўчиш жараёни *диффузияли жараён* ҳам дейилади. Масса узатиш жараёнларининг ҳаракатлантирувчи кучи тақсимланаётган моддаларнинг кимёвий потенциаллар фарқи ҳисобланиб, улар тизимнинг мувозанат вазиятидан оғиш даражасини ифодалайди. Ҳисоблашларда масса кўчиш жараёнининг ҳаракатлантирувчи кучини тахминан концентрациялар фарқи билан ифодалайдилар.

Технологик жараёнлар ўтказишнинг кўпинча учрайдиган реал шароитларида масса узатишнинг йўналишини аниқлаш учун концентрациялар фарқидан ташқари ташқи кучлар таъсирида бўлаётган температура ва босим градиентларини ҳам ҳисобга олиш керак бўлади.

Масса узатиш жараёнларини ҳисоблашда ва таҳлил қилишда ҳодисаларнинг қуйидаги учта томони кўриб чиқилади:

1. Фазалар қондаси ва мувозанат қонунлари билан аниқланадиган фазалар миқдори ва улардаги компонентлар тақсимооти қонунларининг тизимда амал қилишлари учун керакли ва етарли шартлар.

2. Ишчи шароитлар деб аталадиган ва жараённи ўтказиш учун ҳосил қилинадиган керакли ва етарли шартлар; ишчи шартлар орасидаги боғланишлар жараённинг ишчи линияси деб аталадиган ҳолда ифодаланадиган қайта ишланадиган маҳсулотларнинг бошланғич ва охириги концентрациялари ва миқдорларининг қийматларини бериш йўли билан аниқланади.

3. Жараённинг ҳаракатлантирувчи кучига, тизимнинг физик хоссаларига ва жараён ўтадиган гидродинамик шароитларга боғлиқ бўлган модданинг бир фазадан бошқасига ўтиш тезлигини аниқлайдиган керакли ва етарли шартлар;

бу омиллар орасидаги боғланиш диффузия кинетикасининг тенгламаси ёрдамида аниқланади.

Масса узатиш жараёнларидаги мувозанат ҳолатини билиш мана шу жараёнларнинг кечиши мумкин бўлган чегараларни аниқлаш имкониятини беради. Тизимдаги фазалар мувозанати фазалар қондаси билан аниқланади:

$$\Phi + C = K + 2, \quad (1.16)$$

бу ерда, Φ —фазалар сони, C —эркинлик даражаси сони, яъни тизимдаги фазалар сонини ва таркибини бузмасдан ихтиёрий ўзгартириш мумкин бўлган ихтиёрий ўзгарувчанлар сони, K —тизимдаги компонентлар сони.

Демак, фазалар қондаси масса узатиш жараёнида мувозанатни ҳисоблашда ихтиёрий ўзгартириш мумкин бўлган параметрлар сонини белгилайди. Одатда масса узатиш жараёнларида икки фазали тизимлар қатнашади ва улар учун $\Phi=2$. Унда икки компонентли тизимда ($K=2$) эркинлик даражаси сони $C=2$ бўлади. Демак, бундай тизимларда мувозанат қуйидаги параметрлар комбинацияси билан аниқланади: C_x , P ёки C_x , T ёки C_y , C_x . Бу ерда, P — тизимдаги босим, T — тизимнинг температураси, C_y — Φ_y фазадаги компонентнинг миқдори, C_x — Φ_x фазадаги шу компонентнинг мувозанат миқдори.

Масса узатиш тезлиги масса алмашув кузатилаётган фазалардаги тақсимланаётган моддаларнинг кўчиш механизмига боғлиқ бўлади.

Фаза ичида модда молекуляр диффузия ёки конвекция ва молекуляр диффузия биргаликда бўлган усуллар ёрдамида узатилиши мумкин. Модда битта молекуляр диффузия ёрдамида фақат қўзғалмас муҳитдагина силжиши мумкин. Ҳаракатланаётган муҳитда модданинг кўчиши ҳам молекуляр диффузия билан, ҳам муҳитнинг ўзи билан унинг ҳаракати томонга ёки унинг алоҳида заррачалари билан ҳар хил йўналишларда амалга оширилади. Турбулент оқимда молекуляр диффузия орқали кўчиш асосан фазалар чегараси яқинида кўпроқ бўлади. Суюқликнинг турбулент оқимида тезликнинг пульсацияланиши юз беради. Бунинг натижасида заррачалар ҳамма томонга ҳаракат қилиши мумкин. Турбулент пульсация натижасида моддаларнинг конвектив кўчиши турбулент диффузия деб аталади.

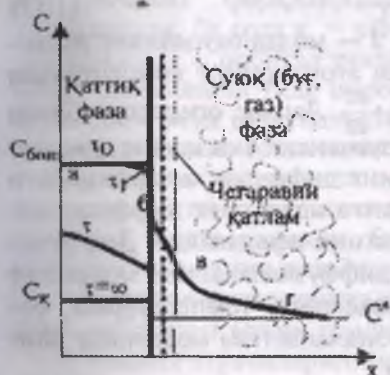
Қаттиқ ва ҳаракатланувчи суюқ фазалар орасидаги масса узатиш иккита жараёндан иборат бўлади:

1. Тақсимланаётган модда қаттиқ жисм ичида фазалар чегараси сиртига ички масса узатиш ёки масса ўтказувчанлик натижасида силжийди.

2. Шу модданинг суюқликка (газ ёки буғга) узатилиши ташқи масса узатиш йўли билан боради.

Шундай қилиб, масса узатиш ички ва ташқи диффузиялар йиғиндисидан иборат бўлади.

Қаттиқ фазада диффузия тезлиги жуда кичик бўлганлиги сабабли ундаги



1.3-расм. Қаттиқ фазада масса узатиш жараёни учун фазаларда тақсимланаётган модда концентрациясининг ўзгариш схемаси.

лиги сабабли ундаги масса узатиш беқарор жараёндир. Вақтнинг бошланиш лаҳзасида, яъни t_0 да қаттиқ жисм ичидаги тақсимланаётган модданинг концентрацияси ўзгармас ($C_{\text{сб}} = \text{const}$) бўлади. Модданинг сирт қатламдан уни ювиб турган фазага ўтиши давомида қаттиқ жисмда концентрация градиенти $\frac{dC}{dx}$ ҳосил бўлади

ва у вақт бўйича ўзгаради (1.3- расм). Ундан кейин модда қаттиқ жисм-

ни ювиб турган суюқлик (газ, буғ) оқимиға ўтади. Ювётган фазада масса узатиш жараёни ундаги турбулент оқимнинг структурасига боғлиқ бўлади. Турбулент ҳаракатда қаттиқ девор яқинида ламинар чегаравий қатлам ҳосил бўлади. Чегаравий қатламда қаттиқ жисмнинг сирти яқинида масса узатиш молекуляр диффузия ҳисобига рўй беради ва бу ерда тўғри чизикқа яқин кескин камайдиган модда концентрациясининг ўзгариши кузатилади. Бўлиниш чегарасидан узоқлашган сари турбулент диффузиянинг роли ошиб боради ва охирида ювётган фазанинг асосий массасида модда асосан турбулент диффузия натижасида кўчади. Фазанинг бу қисмида тақсимланаётган модданинг концентрацияси нисбатан секин

текис камайиб, ўзининг чегаравий мувозанатли концен-трацияси C^* га интилади.

Бир-бирига тегиб турган фазаларда тақсимланаётган мод-да концентрациясининг τ вақт мобайнида ўзгариши абвг чизиғи билан ифодаланади (1.3-расм). Чексиз вақт ўтгандан кейин, яъни $\tau = \infty$ да қаттиқ фазадаги модда концен-трацияси ҳам мувозанат концен-трацияси C^* гача камаяди.

Қаттиқ жисмларда масса ўтказувчанлик натижасида мод-да узатиш жараёни молекуляр диффузия учун бўлган Фик қонунарига бўйсунди.

Фикнинг 1-қонуни қуйидагича ифодаланади:

$$\bar{J} = -K \nabla C \quad (1.17)$$

бу ерда, C — концен-трация, J — модда оқимининг зичли-ги, ∇C — диффузияланаётган атомларнинг концен-трация градиенти бўлиб, $\nabla C = \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial C}{\partial z}$ Лаплас оператори билан аниқланади, K — масса ўтказувчанлик ёки қаттиқ жисмда-ги тақсимланаётган модданинг диффузия коэффиценти дейилади ва у қўзғалмас муҳитга модданинг диффузия на-тижасида кира олиш қобилиятини ифодалайди. Диффузия коэффицентиининг қиймати диффузияланаётган модданинг хоссаларига, муҳитнинг хоссаларига, температурага, бо-симга ва оз миқдорда диффузияланаётган модданинг кон-цен-трациясига боғлиқ бўлади.

Фикнинг 2-қонуни қуйидагича ифодаланади:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = K \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (1.18)$$

Масса ўтказувчанлик масаласининг ечими таъсирлаша-ётган фазалар чеграсидаги узатиш шартларини, яъни че-гаравий шартларни тавсифлайдиган тенглама ҳамда (1.18) тенгламани биргаликда ечиш билан боғланган.

1.4. ВАЗНСИЗЛИК ШАРОИТИДА ИССИҚЛИК ВА МАССА УЗАТИШ ЖАРАЁНИ

Узоқ вақтга мўлжалланган орбитал станцияларнинг яра-тилиши янги илмий-техник йўналишнинг шаклланишига сабаб бўлди. Бу йўналишнинг мақсади Ер шароитида олиш мумкин бўлмаган ёки ниҳоятда қимматга тушадиган юқори сифатли электрон техника материалларини космик фазо шароитларидан фойдаланиб олишдир.

Космик технологиянинг Ердаги технологиядан фарк қиладиган асосий омиллари қуйидагилар: 1) ўта қувватли радиацияли майдон; 2) ўта чуқур ва чексиз вакуум; 3) катта миқдордаги қуёш энергиясининг борлиги (250 км баландликда қуёш энергияси оқимининг зичлиги $\epsilon = 4 \text{ кВт/м}^2$ ни ташкил қилади); 4) Ердагига нисбатан оғирлик кучининг камлиги, $P = (10^{-3} \div 10^{-7}) g$ гача (яъни Ердагига нисбатан $10^3 \div 10^6$ марта кичик).

Материаллар олишнинг космик технологиясини ишлаб чиқиш учун вазнсизлик шароитида гидродинамика, иссиқлик ва масса алмашувларнинг қандай боришини билиш керак.

Вазнсизликнинг «назарий» ҳолати $g = 0$ нинг реал ҳолатдан қанчалик фарқланишининг миқдорий ўлчови g/g_0 ҳисобланади, бу ерда g_0 — оғирлик кучининг Ер сиртидаги тезланиши, g — орбитал учиш шароитидаги тезланиш. Орбитал станциянинг реал шароитдаги учишида $g/g_0 \approx 10^{-3} \div 10^{-6}$ бўлганлиги учун вазнсизликнинг реал ҳолати микрогравитация ёки кучсиз гравитация деб ҳам айтилади.

Вазнсизлик шароитида суюқликка ботирилган жисмга таъсир қилаётган кучларнинг тенг таъсир этувчисининг қиймати g/g_0 марта камаяди. Бу эса вазнсизлик шароитида қуйидаги технологик жараёнларга кенг имкониятлар яратади:

- суюқлик ҳажми ичида жисмларнинг, шулар қаторида суюқ массанинг эркин осилиб туриши ва силжиши;

- ташкил этувчиларининг зичлиги асосийдан катта ёки кичик бўлган ҳар хил турдаги кўп фазали структуралар яратиш (суюқликдаги пуфакча, суюқликдаги оғир заррачалар, суспензиялар);

- зичликлари ҳар хил бўлган, Ер шароитида аралашмайдиган компонентлардан янги қотишмалар ҳосил қилиш;

- суюқликдаги алоҳида заррачаларни жуда кам энергия сарф қилиб аралаштириш мумкинлиги гетероген структуралар яратишда ва чет аралашмани чиқариб ташлашда қўлланиладиган кўп фазали тизимларнинг динамикасини бошқариш учун ҳар хил вибрацияли таъсирлардан фойдаланиш имкониятини беради.

1.5. КИМЁВИЙ ЖАРАЁНЛАР

Кимёвий жараёнлар электрон техника материаллари технологиясида модда таркибининг кимёвий ўзгариши билан кечадиган энг асосий жараёнлардан бири ҳисобланади.

Кўп ҳолларда кимёвий технологик жараёндаги қонуниятлар бир-бири билан ўта мураккаб боғланган ва улар тенгламалар системаси кўринишида ифодаланади. Амалда бу тенгламаларни биргаликда ечиш мумкин эмаслиги сабабли кимёвий технологик жараёнларни таҳлил қилишда унинг энг керакли томонлари ажратиб олинади ва уларнинг ўзaro таъсири кўриб чиқилади. Тўлиқ назарий таҳлил асосида технологик режимлар танлаш ва кимёвий-технологик жараёнлар ўтказиладиган реакторлар ишлаб чиқиш термодинамик ва кинетик таҳлил ўтказишни талаб қилади.

Термодинамик таҳлилнинг асосий босқичлари қуйидагича: керакли маҳсулотни ҳосил қилиш учун технологик жараёни ишлаб чиқиш, бунда биринчи навбатда танлаб олинган хом ашёни қайта ишлашда кечадиган ҳамма кимёвий реакцияларни аниқлаш зарур; ундан кейин эса реакциянинг иссиқлик эффектлари ҳисобланади; реакцияларнинг ўз ҳолича кечиш имконияти таҳлил қилинади, яъни кимёвий мувозанат кўриб чиқилади. Изобар-изотермик ҳолатдаги тизимларда мувозанат изобар-изотермик потенциал катталигининг (Гибснинг эркин энергиясининг) шу шароит учун минимал қийматида, яъни $G = \min$ ёки $\Delta G = 0$ бўлганида ўрнатилади. Агар $\Delta G > 0$ бўлса, реакция ўз-ўзидан ўнгдан чап томонга, $\Delta G < 0$ бўлса чапдан ўнг томонга кечиш эҳтимоли кўпроқ бўлади.

Асосий реакциянинг мувозанати тўғрисидаги маълумотларга асосланиб, керакли маҳсулотнинг максимал чиқиши тўғрисидаги тасаввурга эга бўлиш мумкин. Термодинамик таҳлил асосида маҳсулот чиқишини кўпайтириш йўлини аниқлаш мумкин, реакция кечадиган оптимал шароит: температура, босимни танлаш ва бошланғич аралашманинг таркибини аниқлаш мумкин.

Термодинамик таҳлилдан кейин технологик шароитнинг оптимал ҳолатини белгилаш учун реакциянинг вақт бўйича кечиш характеристикасини ҳам билиш керак, яъни кинетик таҳлил ўтказилиши шарт.

Кимёвий реакцияларнинг кечиш тезлигига ҳар хил омиллар таъсир қилади. Умумий ҳолда кимёвий реакция тезлиги қуйидаги тенглама билан ифодаланади:

$$U = \frac{dC}{d\tau} = \kappa C^n, \quad (1.19)$$

бу ерда, $\kappa = \kappa_0 \exp\left(-\frac{E}{\kappa T}\right)$ — реакция тезлиги константаси дей-
илади; κ_0 — экспонента олдиди коэффициентлари ёки кўпайтма;
 E — активлаш энергияси; n — реакция тартиби; C — кон-
центрация. Умумий ҳолда,

$$U = k_0 e^{-\frac{E}{\kappa T}} C^n. \quad (1.20)$$

(1.20) тенгламадан тезлик температурага ва компонентлар
концентрациясига боғлиқ эканлиги келиб чиқади. Умумий
ҳолда реакция тезлигига босим (агар реакцияда газ фазаси
ҳам бор бўлса) ва катализаторлар ҳам таъсир қилади.

1.6. ҚАТТИҚ ФАЗАЛИ РЕАГЕНТ ВА МАҲСУЛОТЛАРНИНГ АКТИВ ҲОЛАТИ

Қаттиқ jismlarнинг реакцияга киришга олиш қobiliяти
фақат кимёвий ёки фазавий таркиб билангина аниқланиб
қолмаслиги унинг ўзига хос хусусиятларидан бири ҳисобланади.
Қаттиқ фазали реагентларнинг активлиги, хусусан, кристалл
панжарадаги нуқсонларнинг қандай ҳосил бўлганлиги
(реагентларни тайёрлаш ва қайта ишлаш усуллари, масалан:
ионлаштирувчи реакция, лазер ёки акустик нурланиш, урувчи
тўлқин ва ҳ.к.) билан аниқланадиган ҳолатларга боғлиқ бўлади.

Қаттиқ jismlarнинг *нормал ҳолати* деганда улардаги нуқ-
сонларнинг ҳолат параметрларининг бир қийматли функ-
цияси ҳисобланган панжаранинг хусусий тартибсизлиги на-
тижасида ҳосил бўлган ҳолатига айтилади. Бунга мос ҳолда
қаттиқ jismlarнинг *актив ҳолати* улардаги номувозанат-
ли нуқсонлар борлиги билан характерланади.

Қаттиқ фазанинг *активлик ўлчови* сифатида нормал
ҳолатдаги ўхшаш таркибли фазга нисбатан ундаги эркин
энергиянинг ортиқлиги тушунилади:

$$\Delta G^* = G^* - G_k, \quad (1.21)$$

бу ерда, G^* ва G — нормал ва актив ҳолатдаги фазанинг
эркин энергияси.

Қаттиқ фазаларнинг активлигини ошириш учун кўпинча
микроқўшилмалар қўшилади, яъни легирланади. Легирлаш-
нинг қаттиқ фазанинг активлигига таъсири микроқўшил-
манинг табиати, концентрацияси ва унинг матрицадаги тақ-
симланиш характериға боғлиқ бўлади.

1.7. ТЕХНОЛОГИК ЁНИШ

Ёниш реакциялари иккита хусусиятга эга:

1. Секин ҳажмий таъсирлашувдан жуда тез таъсирлашувга ўтишнинг критик шароитлари мавжуд бўлади; бундай ҳолда технологик ёниш режимларидан бири бўлган *иссиқлик портлаши* амалга ошади.

2. Кимёвий реакция модда бўйлаб ўзгармас тезлик билан мустақил тарқалиши мумкин; бунда технологик ёнишнинг яна бир режими — *ўз-ўзидан кечадиган юқори ҳароратли синтез* амалга ошади.

Электрон техника материалларини синтез қилишда (масалан, керамикали) ёниш реакциясидан фойдаланиш кукунлар аралашмаси асосида амалга оширилади. Бошланғич конденсирланган кукунлар аралашмасида ёнишни амалга ошириш учун қуйидаги шартлар бўлиши керак:

1. Ёнишнинг активлаш энергияси E шу жараённинг температураси T^* га тўғри келадиган молекулаларнинг иссиқлик ҳаракати энергиясидан катта бўлиши, яъни β нинг нисбати қуйидаги тенгсизликни қаноатлантириши керак:

$$\beta = \frac{RT^*}{E} \ll 0,025. \quad (1.22)$$

2. Ёниш реакцияси экзотермик бўлиши шарт. Унинг иссиқлик эффекти Q нинг қиймати маълум бир масштабли иссиқлик миқдоридан анча катта бўлиши керак.

$$\gamma = \frac{c_p \left(\frac{RT^*}{E} \right)}{Q} \ll 1, \quad (1.23)$$

бу ерда, c_p — иссиқлик сифими ($p = \text{const}$).

Бошланғич компонентларнинг ёниш реакциясига электрон техника материаллари синтезининг иккита технологик усули асосланган: 1) ўзи тарқаладиган юқори температурали синтез (ҲҲС); 2) энергиянинг қўшимча нокимёвий (электр) манбали иссиқлик портлаши (ЭИП).

Асосий технологик вазифа таркибида оралиқ маҳсулотлар бўлмаган мувозанатли кристалл структура ҳосил бўлиш бошланадиган бошланғич намунанинг минимал характерли ўлчамини аниқлашдан иборатдир. Бу структура ҳосил

диган кимёвий реакция вақти τ_k билан иссиқлик релаксацияси вақти τ_r ни солиштиришдан келиб чиқади:

$$\tau_k = \left[\frac{Q}{c_p} \frac{E}{RT^2} K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \right]^{-1}; \quad \tau_r = \frac{L}{a_r}, \quad (1.24)$$

бу ерда, K_0 — Аррениус қонунидаги экспонентаолди кўпайтмаси, L — намунанинг характерли ўлчами, a_r — температура ўтказиш коэффициенти.

Агар $\tau_k > \tau_r$ бўлса, унда структура ҳосил бўлиш жараёни охиригача амалга ошмайди ва номувозанатли кристалл панжара ҳосил бўлишига олиб келади. Агар $\tau_k \leq \tau_r$ бўлса, унда мувозанатли кристалл панжара ҳосил бўлади. τ_k ва τ_r нинг қийматлари бошланғич аралашмаларнинг таркибига боғлиқ бўлади.

Структура ҳосил бўлиш жараёнини ташқи физикавий майдонлар таъсирида фаоллаштириш мумкин. Масалан, ёнишда структура ҳосил бўлиш жараёнини тезлаштириш учун намунадан электр токи ўтишини таъминловчи электр майдонидан ЭИП усулида фойдаланилади. ЎЮС ва ЭИП усулларида эса ташқи босимдан фойдаланилади.

1.8. ХОМАШЁ МАТЕРИАЛЛАРИНИ ҚАЙТА ИНИЛАШ ЖАРАЁНЛАРИНИНГ ФИЗИК-КИМЁВИЙ АСОСЛАРИ

1.8.1. ҚАТТИҚ ЖИСМЛАРНИ МАЙДАЛАШ ВА АЖРАТИШ ЖАРАЁНЛАРИ

Технологик жараённинг тезлиги реагентлар контакт сиртларининг юзасига ва уларнинг ортиқча эркин энергиясига тўғри пропорционал бўлади. Шу сабабли яримўтказгичли ва диэлектрик материалларни қаттиқ хомашё моддалардан ҳосил қилишдаги кўпгина технологик жараёнлар интенсивлигини ошириш учун бошланғич материал бўлақчаларининг ўлчамлари кичрайтирилади. Бу жараён бўлақлаш дейилади. Кўпинча йирик бўлақларни майдалаш бўлақлаш, кичик бўлақларни майдалаш эса *талқонлаш* дейилади. Майдалаш қуруқ ёки нам ҳолда ўтказилиши мумкин. Энг

йирик бўлақлар қўндаланг ўлчамларининг майдалашгача ва майдалашдан кейинги нисбатлари *майдалаш даражаси* дейилади:

$$n = d_1/d_2, \quad (1.25)$$

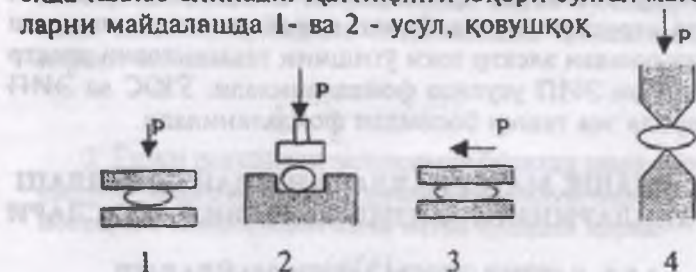
бу ерда, d_1 — бўлақнинг майдалашгача бўлган ўлчами, d_2 — бўлақнинг майдалашдан кейинги ўлчами.

Бир марта ишлов беришдаги майдалаш даражасининг қийматлари: йирик бўлақлар ($d_1 > 250$ мм) учун — $n = 2+6$; ўрта бўлақлар ($50 < d_1 < 250$ мм) учун — $n = 5+10$; майда бўлақлар ($20 < d_1 < 50$ мм) учун — $n = 10+50$; энг майда бўлақлар ($d_1 < 3$ мм) учун — $n > 60$ ни ташкил қилади. Керакли майдалаш даражаси бир неча марта бўлақлашдан кейин ҳосил қилинади.

Майдалашнинг бир қанча усуллари мавжуд:

1. Босиб майдалаш (1.4-расм, 1).
2. Уриб майдалаш (1.4-расм, 2).
3. Ишқалаб майдалаш (1.4-расм, 3).
4. Ёриб майдалаш (1.4-расм, 4).

Майдалаш усуллари материалнинг физик хоссалари асосида танлаб олинади. Қаттиқлиги юқори бўлган материалларни майдалашда 1- ва 2-усул, қовушқоқ



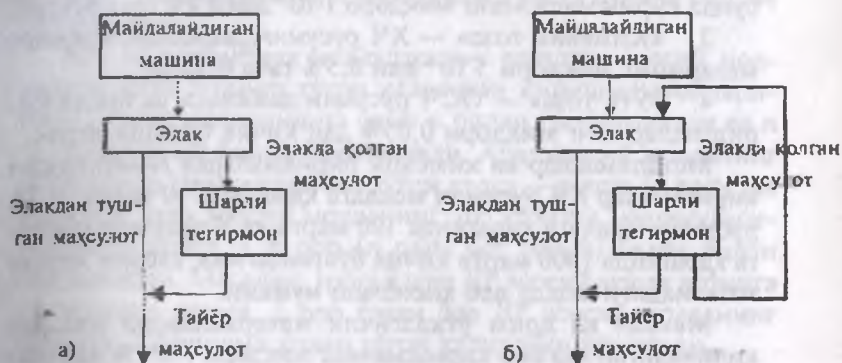
1.4-расм. Материалларни майдалаш усуллари.

материалларни майдалашда 3-усул, мўрт материалларни майдалашда эса 4-усулдан фойдаланилса, майдалашнинг самарадорлиги юқори бўлади.

Технологик жараён талабларига мос равишда бошлангич хомашёни майдалаш йирик, ўртача ва нозик майдалаш машиналарида амалга оширилади. Энг кўп тарқалган майдалаш машиналарига шарли, марказдан қочма ва ҳалқали тегирмонлар киради.

Майдаланган материалларнинг доналарини бир хил катталиқда бўлган фракцияларга ажратиш учун элакти аппаратлардан фойдаланилади.

Одатла нозик майдалаш майдалаш схемасида ажратиш операцияси билан бирлаштирилиб, очиқ ёки берк цикл бўйича амалга оширилади (1.5-расм).



1.5-расм. Материалларни майдалаш цикллариининг схемаси:
а-очиқ цикл; б-ёпиқ цикл.

Очиқ цикл бўйича ишланганда элакдан ўтмаган юқориги маҳсулот шарли тегирмонга тушади ва ундан чиқиб эланган пастки маҳсулот билан биргаликда технологик жараённинг кейинги босқичига ўтади. Ёпиқ циклда эса кейинги босқичга фақат берилган гранулали таркибли материал элак орқали ўтади, элакдан ўтмаган каттароқ доналар эса қайтадан майдаловчи агрегатга ўтиб майдаланиб яна элакка тушади.

Майдаланган материалларни ҳар хил технологик реакторларга аниқ миқдорда бир хил бериб туриш учун озиқлантиргич ёки дозатор деб аталадиган махсус механизмлардан фойдаланилади.

1.8.2. АЖРАТИШ ВА ТОЗАЛАШ ЖАРАЁНЛАРИНИНГ АСОСЛАРИ

Модда тозалигининг умумий характеристикаси. Материалларнинг кимёвий тозалиги деган тушунча ва уни белгилаш усуллари ҳар хил бўлиб, материалнинг қайси соҳада қўлланилишига боғлиқ бўлади. Агар модда таркибидаги чет киришмаларнинг миқдори асосий модданинг керакли хоссаларига таъсир қилмайдиган даражада кичик бўлса, *шу модда етарлича тоза ҳисобланади*.

Кимёвий ва металлургия амалиётида тоза моддалар учун тозаланиш даражасига боғлиқ ҳолда қуйидаги таснифлар белгиланган:

1. «Тоза» — Ч русумли дейилади ва бунда киришмаларнинг миқдори $2 \cdot 10^{-5}$ дан 1% гача бўлади.

2. «Таҳлил учун тоза» — ЧДА русумли дейилади ва бунда киришмаларнинг миқдори $1 \cdot 10^{-5}$ дан 0,4% гача бўлади.

3. «Кимёвий тоза» — ХЧ русумли дейилади. Киришмаларнинг миқдори $5 \cdot 10^{-6}$ дан 0,5% гача бўлади.

4. «Ўта тоза» — ОСЧ русумли дейилади ва бунда киришмаларнинг миқдори 0,05% дан кичик бўлиши керак.

Металлмаслар ва кимёвий бирикмаларда лимитланган киришмалар ХЧ русумли моддага қараганда 10 марта, ЧДА русумли моддага қараганда 100 марта ва Ч русумли моддага қараганда 1000 марта кичик бўлгандагина, уларни юқори тозаликдаги модда деб ҳисоблаш мумкин.

Металл ва ярим ўтказгичли материалларда назорат қилинадиган ҳар бир киришманинг миқдори $1 \cdot 10^{-4}$ % дан ошмаса (масса бўйича) ҳамда газларда ҳар бир назорат қилинадиган киришмаларнинг миқдори $1 \cdot 10^{-3}$ % ошмаса (ҳажм бўйича), улар юқори тозаликдаги моддалар деб ҳисобланили.

Юқори тозаликдаги моддаларга назорат қиланадиган киришмаларнинг сони ва концентрациялар йиғиндисига боғлиқ ҳолда ВЭЧ ва ОСЧ русумлари берилади.

ВЭЧ русумли моддаларда ҳам киришмаларнинг умумий миқдори, ҳам пастроқ сатҳда баъзи бир кераксиз киришмаларнинг сони ва миқдори чегараланади. ВЭЧ белгидан аввал киришмаларнинг умумий миқдорини кўрсатувчи сон ёзилади, ундан кейин эса тире орқали иккита сон: биринчиси кераксиз киришмаларнинг чегараланган сонини, иккинчиси эса бу киришмалар миқдори йиғиндисининг манфий даража кўрсаткичини кўрсатадиган сон ёзилади. Масалан: 003 ВЭЧ 4-5 русуми умумий киришмалар миқдори 0,003% лигини, яъни асосий модда миқдори 99,997% эканлигини, кераксиз киришмалар сони 4 та билан чегараланганлигини ва уларнинг йиғиндиси $n \cdot 10^{-4}$ % бўлишини кўрсатади.

ОСЧ русумли моддаларда жуда ҳам паст сатҳда катта сондаги кераксиз киришмалар миқдори чегараланади. ОСЧ белгисидан кейин тире орқали иккита сон келади: биринчи сон берилган ўта тоза моддада чегараланган киришмалар сонини, иккинчиси эса шу киришмалар миқдори йиғиндисининг манфий даража кўрсаткичини кўрсатади. Ма-

салан: ОСЧ 10-5 русумли ўта тоза SiO_2 да чегараланган киришмалар сони 10та бўлиб (Al, B, Fe, Ca, Mg, Na, P, Ti, Sn, Pb), уларнинг умумий миқдори эса масса бўйича $1 \cdot 10^{-5} \%$ дан ошмайди.

Чет эл адабиётида моддаларнинг тозалиги асосий модданинг 1000 атомига тўғри келадиган киришма атомларининг (молекулаларининг) сони n билан таснифланади ва $n \text{‰}_{\text{oo}}$ (n promille) билан белгиланади. Агар асосий модданинг 10^6 атомига (молекуласига) тўғри келса — n ppm (n parts per million), агар асосий модданинг 10^9 атомига (молекуласига) тўғри келса — n ppb (n parts per billion) белги билан белгиланади. Масалан: 1ppm ёзуви 10^6 асосий модда атомига 1 киришма атоми, 1 ppb ёзуви эса 10^9 асосий модданинг атомига 1 киришма атоми тўғри келишини кўрсатади.

Бундан ташқари юқори даражали тоза моддаларни белгилаш учун N символдан фойдаланилади ва моддалар сифат бўйича сонли индекс орқали фарқланади. Бунда N нинг олдида турган сон асосий компонентнинг процентда ифодаланган концентрациясидаги 9ларнинг умумий миқдори кўрсатади. N дан кейинги сон эса шу соннинг охири сони ҳисобланади. Масалан: $5N8 = 99,9998 \%$, $2N5 = 99,5 \%$, $3N3 = 99,93 \%$. Агар ўта тоза модда олиш учун зонали эритиш усули қўлланилган бўлса, унда Z ҳарфи қўшилади. Масалан: $6N(Z) = 99,9999 \%$.

Янада аниқроқ бўлиши учун кўпинча ҳар бир назорат қилинаётган киришманинг миқдори кўрсатилади. Бунда таркибида масса бўйича $1 \cdot 10^{-2}$, $2 \cdot 10^{-3} \%$ киришмалар бўлган материаллар деб айтилади ёки материалнинг бир куб метрида (ёки сантиметрида) бўлган киришма атомларининг сони дейилади ва 10^{17} , 10^{24} ат/м³ каби кўрсатилади.

Ажратиш ва тозалаш жараёнларининг умумий характистикаси. Диэлектрик ва яримўтказгичли материаллар ҳамда уларнинг компонентларини чуқур тозалашнинг ҳамма усуллари ажратиладиган компонентларнинг кимёвий, физикавий ва физик-кимёвий хоссаларининг ҳар хиллигига асосланган.

Яримўтказгичли ва диэлектрик фазадаги материалларни ажратиш ва тозалаш асосий жараёнларининг таснифи қуйидагича:

1. Сорбцияга асосланган жараёнлар. Бунга адсорбцияли, ион алмашиш ва хроматография жараёнлари киради.
2. Суюқлик экстракциясига асосланган жараёнлар.

3. Кристалланиш жараёнлари.

4. Газ фазаси орқали ҳайдашга боғлиқ жараёнлар. Бунга сублимация, дистилляция, ректификация ва кимёвий транспорт жараёнлари киради.

5. Электролизга асосланган жараёнлар.

6. Диффузия коэффициентларининг ҳар хиллигига асосланган жараёнлар.

7. Танлаб ўтказиш, оксидлаш ва қайтарилиш жараёнлари.

Ҳар бир индивидуал материални тозалаш учун энг самарали усулни ёки усулларни танлашда шу материалнинг ва унинг бирикмаларининг аниқ физик-кимёвий хоссалари эътиборга олинади.

1.8.3. СОРБЦИЯЛИ ЖАРАЁНЛАР ЁРДАМИДА МОДДАЛАРНИ АЖРАТИШ ВА ТОЗАЛАШ

Моддаларнинг икки фаза чегарасида: қаттиқ ва суюқ, қаттиқ ва газсимон, суюқ ва газсимон чегараларда сиртга (*адсорбция*) ва ҳажмга (*абсорбция*) ютилиши *сорбцияли жараён* дейилади.

Сорбцияли жараёнлар яримўтказгичлар ва диэлектрикларнинг замонавий технологиясида энг асосий рол ўйнайди, чунки улар физик-кимёвий хоссалари бир-бирига жуда яқин бўлган моддаларни бир-биридан ажратиш имкониятини беради.

Яримўтказгичлар ва диэлектриклар технологиясида суюқ фазада эриган моддаларни қаттиқ сорбентларга юттиришга асосланган ажратиш ва тозалаш жараёнларининг турлари кўпроқ қўлланилмоқда. Булар асосан *адсорбция*, *ион алмашиш* ва *хроматография* жараёнларидир.

Адсорбцияли тозалашнинг моҳияти. Адсорбция тизими *адсорбентдан* (юзасига ютиб олувчи модда) ва *адсорбатдан* (молекулалари ютилаётган модда) ташкил топади. Адсорбция *физикавий* ва *кимёвий* турга бўлинади. *Физикавий адсорбцияда* адсорбат молекулалари адсорбент билан физикавий (Ван Дер Вальс кучлари) боғланади. *Кимёвий адсорбцияда* (*хемосорбция*) адсорбат молекулалари адсорбент билан кимёвий бирикиб юзада кимёвий бирикма ҳосил қилади.

Адсорбцияга тескари жараён, яъни юзадан молекулаларнинг чиқиб кетиши *десорбция* дейилади. Физикавий адсорбцияда, кимёвийдан фарқли ўлароқ, тескари жараён қузатилиши мумкин. Десорбция жараёнидан ҳам тозалаш усули сифатида фойдаланиш мумкин. Адсорбция танловчи жара-

ён бўлиб, адсорбентнинг юзасига фақат сиртқи қатламнинг эркин энергиясини камайтирувчи моддаларгина ютилади.

Шундай қилиб, эритмадаги моддаларнинг адсорбциялик қобилиятларининг ҳар хиллигидан фойдаланиб, тозалаш ва ажратиш жараёнларини ўтказиш мумкин. Бунда моддалардан биттаси адсорбентга ютилади, иккинчиси эса эритмада қолади.

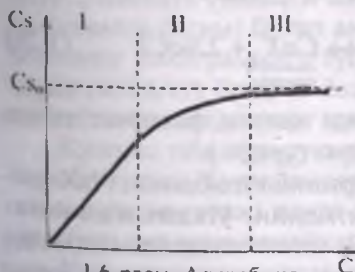
Адсорбция тизимининг миқдорий характеристикаси сифатида *адсорбция изотермасидан* фойдаланилади (1.6-расм). У эритмадаги модда концентрацияси C нинг ўзгармас температурада мувозанат ҳолатда адсорбентнинг бирлик юзасига ютилган миқдори C_s билан боғланишини ифодалайди. 1.6-расмда келтирилган боғланишдан эритмадаги модда концентрациясининг ошиши унинг адсорбцияланган ҳолатдаги модда миқдорининг ошишига олиб келиши кўриниб турибди. Бошланғич I участкада эритмадаги модда концентрацияси ошиши билан унинг ютилаётган миқдори ҳам ошиб боради ва бу боғланиш тўғри пропорционал бўлади. Ташқи фазадаги модда концентрациясининг ундан кейинги ошиши билан бу боғланиш анча сусаяди (II участка). Катта концентрацияларда изотерма C_s асимптотага интилади (III участка). Изотерманинг бундай характери адсорбент юзасининг ютиладиган модда билан секин-аста тўйиниб бориши билан тушунтирилади.

Адсорбция жараёнининг иккинчи миқдорий характеристикаси температуравий боғланишни ва адсорбция мувозанатининг механизмини характерлайдиган *адсорбция иссиқлиги* ҳисобланади. Унинг катталиги физик адсорбцияда конденсация иссиқлигига яқин бўлиб, оддий молекулалар учун 4÷20 МЖ/кмол, мураккаб молекулалар учун 40÷80 МЖ/кмол атрофида бўлади. Кимёвий адсорбцияда хемосорбция иссиқли-

ги кимёвий реакция иссиқлигига яқин бўлиб, 40÷400 МЖ/кмол атрофида бўлади.

Энг кўп тарқалган сорбентларга силикагеллар, активланган кўмир ва бошқа кучли коваллаштирилган алюминосиликатлар мисол бўлади.

Силикагел кремний кислотасининг қуритилган гели бўлиб, глобуляр структурага эга. Силикагел ғадир-будурли



1.6-расм. Адсорбция изотермаси.

говак тизимига эга бўлиб, уларнинг ўлчамлари ва шакллари сферик заррачаларнинг ўлчамлари ва тахланиш зичлигига боғлиқ. Сферик заррачаларнинг сиртлари говакларнинг ички сиртларини ташкил қилади. Бу говакларнинг солиштирма сирти силикагелнинг тайёрланиш технологиясига боғлиқ бўлиб, $(3\div 7) \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{кг}$ атрофида бўлади. Силикагел гетерополяр сорбент бўлиб, поляр ва кучсиз поляр моддаларни яхши ютади ҳамда у самарали қуритгич сифатида ҳам маълум.

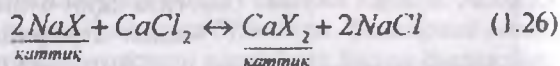
Ион алмашиши ёрдамида тозалашнинг моҳияти. Ион алмашиш деганда сувоқ эритма ва у билан алоқада бўлган эримайдиган қаттиқ модда орасида бир хил зарядли ионларнинг ўзаро қайтувчан алмашинуви тушунилади. Ионлар алмашинишини амалга ошираётган қаттиқ жисм *ионит* ёки *ион алмаштиргич* дейилади. Фақат мусбат ионлар алмашиладиган ионит *катионит*, манфий ионлар алмашиладигани эса *анионит* дейилади. *Амфотер* ионитлар бир вақтнинг ўзида катион ва анион алмашишларни амалга оширади.

Ион алмашиш стехиометрик ўринни олиш каби бўлиб, эритмадан ютилаётган ионнинг ҳар бир эквиваленти ўрнига ионит шу эритмага заряд ишораси бир хил бўлган бошқа ионнинг бир эквивалентини беради. Мана шу билан ион алмашиш адсорбция жараёнидан фарқ қилади.

Ионитлардан фойдаланиб эритмадан маълум турдаги ионни бутунлай чиқариб олиш мумкин. Бунинг учун тозаланадиган эритма ионит доначалари билан тўлдирилган ион алмашгичли реакция колонкасидан ўтказилади.

Куйида ион алмашиш реакцияларига доир мисолларни кўриб чиқамиз.

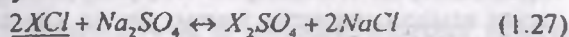
Масалан, катионли алмашиш реакциясида кальций ионини чиқариб олиш куйидагича бўлади:



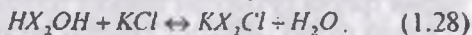
(бу реакцияда ва кейингиларида қаттиқ фазанинг тагига чизилган; X — ионитнинг маълум гуруҳи).

Бу реакциядан шу нарса кўриниб турибдики, NaX қаттиқ ионит қатлами орқали эритманинг ўтказилиши натижасида эритмадаги Ca^{2+} ионлари ионит томонидан ютилади эритмага эса Na^{1+} ионлари ўтади, яъни ион алмашиниши кузатилади.

Анионли алмашиш реакциясига умумий мисол тариқасида эритмадан $(\text{SO}_4)^{2-}$ ионини чиқариб олиш реакциясини келтириш мумкин:



Бир вақтнинг ўзида катион ва анион алмашилишида амфотерли ионитлардан фойдаланиладиган реакцияга мисол:



Ионит ишининг самарадорлигини ва унинг танлаб ажрата олиш характеристикасини баҳолаш учун *ажратиш коэффициенти* киритилади. Бу коэффициент ионитнинг А ва В ионларини миқдорий жиҳатдан ажрата олиш қобилиятини кўрсатади.

Ажратиш коэффициенти K_B^A ионит ва эритмадаги А ва В ионлар эквивалент қисмлари нисбатларининг нисбати билан ифодаланади:

$$K_B^A = \frac{\gamma_A}{\gamma_A} \cdot \frac{\gamma_B}{\gamma_B} = \frac{\gamma_A \gamma_B}{\gamma_A \gamma_B} \quad (1.29)$$

Агар ионит А ионларни кўпроқ ютса, унда $K_B^A > 1$, агар В ионларни кўпроқ ютса, унда $K_B^A < 1$ бўлади. K_B^A нинг қиймати бирдан қанча каттароқ миқдорга фарқ қилса, ионитнинг селективлиги шунча юқори бўлади.

Сорбентнинг энг зарур физик-кимёвий характеристикаси унинг сигими бўлиб, у эритмадан чиқариб олинадиган компонентнинг сорбент томонидан ютиш қобилиятини кўрсатадиган миқдорий ўлчов ҳисобланади. Сигим берилган ҳажмдаги эритмани тозалаш учун қанча миқдордаги сорбент кераклигини билдиради.

Сорбентларнинг сигими кўпинча сорбентнинг масса бирлигига нисбати (массали сигим) ёки ҳажм бирлигига нисбати (ҳажмий сигим) билан аниқланади. Кўпинча у қуруқ сорбентнинг килограммига тўғри келадиган миллиэквивалентларда (мэкв/кг) ёки 1 м^3 ёки 1 кг сорбентга тўғри келадиган адсорбланган модданинг килограммларида ифодаланади.

Кўпгина табиий ва сунъий моддалар ионитлик хоссаларини намоён қилади. Булардан асосийлари синтетик смола ва қўмир асосидаги ионитлар ҳамда баъзи бир минералли ионитлардир (ҳар хил алюмосиликатлар, оксидлар ва шу қабилилар).

Ион алмашиш жараёни қайтувчан жараён бўлганлиги учун ионитдан кўп марта фойдаланилади. Ионит ажрати-

лиши керак бўлган ионлар билан тўйинганидан сўнг ион алмашиниш реакцияси тўхтатилади. Шундан сўнг ионит адсорбцияланган В ионларни чиқариб, унинг ўрнига А ионларни алмаштирадиган эритма билан ювилади. Бу жараён ионитни *регенерациялаш* дейилади.

Хроматография ёрдамида ажратишнинг моҳияти. Хроматография грекча сўзлардан ташкил топган (хромас — ранг, графо — ёзиш) бўлиб, «рангни ёзаман» деган маънони билдиради.

Хроматография моддаларни чуқурроқ ажратиш ва тозалашда кенг қўлланилади. Ҳамма хроматографик усуллар ажралиши керак бўлган аралашма компонентларининг сорбентга ҳар хил сўрилишига асосланган. Бу ажралиши керак бўлган аралашма компонентларининг ғовак сорбцияли муҳитда ҳар хил тезлик билан ҳаракатланишига сабаб бўлади. Аралашмадаги ҳар бир компонентнинг ҳаракат тезлиги уларнинг сўрилиш даражасига тескари пропорционал бўлади. Бунинг натижасида аралашмалар бир қатор йўл ва зоналарга ажралиб, хроматограммани ҳосил қилади. Ажралган компонентлар кейин механик усулда бир-биридан ажратилади.

Хроматографик усул деб ажратишнинг шундай усулига айтиладики, бунда ажратиладиган компонентлар икки фаза ўртасида — кучли ғадир-будурли сиртга эга бўлган, ғовак, ҳаракатсиз қаттиқ ҳолдаги ютувчи қатлам ва мана шу қатлам орқали филтрланаётган суюқ эритма оқимлари орасида тақсимланади.

Ажралаётган аралашманинг ва ютувчининг агрегат ҳолатларига қараб хроматография усуллари тўрт турга бўлинади (1.1-жадвал).

1.1-жадвал

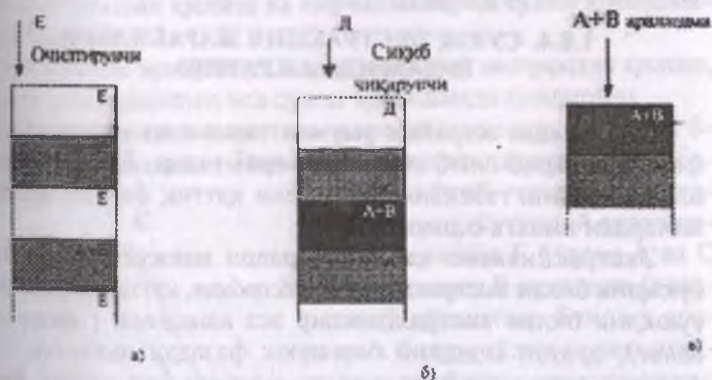
Ажралган аралашма ва ютувчининг агрегат ҳолати	Хроматография усуллари			
	Суюқликли-адсорбция	Газли-адсорбция	Суюқликли тақсимловчи	Газли-суюқликли
Қуғалмас қатлам	Қаттиқ жисм	Қаттиқ жисм	Суюқ ютувчи қаттиқ жисмда	
Қуғалувчан қатлам	Суюқтик	Газли аралашма	Суюқтик	Газли аралашма

Хроматографияли ажратиш жараёнлари уларни амалга оширишнинг шакллари бўйича бир-биридан анча фарқ қилади. Мисол тариқасида суюқликли - адсорбция хроматографияни кўриб чиқамиз. Унинг учта усули мавжуд:

1. Очиштирувчи.
2. Сиқиб чиқарувчи.
3. Фронтал.

Мана шу усулларни А ва В компонентлардан ташкил топган аралашмани ажратиш мисолида кўрамиз. Бунда В модда А га қараганда адсорбцияланиши кучлироқ бўлсин.

1. *Очиштириш усули (элюэнт ёки ювиш усули).* Бу усулда сорбентли колонканинг тепа қисмига ажратиладиган А+В аралашмаси киритилади ва у шу заҳоти адсорбцияланади. Шундан сўнг колонка орқали А ва В компонентларнинг иккаласига нисбатан адсорбентга кучсизроқ сўриладиган суюқлик (очиштиргич) Е ўтказилади. Очиштиргич адсорбцияланган А ва В компонентлар бўлган қатлам орқали ўтиб, секин-аста иккита компонентни ювиб туша бошлайди. Бироқ А компонент кучсиз адсорбцияланганлиги учун кўпроқ ювилади. Маълум бир вақтдан сўнг А ва В компонентлар ҳар хил адсорбция зоналарига ажралади (1.7-расм, а). Охирида тоза очиштиргич ёрдамида бир-биридан ажриатирилган А ва В компонентлар колонкадан ювувчи суюқлик билан биргаликда алоҳида-алоҳида чиқариб олинади.



1.7-расм. Хроматографиянинг учта усули билан ажратилаётган А+В аралашмадаги компонентлар тақсимланиш схемаси:
а-очиштирувчи; б-сиқиб чиқарувчи; в-фронтал.

2. *Сиқиб чиқарувчи усул (сиқиб чиқариш билан очиштириш).* Бу усулда ювувчи суюқлик сифатида иккала А ва В компонентга қараганда ҳам кўпроқ адсорбцияланадиган Д

суюқлиги (сиқиб чиқаргич) қўлланилади. Натижада аралаш-
манинг иккала компоненти А ва В сиқиб чиқарувчи Д томо-
нидан адсорбентдан сиқиб чиқарилади. Бунда А компонент
кучсиз адсорбциялангани сабабли тезроқ сиқиб чиқарилади.
Бу компонентларнинг ажралишига олиб келади (1.7-расм,
б), лекин бунда алоҳида бўлган А ва В зоналардан ташқари
иккала компонент бўлган ораліқ зона ҳам мавжуд бўлади.

3. *Фронтал усул*. Бу усулда колонка орқали фақат ажра-
ладиган аралашма ўтказилади. А компонент кучсизроқ ад-
сорбцияланганлиги учун компонентларнинг ажралиши рўй
беради (1.7-расм, в). Бу усул кучсиз адсорбцияланадиган А
компонентнинг тоза ҳолдаги маълум бир миқдорини ажра-
тиб олиш имкониятини беради.

Хроматографиянинг бу усулларида адсорбент сифатида
активланган кўмир, силикагель, алюминийнинг актив ок-
сиди ва ҳоказолар қўлланилади.

Хромографик усул мураккаб аралашмалардан ионлари
бир-бирига яқин бўлган компонентларни ажратиш олишда
(масалан, кам учрайдиган камёб металллар ионларини аж-
ратишда) қўлланилади.

1.8.4. СУЮҚ ЭКСТРАКЦИЯ ЖАРАЁНЛАРИ ЁРДАМИДА АЖРАТИШ

Экстракция жараёни умуман танланган моддани суюқ
фазага чиқариб олиб ажратиш жараёнидир. Бунда чиқариб
олиб ажратиш газсимон, суюқ ёки қаттиқ фазали аралаш-
малардан амалга оширилади.

Экстракциянинг ҳар хил турлари мавжуд бўлиб, газни
суюқлик билан экстракциялаш *абсорбция*, каттиқ jismlарни
суюқлик билан экстракциялаш эса *ишқорлаш* (*выщелачи-
вание*), эриган моддани бир суюқ фазадан иккинчи суюқ
фазага экстракциялаш *суюқ экстракция* ёки оддий қилиб
экстракция дейилади.

Суюқ экстракцияда эриган моддани бир суюқ эритув-
чидан бошқа суюқ эритувчи ёрдамида чиқариб олиш жара-
ёни юз беради. Бунда иккита эритувчи бир-бири билан ара-
лашмаслиги шарт.

Ҷримўтказгичлар ва диэлектриклар технологиясида эри-
ган модданинг экстракцияси ўтказиладиган суюқлик си-

фатида сув ишлатилади. *Экстрагент* деб аталадиган, унинг ёрдамида экстракция ўтказиладиган иккинчи суюқлик сифатида эса органик табиатли суюқликдан фойдаланилади. Одатда экстрагент деганда тоза эритувчи эмас, балки реагент (ажратиб олинадиган модда билан кимёвий бирикадиган компонент) ва суюлтирувчидан (қовушқоқликни камайтириш учун) ташкил топган суюқлик тушунилади.

Қўлингча эриган модда экстракцияланадиган сувли эритгич таркибига тузловчи деб аталадиган (туз ёки кислота кўринишидаги) модда қўшилади. Бу модда экстракцияланаётган бирикма билан бир хил номли ионга эга бўлиб, унинг эрувчанлигини камайтиради ва сувли қоришмадан ажралиш даражасининг ошишига олиб келади.

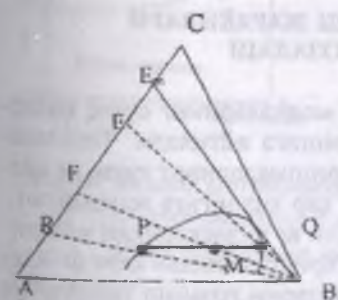
Суюқ экстракция яримўтказгичлар ва диэлектриклар технологиясида кенг қўлланилади ва унинг ёрдамида қуйидаги вазифалар ҳал қилинади:

1. Иккита модда аралашмасини ҳар хил эритувчиларда концентрацияланган ҳолда алоҳида ажратиш (масалан, сув ва органик эритувчида).

2. Аралашмадаги асосий компонентни органик эритувчига экстракция қилиш ва киришмаларни сувли қоришмада қолдириш.

3. Органик эритувчига киришмаларни экстракция қилиш, асосий компонентни эса сувли қоришмада қолдириш.

Экстракцияли ажратиш жараёнининг моҳиятини 1.8-расмда келтирилган уч компонентли ҳолат диаграммаси ёр-



1.8-расм Бир босқичли экстракцияда олинаётган маҳсулотларнинг таркиби ва миқдори.

дамида кўриб чиқамиз. Бир-бири билан бутунлай аралашадиган, таркиби F бўлган A ва C суюқликларга B эритувчи (экстрагент) қўшилган. Бунда у аралашма билан тўлиқ аралашмайдиган ва битта компонентни танлаб олиб, масалан, бизнинг мисолимизда C ни, эритадиган (экстракциялайдиган) бўлиши керак. Бунда учланган тизимнинг таркибига мос келувчи нуқта FB чизиғи бўйлаб ҳаракат қилади. Қўраётган мисолимизда ҳосил

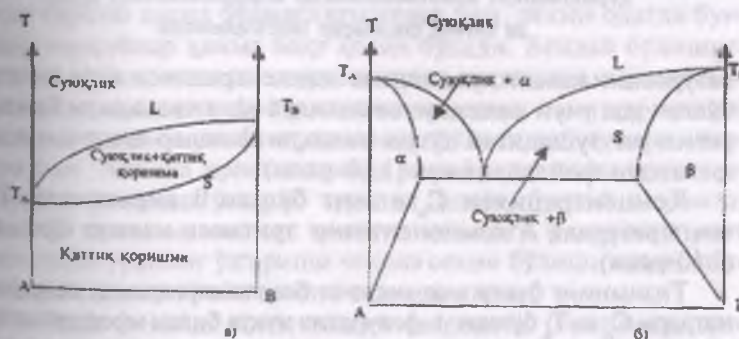
аралашма миқдори билан эк-
 нисбат M нуқтага мос келсин.
 ниши натижасида ҳосил бўла-
 таркиби M нуқта орқали ўтка-
 билан аниқланади. Q нуқтага
 таркиби юқори ва бу
 ритувчининг фазаси дейилади.
 эритувчининг миқдори кам
 эки қолдиқ фаза деб аталади.
 иридан ажратиб ва ундан эри-
 дистилляция ёки ювиш билан)
 ҳолда таркиби E ва R бўлган
 ниши. Бошланғич F таркибли ара-
 лашма кўпроқ, R аралашма эса
 бўлади. Бундан кейин R рафи-
 фазалар ажратилиб ва экстрагент
 миқдори янада кам бўлган янги
 ҳолати. Шундай йўл билан бош-
 лашмадан кўп босқичли (даврий)
 даражали тозаликдаги A ком-
 нентни олиш масаласига келсак,
 ҳолатида мумкин бўлган макси-
 мумдан бинодал эгри чизиққа
 асосан AS чизиқнинг кесишиш нуқтаси
 аниқланади (1.8-расм).

КРИСТАЛЛАНИШ ЖАРАЁНЛАРИ ЁРЛАМИДА ТОЗАЛАШ

Жараён деб моддаларнинг суюқ ҳолат-
 ларга ўтишига айтилади. Тозалаш-
 лари киришмаларнинг суюқ ва қат-
 тикнинг ҳар хиллигига асосланган.
 ўтказгичли ва диэлектрикли матери-
 алларни кристаллашдан кенг фойда-
 ланиш моддаларни тозалаш технологик
 босқичида қўлланилади.
 кристаллаш жараёнлари ёрламида тозалаш-
 ларнинг унлаги киришмалар билан
 ҳолати диаграммасини билиш

шарт. Кристаллаш усуллари тозалаш жараёнининг охириги
 босқичида қўлланилгани сабабли моддадаги қолдиқ кириш-
 малар миқдори жуда кам бўлади ва уларнинг ўзаро ёки асо-
 сий материал билан таъсирлашуви амалда кузатилмайди.
 Шу сабабли келтирилган фазалар диаграммаси анча их-
 чамлашади ва мураккаб кўп компонентли тизимнинг фаза-
 лар диаграммасидан бинар тизимнинг асосий компонент — ки-
 ришма фаза диаграммасига ўтиш мумкин.

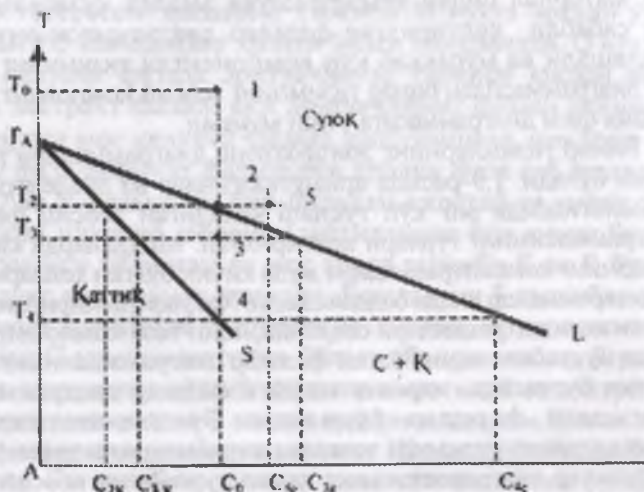
Бинар тизимларнинг эриш-қотиш диаграммалари турли-
 туман бўлади. 1.9-расмда яримўтказгичлар ва диэлектриклар
 технологиясида энг кўп тўқнаш келадиган асосий фазалар
 диаграммасининг турлари келтирилган. Моддаларда кириш-
 маларнинг концентрациялари жуда кичик бўлган ҳоллари учун
 бу диаграммалар янада соддалашади. Ҳақиқатда киришманинг
 кичик концентрациялари соҳасида, яъни тоза компонентнинг
 эриш нуқтасига яқин бўлган фазалар диаграммасининг бош-
 ланғич бурчагида ҳар хил типдаги фазалар диаграммалари
 орасидаги фарқлар йўқолади. Бунинг натижасида
 кристалланиш ёрдамида тозалаш жараёнларини тавсифлаш-
 да фазалар диаграммасининг ҳамма турларини асосий ком-
 понентнинг эриш нуқтасидан ликвидус ва солидус чизиқла-



1.9-расм. Фазалар диаграммасининг асосий турлари: а-узлуksиз қаттиқ
 ва суюқ қоришмаларнинг ҳолат диаграммаси; б-α ва β соҳали
 қаттиқ қоришмалар эвтектикали ҳолат диаграммаси.

рига уринма қилиб ўтказилган иккита чизиқ билан алмаш-
 тириш мумкин. Агар киришма эритманинг температураси-
 ни камайтирса, бу чизиқлар пастга йўналади, агар ошир-
 са, тепага йўналади.

Энди бинар тизимли суюлтирилган қоришмани кристалланиш жараёналари ёрдамида тозалашнинг принципини кўриб чиқамиз. Бунда қоришма қоришманинг эриш темпе-



1.10-расм. А компонентда эритилган В компонентли суюлтирилган қоришманинг кристалланишида қоришмаларнинг суюқ ва қаттиқ фазада тақсимланиши.

ратурасини камайтирадиган ва концентрацияси жуда кичик бўлган ҳол учун ликвидус ва солидус эгри чизиқлари билан устма-уст тушадиган тўғри чизиқли фазалар диаграммаси қисмидан фойдаланамиз (1.10-расм).

Концентрацияси C_0 га тенг бўлган В қоришмани T_0 температураси А компонентнинг эритмаси мавжуд бўлсин (1.10-расм).

Тизимнинг бунга мос келувчи бошланғич ҳолати координатлари C_0 ва T_0 бўлган 1-фигуратив нуқта билан ифодаланади.

Температура пасайтирилганда фигуратив нуқта вертикал чизиқ бўйича пастга ҳаракатланади ва тизимнинг кетма-кет ҳолатларини белгилайди. 2-нуқта вертикал траекториянинг ликвидус чизиги билан кесишган нуқтаси бўлиб, эритма кристалланишининг бошланиш температурани аниқлайди. Бу температурада кристалланишнинг бошланиш температура билан белгиланадиган 2-нуқтадан ўтказилган горизонтал чизиқнинг солидус чизиги билан кесишишдан аниқланадиган таркиби C_{2K} бўлган қаттиқ фаза ҳосил бўлади.

Температуранинг бундан кейинги пасайишларидан то кристалланишнинг охиригача тизимнинг ҳолати иккита нуқта билан ифодаланади. Бу эса тизимда бир вақтнинг ўзида бири бири билан мувозанатда бўлган иккита фазанинг борлигини кўрсатади. Бу нуқталарнинг биттаси солидус чизигида бўлиб, қаттиқ фазанинг таркибини беради, иккинчиси эса ликвидус чизигида бўлиб, суюқ фазанинг таркибини беради. Эриш интервали S_0 вертикал чизигининг солидус ва ликвидус чизиқлари билан кесишиш нуқталарининг ўринлари билан аниқланади. 4-нуқтага мос келадиган температурада суюқ фаза бутунлай йўқолади ва тизим яна бир фазали бўлиб қолади, қаттиқ фазанинг таркиби эса суюқликнинг бошланғич таркиби S_0 билан бир хил бўлиши керак. Температуранинг кейинги пасайиши билан қаттиқ фазанинг таркиби ўзгармайди. Агар ҳароратни оширадиган бўлсак, шу ҳолатларни тизим тескари кетма-кетликда босиб ўтади.

Демак, кўриб ўтилганлардан шундай хулоса чиқадики, бунда кристалланаётган қуйманинг таркиби бошланғич эритма таркибидан фарқ қилиши керак эмас ва бир фазали соҳадаги эритманинг таркиби каби бўлиши керак. Шундай қилиб, кристалланаётган материалда бир жинсли бўлмаган таркиб ҳосил бўлмаслиги керак эди, лекин одатда бундай таркиблар ҳамма вақт ҳосил бўлади. Бундай бўлишига сабаб кристалланиш жараёнининг таҳлилида термодинамик ёндашишдан фойдаланганликдадир, яъни ҳар қандай вақтда тизим мувозанат ҳолатида бўлади деб хулоса қилинган. Аслида кристалланиш жараёнида температура узлуксиз равишда ўзгариб туради. Демак, бундай шароитда тизим янги мувозанат ҳолатга келишга улгуриши учун температуранинг ўзгариши чексиз секин бўлиши шарт, яъни квазистатик жараён амалга ошиши керак.

Реал тизимда янги ташқи шароитга (температурага) жавоб берадиган мувозанат суюқ ва қаттиқ фазаларда компонентларнинг диффузияси билан боғлиқ механизмли жараёнлар ёрдамида амалга ошади. Суюқ фазадаги диффузия коэффициенти қаттиқ фазадагига қараганда бир неча тартиб юқори бўлади. Масалан, 800°C ли температурада германийда индийнинг диффузия коэффициенти $2 \cdot 10^{-17} \text{ м}^2/\text{с}$ га тенг бўлса, суюқ германийда эса шу коэффициент $10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ атрофида бўлади. Шу сабабли эритмада мувозанатга келиш тезлиги қаттиқ фазадагига қараганда анча катта бўлади.

Реал шароитда, яъни қаттиқ фазада диффузиянинг жуда ҳам кичик бўлган шароитдаги эритманинг кристалланиш жараёнини кўриб чиқамиз. Бунда кристалланиш жараёни эритмада ва фазаларнинг бўлиниш чегарасидаги мувозанат чексиз бўлиб туришига улгурадиган тезликда бўлмоқда деб фараз қиламиз. Бундан гашқари қаттиқ фазада диффузия шунчалик секин бўладики, бунда кристалл ички қисмининг таркиби кристалланиш температурадаги тегиб турган эритманинг таркибига мос келмайди. Бунда қаттиқ фаза таркибининг диффузия таъсиридаги ўзгаришларини ҳисобга олмаसा ҳам бўлади.

Эритманинг температурани кристалланишнинг бошланиш температурагача камайгирилганда (1.10-расм, ликвидус чизигидаги 2-нуқта) таркиби C_{K_2} ва суюқ фазага қараганда А компонентга бойроқ бўлган қаттиқ фаза ҳосил бўлади. Эритма эса В киришма компонентига бойиб қолади. Бунинг натижасида бу эритмани ифодалайдиган фигуратив нуқта 2-нуқтага қараганда бирмунча ўнг томонга силжийди (5-нуқта). Кўриниб турибдики, T_2 температура 5-нуқта билан ифодаланадиган эритманинг кристалланиш ҳароратидан бирмунча юқоридир. Температуранинг кейинги камайиши натижасида 5-фигуратив нуқта яна ликвидус чизигига келади ва бунинг натижасида ажралаётган қаттиқ фаза қатламларининг таркиби энди В компонентга бойроқ бўлиб қолади. Буларнинг кристалланиши натижасида фигуратив нуқта яна ўнг томонга силжийди ва шундай қилиб эритманинг кейинги қисмлари пастроқ температурада кристаллана бошлайди. Қаттиқ фазада диффузиянинг тезлиги жуда кичик бўлганлиги сабабли кристаллнинг ўсиш жараёнида ўсаётган қатламлар борган сари В компонентга бойиб боради.

Шундай қилиб, реал шароитдаги кристалланиш жараёнлари натижасида қаттиқ фаза таркибига хўра бир жинсли бўлмаган ҳолда кристалланар экан. Ҳосил бўлган кристалл қўймаси концентрацияси узлуксиз ўзгарадиган қаттиқ қоришма кўринишида бўлади. Бу ҳодиса ва ўзгармас таркибининг бундай бузилиши *сегрегация* дейилади. Юқорида келтирилганлардан шу нарс аён бўлдики, сегрегация иккита ҳолатнинг биргаликдаги таъсири натижасида юзага келади:

1. Мувозанат ҳолатдаги суюқ ва қаттиқ фазалар таркибидаги фарқ.

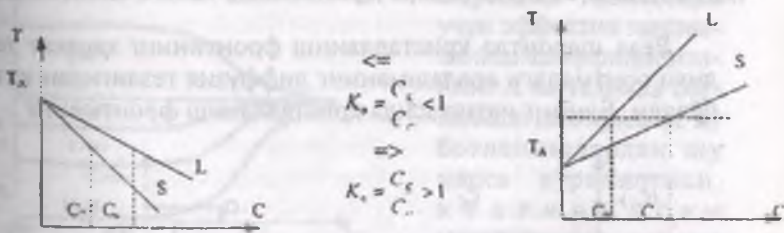
2. Қаттиқ фазада текисланиш жараёнларининг (диффузиянинг) секинлиги.

Кристалл реал шароитларда ўсаётганида фазалар чегараси 0,01-10 мм/мин тезлик билан ҳаракатланади. Бунга нисбатан қаттиқ фаза ичидаги компонентларнинг диффузияли силжиш тезлиги жуда ҳам кичик. Бундан ташқари ўсаётган кристаллнинг қатлами бир зумда кристалл ўсишида ҳосил қилинадиган температура градиентининг паст температурали соҳасига тушиб қолади ва бу ерда диффузия жараёнлари янада секинлик билан кечади. Бунинг натижасида таркибнинг бир жинсли эмаслиги сақланади, ҳамда кристалланиш жараёни ёрдамида моддаларни ажратиш ёки тозалаш мумкин бўлади.

Эритмани кристаллаш натижасида моддаларнинг тозала-ниш самарадорлигини баҳолаш учун тақсимланиш коэффи-циенти K қабул қилинган. K сон жиҳатдан қаттиқ фазада эриган модда концентрациясининг шу модданинг суяқ фа-задаги концентрацияси нисбатига тенг. Асосий компонент — киришма тизимига боғлиқ ҳолда K бирдан катта ёки кичик бўлиши мумкин ва унинг қиймати $10^{-5} - 10$ оралиқда ўзгаради.

Тақсимланиш коэффициенти икки хил бўлади: мувозан-атли тақсимланиш коэффициенти ва самарали тақсимла-ниш коэффициенти.

Мувозанатли тақсимланиш коэффициенти кристалл ва эритма орасидаги ҳар бир мувозанат пайтида аралашмадаги компонентларнинг ажралиш эффектини характерлайди. Му-возанатли тақсимланиш коэффициенти фазалар диаграммаси асосида ҳисобланади. Бунда у берилган T температура учун изотерма чизиқ билан ликвидус ва солидус



1.11-расм. Киришма асосий компонентининг эриш тем-пературасини камайтирадиган 1-ҳолат.

1.12-расм. Киришма асосий компонентининг эриш темпе-ратурасини оширадиган 2-ҳолат.

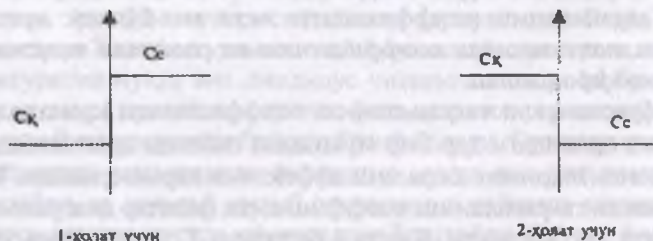
чизиқлари кесишишидан ҳосил бўлган горизонтал кесмалар — « $C_{\text{кр}}$ » ва « $C_{\text{сувоқ}}$ » концентрацияларнинг нисбатидан топилади:

$$K_0 = C_{\text{кр}} / C_c \quad (1.30)$$

Агар киришма тозаланаётган модданинг кристалланиш температурасини камайтирса, $K_0 < 1$ бўлади, чунки $C_{\text{кр}} < C_c$ (1.11-расм), агар киришма кристалланиш температурасини оширса, $K_0 > 1$ бўлади, чунки $C_{\text{кр}} > C_c$ (1.12-расм). Агар ҳолат диаграммасида ликвидус ва солидус чизиқлари тўғри чизиқлардан иборат бўлса, унда ҳар хил температураларда $C_{\text{кр}}$ ва C_c кесмаларда қурилган учбурчаклар ўхшашлигидан K_0 нинг концентрация ва температурага боғлиқ бўлмаслиги келиб чиқади.

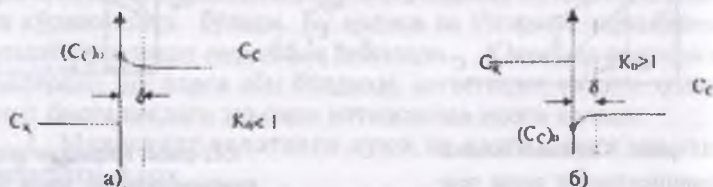
Мувозанат шarti эритманинг кристалланиши жуда кичик бўлган тезликлардагина бажарилади. Бунда эритманинг ҳажмида C_c ўзгармас бўлади (1.13-расм) ва унинг кристалланган қисмдаги концентрацияси қуйидаги формула бўйича топилади:

$$C_{\text{кр}} = K_0 C_c \quad (1.31)$$



1.13-расм. қаттиқ ва суюқ фазаларнинг чегара қатламдаги киришмалар тақсимотининг схематик тасвири (кристалланиш тезлиги чексиз кичик).

Реал шароитда кристалланиш фронтининг ҳаракат тезлиги эритмадаги аралашманинг диффузия тезлигидан катта бўлади. Бунинг натижасида кристалланиш фронтининг



1.14-расм. Номувозанат шароитда фазаларнинг бўлиниш чегарасида киришмаларнинг тақсимои: кристалланиш тезлиги чекли қийматга эга.

олдида, агар $K_0 < 1$ бўлса, эффектив қалинлиги « δ » бўлган киришмага бойиган (1.14-расм, а), агар $K_0 > 1$ бўлса, киришмага тақчил эритма қатлами ҳосил бўлади (1.14-расм, б).

Бундай шароитда кристалланган қисмдаги киришманинг концентрацияси « C_k » кристалланиш фронти яқинида эритмадаги киришма концентрацияси $(C_c)_0$ билан аниқланади. Умумий ҳолатда $(C_c)_0$ номаълум бўлгани учун қаттиқ ва суюқ фазалардаги киришмаларнинг концентрацияси эффектив тақсимланиш коэффициенти билан аниқланади:

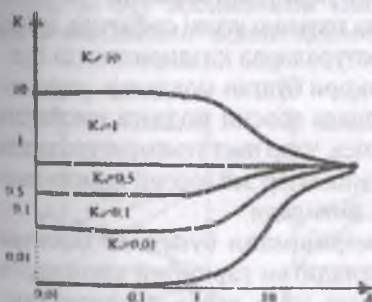
$$K = \frac{C_k}{C_c} \quad (1.32)$$

Киришмаларнинг δ қатламдаги масса узатилиши диффузийли характерга эга бўлган ҳол учун эффектив ва мувозанатли тақсимланиш коэффициентлари бир-бири билан қуйидагича боғланади:

$$K = \frac{K_0}{K_0 + (1 - K_0) \cdot e^{-\frac{\Delta}{D}}} \quad (1.33)$$

Бу тенгламадаги $\Delta = \frac{u\delta}{D}$ ўлчамсиз катталиқ бўлиб, «келтирилган кристалланиш тезлиги» дейилади; u — кристалланиш тезлиги; D — эритмадаги киришманинг диффузия коэффициенти.

Шундай қилиб, агар мана шу катталиқлар ва мувозанатли тақсимланиш коэффициенти маълум бўлса, K нинг қийматини ҳисоблаш мумкин.



1.15-расм. Киришма тақсимоти эффектив коэффициенти K нинг ҳар хил қийматлари учун усишнинг келтирилган тезлиги Δ га боғланиш графиги.

1.15-расмда ҳар хил асосий компонент — киришма тизимлари учун эффектив тақсимланиш коэффициенти нинг Δ катталиқка боғланиши келтирилган. Бу боғланишлардан шу нарсa кўриняптики, келтирилган кристалланиш тезлиги Δ нинг ошиши билан K нинг қиймати бирга томон интилади. Δ нинг камайиши эса K нинг қийматини K_0 га яқин-

лаштиради. Бундан тозалаш жараёнининг эффективлигини ошириш учун эффектив тақсимлаш коэффициенти-нинг қийматини мувозанатли тақсимлаш коэффициенти қийматига мумкин қадар яқинлаштириш кераклиги келиб чиқади. Мана шу эффектга кристаллаш билан тозалашда суюқ фазани интенсив аралаштириб туриладиган шароитда ҳам эришиш мумкин.

1.8.6. ГАЗ ФАЗАСИ ОРҚАЛИ ҲАЙДАШ ЖАРАЁНЛАРИ ЁРДАМИДА ТОЗАЛАШ

Газ фазаси орқали ҳайдаш жараёнларини буғларининг босими юқори қийматларга эга бўлган оддий моддалар ва кимёвий бирикмаларни тозалаш учун қўллаш мумкин. Масалан, P, Sb, S, Mg, Ca, Zn ва баъзи бир элементларнинг суюқ хлоридлари (GeCl_4 , SiCl_4 , TiCl_4 каби) ҳамда ярим ўтказгичли ва диэлектрик материалларни ишлаб чиқаришда учувчан бирикма шаклидаги оралиқ маҳсулотлар (паст галогенидлар) ва шу кабиларни тозалашда газ фазаси орқали ҳайдаш жараёнларидан фойдаланилади. Газ фазаси орқали ҳайдаш жараёнларининг сублимация ва дистилляция, кимёвий транспорт реакцияси ёрдамида тозалаш каби усуллари моддаларни ажратиш ва тозалашда кенг қўлланилади.

Сублимация ва дистилляция усули билан моддаларни ажратиш ва тозалаш. Сублимация деганда модданинг қаттиқ ҳолатдан буғ ҳолатига тўғридан-тўғри ўтиш жараёни тушунилади. Сублимацияни ажратиш ва тозалаш усули сифатида эриш температурасидан паст температураларда қиздирилганда буғларининг босими кераклича юқори бўлган моддалар учунгина қўллаш мумкин. Бунда моддада асосий моддага нисбатан кўпроқ учувчан киришмалар бўлса, улар паст температураларда ҳайдалади. Камроқ учувчан киришмалар эса асосий компонент учиб кетгандан сўнг қолдиқда йиғилади.

Дистилляция — бу суюқ қоришмани буғининг босими ҳар хиллиги билан характерланидиган таркибий қисмларга ажратиш жараёни бўлиб, бунда улар аввал буғлатилади, кейин эса буғлар конденсацияланади.

Чексиз қаттиқ ва суюқ қоришмалар қаторини ҳосил қиладиган А ва В компонентлардан ташкил топган иккиланган тизим мисолида моддани ажратиш ва тозалашда буғлатиш ва конденсациялаш жараёнининг асосини кўриб чиқамиз.

Агар А ва В компонентлар таркиби, молекулаларининг катталиги, тузилиши ва хоссалари жиҳатдан бир-бирига яқин бўлса ва улар бир-бири билан кимёвий бирикма ҳосил қилмас, унда қоришма устидаги ҳар бир компонент тўйинтирувчи бугнинг парциал босими ўзгармас температурада унинг қоришмадаги молли қисмига пропорционал бўлади, яъни:

$$P_A = N_A P_A^O \quad (1.34)$$

$$P_B = N_B P_B^O, \quad (1.35)$$

бу ерда, P_A ва P_B — А ва В компонентларнинг қоришма устидаги парциал босимлари, N_A ва N_B — уларнинг қоришмадаги молли қисмлари, P_A^O ва P_B^O — тоза ҳолатдаги А ва В компонентларнинг буг босими.

Қоришма билан мувозанатдаги бугнинг умумий босими:

$$P_{AB} = N_A P_A^O + N_B P_B^O. \quad (1.36)$$

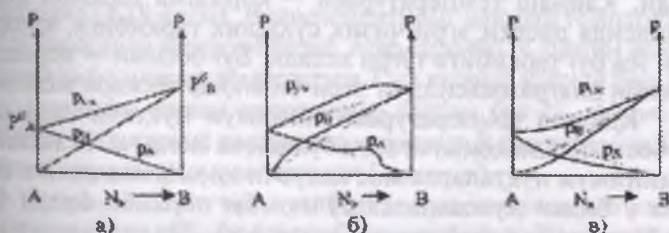
Одатда $N_A + N_B = 1$ ва $N_A = 1 - N_B$ бўлгани учун (1.34) ва (1.35) тенгламалардан:

$$(P_A^O - P_A) / P_A^O = N_B \quad (1.37)$$

$$P_{AB} = P_A^O + N_B (P_B^O - P_A^O). \quad (1.38)$$

Бу ифодалар молли қисмга нисбатан чизиқли функциялар бўлиб, уларга ўзгармас температурада бугнинг умумий ва парциал босимларининг эритма таркибига боғлиқлиги келтирилган диаграммадаги тўғри чизиқлар мос келади (1.16-расм, а).

Юқоридаги (1.38) ифода идеал тизим учун Рауль қонуни дейилади ва у қуйидагича таърифланади: А эритувчи тўйинган буг босимининг нисбий камайиши ундаги эритган В модданинг молли қисмига тенг ва аксинча.



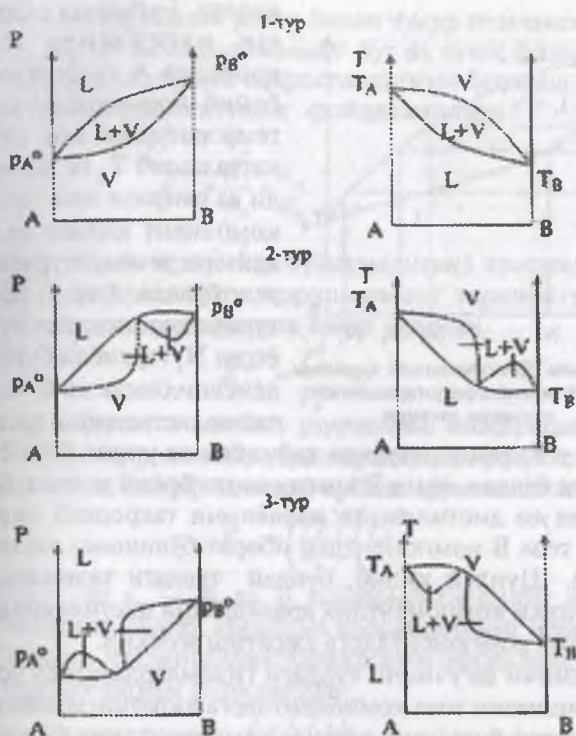
1.16-расм. Икки компонентли тизимларда бугнинг умумий ва парциал босимларининг таркибга боғланиш графиклари: а-идеал тизим; б-Рауль қонунидан мусбат четланган тизим; в-Рауль қонунидан манфий четланган тизим (температура ўзгармас).

Амалда идеал қоришмалар нисбатан кам учрайди ва уларнинг ҳосил бўлишида иссиқлик эффекти ёки ҳажм ўзгариши кузатилмайди. Реал эритмаларда эса қоришма буғ босими билан унинг таркиби ўртасидаги чизиқли боғланишдан четланиш кузатилади (1.16-расм, б, в). Бунда Рауль қонунидан мусбат ва манфий четланадиган эритмалар фарқ қилади. Мусбат четланишли эритмалар иссиқлик ютилиши ва ҳажмнинг кенгайиши орқали ҳосил бўлади (1.16-расм,б). Манфий четланишли эритмаларнинг ҳосил бўлишида эса иссиқлик ажралиши ва ҳажмнинг камайиши кузатилади (1.16-расм,в).

Қоришма устидаги буғнинг таркиби билан қоришманинг таркиби орасидаги боғланишни кўриб чиқамиз. Умумий ҳолатда буғдаги қоришма компонентларининг нисбий миқдори уларнинг қоришмадаги нисбий миқдорларидан фарқ қилади. Фақат буғ босимлари тоза ҳолатда бир хил бўлган компонентлардан ташкил топган идеал тизимдагина қоришма устидаги буғ ва қоришмадаги компонентлар нисбати бир хил бўлади. Бошқа идеал ҳолатларда эса буғ фазаси қоришмага нисбатан буғ босими тоза ҳолда юқорироқ бўлган компонентга бойроқ бўлади.

Буғ таркибининг қоришма таркибига ва тизимдаги умумий босимга боғланиши Д.П. Коновалов очган қонунлар билан ифодаланади. Бу қонунларнинг асосий мазмуни координатлари қайнаш температураси — қоришма таркиби ва буғ босими — қоришма таркиби бўлган диаграммаларда акс эттирилган (1.17-расм).

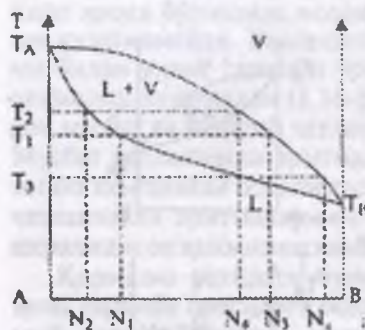
Бу расмларда ҳолат диаграммасининг уч хил тури келтирилган. Буларнинг ҳар бирида иккита эгри чизиқ қурилган бўлиб, уларнинг биттаси ҳолат параметрларини буғ таркиби билан, иккинчиси эса суюқ фаза таркиби билан боғлайди. Қайнаш температураси — қоришма таркиби диаграммасида пастки эгри чизиқ суюқлик таркибига, юқоригиси эса буғ таркибига тўғри келади. Буғ босими — қоришма таркиби диаграммасида бу эгри чизиқлар тескари жойлашган. Қайнаш температураси минимум нуқтали тизимлар буғ босимида максимумга эга бўлади ва аксинча. Максимум ва минимум нуқталарга мос келувчи қоришмаларнинг таркиби у билан мувозанатда бўлган буғ таркиби билан бир хил бўлади (Коноваловнинг 2-қонуни). Шу нуқталарга мос келувчи қоришмалар азеотроп қоришма ёки ажралмасдан (ҳамиша) қайновчи қоришмалар дейилади. Ҳар хил турдаги фазали диаграмма билан характерланадиган тизимлар дистилляция жараёнида ўзини ҳар хил тутади.



1.17-расм. Суюқлик L —буғ V тизимининг ҳар хил турлари учун таркиб-буғ босими P ва таркиб-қайнаш температураси T ҳолат диаграммалари.

Аввал энг содда бўлган биринчи турдаги диаграммага мос келадиган A ва B компонентлардан иборат тизимни кўриб чиқамиз (1.18-расм). B компонентнинг қайнаш температураси A га қараганда пасироқ бўлсин. Агар таркиби N_1 бўлган эритмани қиздира бошласак, температура T_1 га етганда қайнай бошлайди. Бу қоришма билан мувозанатда бўлган буғ N_2 таркибга эга бўлади ва бу таркиб қоришмага қараганда B компонента бойроқ бўлиб қолади (Коноваловнинг I-қонуни).

Қоришманинг маълум бир миқдори буғланиб кетганидан кейин қоришма A компонента бойиб қолади ва унинг таркиби энди N_2 нуқта билан характерланади. N_2 таркибли қоришма температураси T_2 га етганда қайнай бошлайди ва бу қоришма билан мувозанатда бўлган буғнинг таркиби қоришмага қараганда B компонента янада бойроқ бўлиб



118-рasm. Дистилляцияда қоришма ва буг таркиблари уларининг схематик тасвири.

қолади. Бугланиш давом этиши натижасида қолдиқ қоришма А га борган сари бойиб бораверади, қайнаш температураси мос равишда катталашиб T_A га яқинлашади ва охирида тоза ҳолдаги А компонент қолади ва унинг қайнаш температураси T_A га тенг бўлади. Агар T_1 температурада қоришмадан бугланаётган N_1 таркибли бугни конденсацияласак ва бу конденсатни дистилляция қиладиган

бўлсак, у T_1 температурада қайнайди ва унинг буги N_2 таркибга эга бўлади, яъни В компонентга бойиб қолади. Бу конденсация ва дистилляция жараёнини такрорлаб ажралаётган буг тоза В компонентдан иборат бўлишини таъминлаш мумкин. Шундай қилиб, бундай турдаги тизимларда ҳар қандай икки компонентлик аралашмани дистилляция усули билан тоза компонентларга ажратиш мумкин.

Иккинчи ва учинчи турдаги тизимларда эса бу усул билан қоришмани тоза компонентларга ажратиш мумкин эмас.

Азеотроп бугланиш вақтида компонентларга бўлинмайди ва уни ажратиш учун бошқа усуллардан (экстракция, кристаллаш каби) фойдаланилади. Азеотроп қоришмалар амалий жиҳатдан зарур бўлган кўпгина тизимларда учрайди: хлорли водород + сув — ($H_2O + HCl$), азот кислотаси + сув — ($HNO_3 + H_2O$), этил спирти + сув, олтингугуртли углевод + ацетон ва шу кабилар.

Дистилляция усулида тозалаш ёки ажратиш жараёнларини миқдорий характерлаш учун тақсимланиш коэффициентидан фойдаланилади:

$$K = \frac{N'}{N} \quad (1.39)$$

бу ерда N' ва N — мос равишдаги буг ва қоришмадаги компонентларнинг молли қисми.

Кўрилатган икки компонентли тизим учун :

$$K_1 = \frac{N'_1}{N_1}, K_2 = \frac{N'_2}{N_2} \quad (1.40)$$

Модда дистилляция усули билан чуқур тозаланганда асосий компонент ва киришманинг буг ва суюқ фазалар орасида тақсимланишининг эффективлигини баҳолаш учун ҳам ажратиш коэффициентидан фойдаланилади:

$$K_{AK} = \frac{N_A}{N_B} = \frac{K_A}{K_B} \quad (1.41)$$

Идеал (Рауль қонунига бўйсунадиган) эритмалар учун ажратиш коэффициенти қоришманинг таркибига боғлиқ бўлмайди ва уни қуйидагича ёзиш мумкин:

$$K_{AK}^w = \frac{P_A^0}{P_B^0} \quad (1.42)$$

Бу коэффициент нисбий учувчанлик коэффициенти ҳам дейилади. Реал қоришмалар учун ажратиш коэффициенти (нисбий учувчанлик коэффициенти) қуйида қўринишга эга бўлади:

$$K_{AK} = \left(\frac{P_A^0}{P_B^0} \right) \cdot \left(\frac{\gamma_A}{\gamma_B} \right) \quad (1.43)$$

бу ерда, γ_A ва γ_B — А ва В компонентларнинг активлик коэффициенти бўлиб, қоришма хоссаларининг идеал ҳолатдан қанчалик четланганлик даражасини ифодалайди ва қуйидаги нисбат билан аниқланади:

$$\gamma = \left(\frac{P}{P^0} \right) \cdot \left(\frac{1}{N} \right) \quad (1.44)$$

Киришма компоненти концентрациясининг жуда кичик қийматларида асосий компонентнинг активлик коэффициенти $\gamma \rightarrow 1$ га интилади. Масалан, А асосий компоненти В киришманинг изларидан тозалашда $\gamma_A \rightarrow 1$ ва (1.43) ифода қуйидагича ёзилади:

$$K_{AK} = \left(\frac{P_A^0}{P_B^0} \right) \cdot \left(\frac{1}{\gamma_B} \right) = K_{AK}^w \left(\frac{1}{\gamma_B} \right) \quad (1.45)$$

Демак, киришмалар концентрациясининг жуда кичик қийматларида тозалаш жараёни асосан киришманинг активлик коэффициенти билан аниқланади ёки қоришманинг идеал ҳолатидан четланганлик катталиги ва характери билан аниқланади.

Масалан, баъзи бир бинар тизимларда ажратиш коэффициентларининг (нисбий учувчанлик) қийматлари киришмаларнинг кичик концентрациялари учун қуйидагича бўлади:

1.2-жадвал

Асосий компонент	Киришма	$K_{\text{ж}}$
SiHCl_3	PCl_3	4,47
SiHCl_3	CCl_4	2,65
SiHCl_3	TiCl_4	3,10
SiHCl_3	SnCl_4	11,0
SiHCl_3	CHCl_3	5,25

1.2-жадвалда келтирилган бинар тизимлар учун $K_{\text{ж}}$ нинг қиймати бирдан анча катта эканлиги бу тизимларни шу киришмалардан дистилляция ёрдамида тозалаш мумкинлигини кўрсатади.

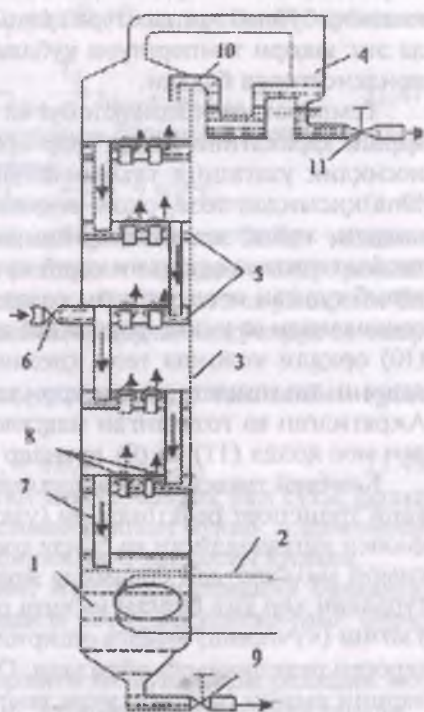
Сублимация — дистилляция усули билан моддаларни ажратиш ва тозалаш жараёнларининг самарадорлиги ва сифати тозаланаётган моддалардаги киришманинг таркиби, буғланиш ва ҳайдаш сирти катталиги, модда ва конденсатор температураси, аппаратдаги газларнинг таркиби ва босими каби катталикларга боғлиқ бўлади.

Асосий компонент ва киришмаларнинг нисбий учувчанликларига боғлиқ ҳолда осон учадиган киришмалар паст температураларда ҳайдалади, юқорироқ температураларда эса кам учадиган киришмалар ҳайдалади. Буғланиш ва ҳайдаш жараёнларининг тезлигини ошириш учун ажраладиган моддаларнинг сиртини имкон қадар катта бўлишлигини таъминлаш керак. Тозалаш самарадорлигини ошириш мақсадида кўпинча газ ҳолатдаги тоза водород қўлланилади. У жуда кўп оксидларни, сульфидларни, селенитларни ва галогенитларни қайтариш хусусиятига эга. Қайтарилган киришмалар эса эритмадан буғланиб кетади. O_2 , S, Se ва галогенлар эса H_2 нинг бирикмалари сифатида учиб чиқиб кетади. Нам водород кремний эритмасидан борни учувчан BH_3 гидриди ҳосил қилиш йўли билан ҳайдаш учун ишлатилади.

Техникада узлуксиз жараён фақат дистилляция усули учун амалга оширилган. Ажратиш ва тозалашнинг бундай узлуксиз жараёни ва бунда алоҳида фракциялар учун дистилляция ва конденсация операцияларининг кўп марта қайтарилиши ректификация деб аталиб, бу жараён ўтадиган аппарат эса ректификация колоннаси дейилади. Ректификациянинг самарадорлиги дистилляцияга қараганда жуда юқори ҳисобланади. Масалан, икки компонентли суюқ аралашмани ажратишда уларнинг қайнаш температураси ди-

стиляция усулида камида 50 градуста фарқ қилиши керак. Ректификация усулида эса 0,5 °C ва баъзи ҳолларда 0,05 °C фарқ қилса ҳам етарли ҳисобланади.

Шу билан бир қаторда ректификация ажратишнинг энг маҳсулдор жараёнларидан бири ҳисобланади. Бундан ташқари у нисбатан оддий, қурилмалари ихчам, жараён узлуксиз, исрофгарчилик йўқ даражада. Мана шуларнинг ҳаммаси саноатда яримўтказгич ва диэлектрикларнинг тоза компонентларини (оддий модда ёки учувчан бирикмалар қўринишида ҳайдаш билан) олишда, хусусан, SiCl_4 , TiCl_4 , CCl_4 , GeCl_4 , CH_3SiCl_3 , AlCl_3 , SbCl_3 , VBg_3 , олтингугурт, селен, фосфор, цирконий ва гаф-



1.19-расм. Ректификация қурилмасининг схемаси.

ний бирикмаларини тозалашда ва ҳоказоларда ректификация усулининг кенг қўлланилишига асос бўлди.

1.19-расмда ректификация қурилмасининг принципиал схемаси келтирилган. Қурилманинг асосий қисмларига куб (қозон) (1), қиздиргич (2), ректификация колоннаси (3) ва конденсатор (4) киради. Ректификация колоннаси горизонтал жойлашган қатор (5) тақсимчаларга эга. Олдиндан иситилган, ректификация қилинадиган қоришма кран (6) орқали ўртадаги тақсимчаларнинг биттасига берилади. Уни тўлдиргандан сўнг қувур (7) орқали пастдаги тақсимчага оқиб тушади. Пастдан тепага кўтарилаётган буғлар қувурча (8) орқали тақсимчадаги қоришмадан угаётганда унда пуфакчалар ҳосил қилиб тепага кўтарилади. Қувурчадаги қалпоқчалар тақсимчадаги қоришма билан буғларнинг яхши контактда бўлишини таъминлайди. Қўшимча қиздиргичлар ёрдамида

колонна бўйлаб температура градиенти ҳосил қилинади. Бунда энг юқори температура кубда, энг паст температура эса конденсаторда бўлади.

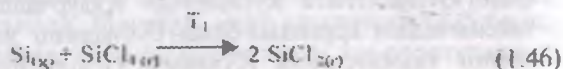
Температура градиенти буғ ва қоришмаларнинг қарама-қарши ҳаракатини ҳамда улар орасидаги узлуксиз масса ва иссиқлик узатишни таъминлайди. Натижада колоннанинг тепа қисмидан тоза, осон учувчан компонентнинг буғлари чиқади, кубга эса тоза, қийинроқ учувчан компонентдан ташкил топган суюқлик оқиб тушади. Конденсатор (4) га келиб тушган осон учувчан компонентнинг буғлари конденсацияланади ва унинг флегма деб аталадиган бир қисми қувур (10) орқали колонна тепа қисмининг нормал ҳолатда ишлашини таъминлаш учун юқори тақсимчага бериб турилади. Ажратилган ва тозаланган маҳсулотлар конденсатор ва кубдан мос ҳолда (11) ва (9) кранлар орқали чиқариб олинади.

Кимёвий транспорт реакциялари ёрдамида тозалаш. Кимёвий транспорт реакциялари (узатиш реакциялари) деб газ фазаси қатнашадиган ва бунда ҳосил бўладиган оралиқ газ-симон маҳсулотлар ёрдамида моддани босим ва температуралари ҳар хил бўлган иккита реакция зонаси оралиғида узатиш (кўчириш) амалга ошириладиган қайтарилувчан гетероген реакцияларга айтилади. Одатда транспорт реакцияларини амалга ошириш учун температуралар фарқи бўлган тизимлардан фойдаланилади.

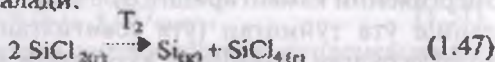
Қўпгина яримўтказгичлар ва диэлектрикларни чуқур тозалашда мумкин бўлган технологик температураларда киришмалар ҳосил қиладиган буғ босимлари жуда кичик бўлади. Натижада бундай моддалар учун сублимация ва дистилляция усулларини қўллаш ўта самарасиз бўлиб қолади. Бундай ҳолда самарадорликни ошириш учун асосий моддани киришмаларга қараганда кўпроқ учувчан кимёвий бирикмаларга айлантириш яхши натижалар беради. Бунда ҳосил бўлган осон учувчан бирикмалардан яна ажратиб ҳосил қилинган асосий модда сублимация ва дистилляция усулига нисбатан тозароқ бўлади.

Мисол тариқасида кремнийнинг дигалогенид кўринишида кўчишини кўриб чиқамиз.

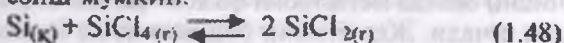
Кремнийни $T_1 = 1300^\circ\text{C}$ температурада тетраҳлорид билан қайта ишлаш натижасида оралиқ газсимон модда SiCl_3 ҳосил бўлади:



Ҳосил бўлган газсимон SiCl_2 реакторнинг охирига кўчади. у ерда температура $T_2 = 1100^\circ\text{C}$ да кремний қуйидаги реакция бўйича ажралади:

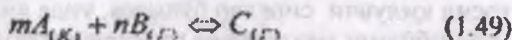


Бу реакциялар қайтарикувчан бўлганлиги сабабли уларни қуйидагича ёзиш мумкин:



Шундай қилиб, транспорт реакцияси билан моддани тозалашда тозаланадиган моддалан ташқари махсус реагент (масалан, кремний тетраҳлориди), баъзан эса ўз оқими билан реагент ва оралиқ газсимон маҳсулотни кўчирувчи инерт газ қатнашиши шарт.

Умумий ҳолда транспорт реакцияси тенгламаси қуйидагича ифодаланади:



бу ерда, А — тозаланаётган модда, қаттиқ ёки суюқ фазада бўлиши мумкин; В — газсимон реагент бўлиб, А компонент билан газсимон оралиқ бирикма С ни ҳосил қилади.

Амалда бу реакциянинг йўналиши реакция бўладиган ҳажмдаги зоналар орасидаги температураларнинг фарқи билан берилади.

Кўчишнинг самарадорлиги ва йўналиши реакция вақтидаги эркин энергиянинг ўзгариши билан аниқланади:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (1.50)$$

бу ерда, ΔH ва ΔS — энтальпия ва энтропияларнинг реакция давомида Т температурада ўзгаришлари. Агар ΔS кичик бўлса, кўчишнинг йўналиши ΔH нинг ишораси билан аниқланади. Экзотермик реакцияларда кўчиш паст температурадан юқори температура томонга, эндотермик реакцияларда эса юқори температурадан паст температура томонга бўлади.

1.9. ҚОТИШ ЖАРАЁНЛАРИНИНГ ФИЗИК-КИМЁВИЙ АСОСЛАРИ

1.9.1. КРИСТАЛЛ МУРТАКНИНГ ҲОСИЛ БЎЛИШИ

Кристалланиш жараёнлари биринчи турдаги фазага ўзгариш бўлиб, бунда атомлар тўла ёки қисман тартибсиз жойлашган ҳолатдан (буғ, суюқлик) ўта тартибли жойлаш-

ган ҳолатга ўтади. Ҳар қандай фазали ўзгаришнинг, яъни кристалланишнинг ҳаракатлантирувчи кучи унинг эркин энергиясини камайтиришга бўлган интилишидир. Кристалланиш ўта тўйинган (ўта совитилган), яъни метастабил ҳолатда бўлган тизимларда кузатилади. Бунда кристалланиш (масалан, эритманинг қотиши ёки бугнинг конденсацияланиши) одатда метастабил фазали ҳажмда бир жинсли бўлмасдан кечади. Жараённинг бошланишида бошланғич фазанинг ҳар хил жойларида кристалланиш марказлари ҳосил бўлади ва улар иссиқлик ҳамда масса узатиш жараёнлари ҳисобига ўса бошлайди. Бошланғич фазани кристаллаш учун ҳосил қилинадиган ўта тўйиниш (ўта совутиш) тизимга янги фаздаги муртақлар сиртини ҳосил қилиш учун талаб қилинадиган қўшимча энергияни бериш учун керак.

Бошланғич фазада қаттиқ заррачалар ёки марказларни ҳосил қилувчи сиртлар бўлмаса, унда янги фазадаги муртақ ҳосил бўлиш механизми гомоген ҳисобланади, агар бўлса, унда гетероген ҳисобланади.

Кристалланиш марказларининг гомоген ҳосил бўлишида фазали ўзгариш шартларини аниқлайдиган асосий параметрларни куриб чиқамиз.

Иссиқлик мувозанати ҳолатида бўлган газсимон, суюқ ёки қаттиқ, молекуляр ёки атомли тизимларнинг ҳар хил нуқталарида узлуксиз равишда флуктуациялар ҳосил бўлиб туради, яъни ҳар хил катталикларнинг эҳтимоли энг катта бўлган қийматларидан четга олишлар кузатилади. Бошланғич фазадаги зичлик ёки концентрациянинг флуктуацияси фаза ҳолатининг ўзгаришига олиб келиши мумкин (масалан, янги фазадаги муртақ ҳосил бўлиши). Бундай ҳолат гетерофазали флуктуация ҳолати дейилади. Агар флуктуация натижасида фаза ҳолати ўзгармаса, унда гомофазали флуктуация дейилади.

Гетерофазали флуктуацияларнинг ҳосил бўлишида ҳар хил ҳолатдаги заррачалар энергияларининг ҳар хиллиги натижасида тизимнинг фақат эркин энергиясининг ўзгаришигина эмас, балки ажралиш сирти S нинг ҳосил бўлиши ҳам кузатилади.

Мисол тариқасида ўта тўйинган буғдан суюқ томчининг ҳосил бўлиш жараёнини куриб чиқамиз. P босимли ўта тўйинган буғдан (T температурада P мувозанатли босим билан характерланадиган) унча катта бўлмаган r радиусли томчининг пайдо бўлиши иккита ташкил этувчидан

иборат бўлган тизим эркин энергиясининг ΔG ўзгариши билан юз беради:

$$\Delta G = \Delta G_x + \Delta G_{\text{сирт}}, \quad (1.51)$$

бу ерда, ΔG_x — буғ эркин энергиясининг конденсацияла-
ниш натижасида ўзгариши, $\Delta G_{\text{сирт}}$ — эркин энергиянинг
суюқлик-буғ бўлиниш сиртини ҳосил қилишга сарф қили-
надиган иш ҳисобига ўзгариши.

Идеал газни изотермик қисийшда моляр эркин энергия-
нинг ўзгаришини

$$\Delta G_p = -RT \ln \frac{P}{P_0} \quad (1.52)$$

ҳисобга олиб, сферик r радиусли томчи учун қуйидагини
ҳосил қиламиз:

$$\Delta G_x = -\frac{4}{3} \cdot \frac{\pi r^3}{V} RT \ln \frac{P}{P_0} \quad (1.53)$$

бу ерда, R — универсал газ доимийси, V — суюқликнинг
моляр ҳажми.

Сферик муртак учун $\Delta G_{\text{сирт}}$ нинг қўшган ҳиссаси

$$\Delta G_{\text{сирт}} = 4\pi r^2 \gamma_{c-d}. \quad (1.54)$$

га тенг бўлади. Бу ерда, γ_{c-d} — суюқлик-буғ бўлиниш сир-
тининг солиштирма эркин энергияси.

(1.53) ва (1.54) ни (1.51) тенгламага қўйиб:

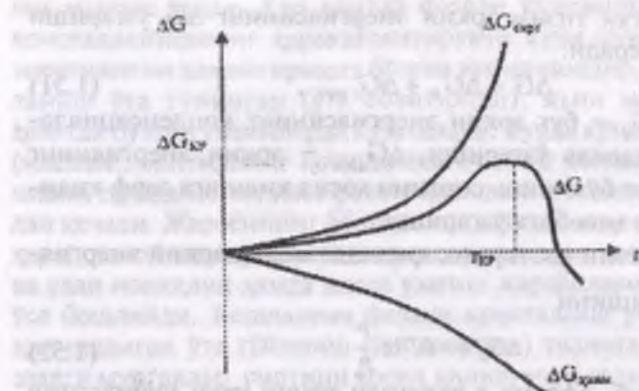
$$\Delta G = -\frac{4}{3} \cdot \frac{\pi r^3}{V} RT \ln \frac{P}{P_0} + 4\pi r^2 \gamma_{c-d}. \quad (1.55)$$

ни ҳосил қиламиз.

(1.55) тенгламанинг таҳлили (1.20-расм) шуни кўрса-
тадики, r нинг кичик қийматларида иккинчи қўшилувчи
устун келади ва ΔG мусбат бўлади, r нинг катта қийма-
ларида эса биринчи қўшилувчи асосий рол ўйнайди ва ΔG
манфий бўлади.

r га нисбатан (1.55)нинг максимум шартидан:

$$\frac{\partial \Delta G}{\partial r} = -\frac{4\pi r^2}{V} RT \ln \frac{P}{P_0} + 8\pi r \gamma_{c-d} \quad (1.56)$$



1.20-расм. Тизим эркин энергияси ўзгаришининг
инги факадаги муртак радиусига боғлиқлик графиги.

Бундан критик радиус $r_{кр}$ нинг қиймати қуйидаги (1.57) тенглама орқали топилади:

$$r_{кр} = \frac{2\gamma_{c-\delta} \cdot V}{RT \ln \frac{P}{P_0}} \quad (1.57)$$

(1.57) ни (1.55) тенгламага қўйиб, критик размерли томчининг ҳосил бўлиш жараёнини кузатиб борувчи эркин энергиянинг ўзгаришини топамиз:

$$\Delta G_{кр} = \frac{16 \pi V^2 \gamma^3}{3 \left(RT \ln \frac{P}{P_0} \right)^2} \quad (1.58)$$

(1.57) ва (1.54) тенгламалардан фойдаланиб, $\Delta G_{кр}$ нинг катталиги критик ўлчамли муртак сиртини ҳосил қилишдаги ишнинг 1/3га тенглигини кўрсатиш мумкин.

Юқоридаги (1.55) ва (1.57) формулалардан шу нарса келиб чиқадики, гетерофазали флуктуация натижасида ҳосил бўлган томчининг ўлчами $r < r_{кр}$ бўлса, буғланиб кетиш эҳтимоли каттароқ бўлади. агар $r > r_{кр}$ бўлса, ўсиш эҳтимоли кўпаяди, чунки нikkала ҳолда ҳам ΔG эркин энергия камаяди.

Критик радиусдан кичик бўлган томчилар «муртак» дейилади, критик радиусдан катталари эса янги фаза марказлари дейилади (ёки кристалланиш ҳолатида кристалланиш марказлари дейилади).

Агар $P/P_0 \leq 1$ бўлса, γ ошиши билан ΔG ошади ва гетерофазали флуктуация натижасида ҳосил бўладиган ихтиёрый ўлчамли томчилар бутланишга мойил бўлади.

Шундай қилиб, янги фазанинг муртаклари янги фазадаги модданинг эркин энергияси шу модданинг бошланғич фазадаги (буғ, қоришма ёки эритма) эркин энергиясидан кичик бўлгандагина пайдо бўлади ва ўсади. Эркин энергияни айнан ўлчашнинг иложи йўқлиги сабабли муртакларнинг ҳосил бўлиш шароити ва уларнинг кейинчалик ўсишини аниқлаш учун ўта тўйиниш ва ўта совитилиш деган тушунчалардан фойдаланилади. Кристалларнинг ҳосил бўлиши ва ўсиши учун бошланғич фаза унда пайдо бўладиган қаттиқ фазага нисбатан ўта тўйинган ёки ўта совитилган бўлиши шарт. Агар берилган ҳароратда газ фазасининг босими P суюқ ёки қаттиқ фазаларнинг тўйинтирувчи буғларининг босими P_0 дан катта бўлса, газли фаза ўта тўйинган дейилади. Бунда ўта тўйиниш қуйидаги усуллардан бири билан ифодаланади:

1) $\Delta P = P - P_0$ — абсолют ўта тўйиниш;

2) $\sigma = \Delta P / P_0$ — нисбий ўта тўйиниш (кўпинча фоизларда ифодаланади);

3) $\alpha = P / P_0$ — ўта тўйиниш коэффициенти.

Ўта тўйинишни қуйидаги катталиқ билан ҳам ифодалаш мумкин:

$$\delta = \ln(P/P_0) \quad (1.59)$$

Бу катталиқнинг энергетик коэффициент $kT\alpha$ қўпайтмаси атом ёки молекуланинг икки фазадаги эркин энергияларининг фарқини (ёки икки фазадаги кимёвий потенциалларнинг фарқи $\Delta\mu$ ни) беради:

$$\Delta\mu = kT \ln(P/P_0) \quad (1.60)$$

Қоришмалар (суюқ ва қаттиқ) учун ўта тўйиниш юқоридагига ўхшаш ифодаланади:

1) $\Delta C = C - C_0$ — абсолют ўта тўйиниш ;

2) $\sigma = \Delta C / C_0$ — нисбий ўта тўйиниш ;

3) $\alpha = C / C_0$ — ўта тўйиниш коэффициенти (C — қоришмадаги кристалланидиган компонентнинг концентрацияси, C_0 — унинг кристалланиш температурасидаги мувознатли концентрацияси).

Эритмалар эса ўта совитилиш билан ифодаланади:

$$\Delta T = T_{эр} - T, \quad (1.61)$$

бу ерда, $T_{эр}$ — модданинг эриш температураси, T — ўта совутилган эритманинг температураси.

Критик ўлчамли муртақлар ҳосил бўлишининг активлаш энергияси учун олинган (1.58) ифода газли фазада янги фаза марказлари ҳосил бўлиш тезликларини тўйинишга боғлиқ ҳолда ҳисоблаш имконини беради. Нисбатан ютуғун тизимларда (масалан, ўта тўйинган буғ) янги фаза марказларининг ҳосил бўлиш тезлиги критик ўлчамли муртақларнинг ўз ўлчамларини оширишининг ўртача тезлигига тенг бўлади. Метастабил она фаза билан флуктуацияли мувозанат шартидан аниқланадиган критик муртақларнинг концентрациясини $n_{кр}$ га тенг деб қабул қилсак, унда газли фазанинг бирлик ҳажмида муртақ ҳосил бўлиш тезлиги қуйидагича ифодаланади:

$$J = \omega_{кр} n_{кр}, \quad (1.62)$$

бу ерда, $\omega_{кр}$ — критик муртақларнинг атом ёки молекулаларни ўзига қўшиб олиш частотаси бўлиб, бу билан улар янги фаза марказларига айланадилар.

Суюқ томчиларнинг гомогенли муртақ ҳосил бўлишида муртақнинг заррачани ушлаб олиш частотаси ω критик ўлчовли муртақнинг сирт юзаси $S_{кр} = 4\pi r_{кр}^2$ нинг буғ фазасидан келаётган оқим $q = \frac{P}{(2\pi mkT)^{1/2}}$ га кўпайтмаси кўринишида тасвирланиши мумкин. Буларни ҳисобга олганда (1.62) ифода қуйидагича ёзилади:

$$J = a_c q S_{кр} n_{кр}, \quad (1.63)$$

бу ерда, a_c — конденсация коэффициенти бўлиб, муртақ сиртига урилаётган мономерларнинг конденсацияланаётган қисмига тенг.

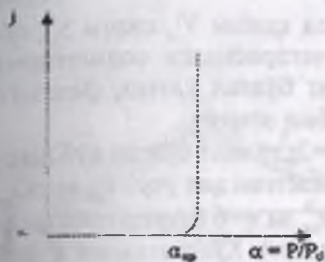
Агар муртақларнинг умумий сони камлигини назарда тутсак, улар квазимувозанатли тақсимланган деб ҳисоблашимиз мумкин. Бунда Больцман статистикасидан фойдаланиб, критик ўлчамли муртақлар концентрацияси $n_{кр}$ ни топамиз:

$$n_{кр} \approx n_1 \exp \left[- \frac{\Delta G}{kT} \right], \quad (1.64)$$

бу ерда, $n_1 = p/(kT)$ га тенг бўлиб, газ фазасидаги заррачалар (муртақ таркибига кирмаган атом ва молекулалар) концентрацияси.

(1.63) формула таркибига кирган катталикларнинг ифодаларини қўйиб, муртак ҳосил бўлиш тезлигини топамиз:

$$J = \frac{a_c P}{\sqrt{2\pi k T}} 4\pi i_{cp}^2 \cdot n \cdot \exp\left[-\frac{\Delta G_{cp}}{kT}\right] \quad (1.65)$$



1.21-расм. Ўта тўйинган бугаа суюқ томчиларнинг ҳосил бўлиш тезлигининг ўта тўйиниш коэффициентига боғланиш графиги.

гомогенли томчи ҳосил бўлиш тезлигининг натижавий ифодасини ҳосил қиламиз:

$$J = a_c q S_{KP} n_{KP} Z \quad (1.67)$$

ёки (1.65) ифодани қуйидагича ёзиш мумкин:

$$J = 4\pi i_{cp}^2 \frac{a_c P}{\sqrt{2\pi k T}} \left(\frac{\Delta G_{cp}}{3\pi k T i_{cp}^2} \right)^{1/2} \cdot n \cdot \exp\left[-\frac{\Delta G_{cp}}{kT}\right] \quad (1.68)$$

(1.57) ва (1.58) формулаларни ҳисобга олган ҳолда (1.68) ифоданинг таҳлили шуни кўрсатадики, маълум бир ўта тўйинишдан бошлаб янги фаза марказлари ҳосил бўлиши тезлигининг ўта тўйинишга боғлиқ ҳолда кескин ошиб кетиши кузатилади (1.21-расм). Бундай ўта тўйиниш критик ўта тўйиниш дейилади.

1.9.2. МУРТАКНИНГ ҲОСИЛ БЎЛИШ ЖАРАЁНЛАРИ ВА ИНИШАЛАНИШ

Суюқ фазада муртак ҳосил бўлишининг гомоген жараёнларини кўриб чиқамиз.

Ўта совитилган эритмада кристалл муртакларнинг ҳосил бўлиши гетерофазали флукутациялар натижасида эркин энергиянинг ўзгариши натижасида юз беради ва у юқоридагидек ифодаланади:

$$\Delta G = \Delta G_x + \Delta G_{\text{сирт}} \quad (1.69)$$

Мана шу тенгликни эритмада ҳажми V^1 , сирти S^1 , суюқлик-қаттиқ жисм бўлиниш чегарасидаги солиштирма эркин сирт энергияси $\gamma_{\text{сқ}}$ га тенг бўлган қаттиқ фазадаги муртакнинг ҳосил бўлишига татбиқ этамиз.

Мисол тариқасида қирраси $a=2r$ га тенг бўлган куб шаклидаги кристалл муртак ҳосил бўлаётган ҳол учун $r_{\text{сқ}}$ ва $\Delta G_{\text{сқ}}$ ифодаларини топамиз. Унда $V^1 = 8r_{\text{сқ}}^3$ ва $\eta=6$ (муртакнинг шаклини ҳисобга оладиган коэффициент). Қийматларни қўйиб қуйидагиларни ҳосил қиламиз:

$$r_{\text{сқ}} = \frac{2\gamma_{\text{сқ}}}{L \Delta T} \quad (1.70)$$

$$\Delta G_{\text{сқ}} = \frac{32\gamma_{\text{сқ}}^3 V^1 T^2}{L^2 \Delta T^2} \quad (1.71)$$

бу ерда, V — суюқликнинг молли ҳажми, $T_{\text{сқ}}$ — эриш температураси, L — кристалланишнинг яширин моляр иссиқлиги, $\Delta T = T_{\text{сқ}} - T$ — ўта совитилганлик, T — кристалланиш температураси.

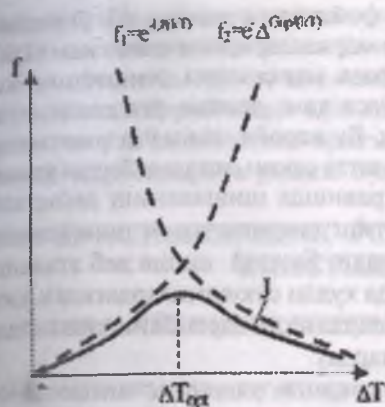
Шундай қилиб, муртакнинг критик ўлчами ва мос ҳолда унинг ҳосил бўлиш энергияси суюқлик-қаттиқ жисм бўлиниш чегараси солиштирма эркин сирт энергияси қанча кичик ва ўта совутилиш қанча катта қийматга эга бўлса, шунча кичик бўлади.

Кристалл фаза марказларининг бирлик ҳажмда ҳосил бўлиш тезлигининг умумий кўриниши қуйидагича бўлади:

$$J = K \exp\left(-\frac{U}{\kappa T}\right) \exp\left(-\frac{\Delta G_{\text{сқ}}}{\kappa T}\right), \quad (1.72)$$

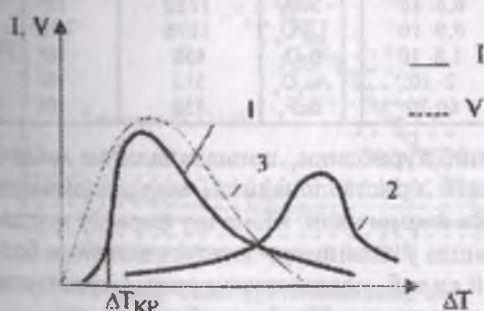
бу ерда, U — суюқ фаза ва кристалл муртак оралиги чегарасидаги энергетик барьер, K — температура ўзгариши билан кам ўзгарадиган коэффициент.

(1.72) тенгламадан кўриниб турибдики, $\Delta G_{\text{сқ}}$ билан аниқланадиган кристалл фаза марказларининг пайдо бўлиш эҳтимоллиги эритманинг ўта совитилишининг ошиши билан ошади (1.22-расм). Шу вақтнинг ўзида совитилишнинг ошиши билан U билан аниқланадиган атомларнинг ҳаракатчанлиги эса, айниқса қовушқоқ суюқликларда (масалан,



1.22-рasm. Суюқ фазада гомоген муртак ҳосил бўлиш тезлигини аниқловчи катталикларнинг эритма ўта солутилганлигига боғланиш графиги.

гига таъсир қиладиган кинетик омил ҳам маълум бир таъсир ўтказди (1.23-рasm). Ноқовушқоқ суюқликларнинг кристалланишида (кремний ва германий эритмалари) кинетик омил кам рол ўйнайди ва шу сабабли марказларнинг ҳосил бўлиш тезлигида максимал қиймат кузатиладигани мумкин ва маълум бир $\Delta T_{кр}$ критик ўта совирилганликда кристалл фаза марказларининг ҳосил бўлиш



1.23-рasm. Кристалл фаза марказларининг гомоген ҳосил бўлиш тезлиги (1,2) ва кристалл фаза марказлари ўсишининг (3) ўта совирилишга боғланиш графиги: 1- ноқовушқоқ эритмалар учун; 2-қовушқоқ эритмалар учун; 3- ноқовушқоқ ва қовушқоқ эритмалар учун умумлаштирилган боғланиш.

оксидли шиша, органик полимерлар) камаяди ва шу билан кристалл фаза марказларининг ҳосил бўлиши ҳатто катта ўта совирилишларда ҳам секинлашади. Шу сабабли ҳар бир қовушқоқ суюқлик оптимал ўта совирилишга эга бўлиб, бунда марказларнинг ҳосил бўлиш тезлиги максимал бўлади (1.22-рasm).

Демак, муртакларнинг тунлиш тезлигига термодинамик омилдан ташқари кристалл фаза марказлари ўсишининг чизикли тезли-

тезлиги кескин ошади ва суюқликнинг ҳамма ҳажмида бир зумда кристалланиш юз беради.

Кўриб чиқилган қонуниятлар эритмадан кристалл ва аморф қаттиқ jismlar ҳосил бўлиш шароитларини баён қилиш имкониятини беради. Масалан, SiO_2 асосидаги қовушқоқ

эритмани совитишда реал фойдаланиладиган ΔT ўта совитилганликда кристалланиш марказларининг сони кам (1,23-расм) ва бунда кристалл фаза марказлари ўсишининг чизиқли тезликлари катта бўлса ҳам, эритма ўта совитилган суюқлик кўринишда қотади. Бу жараён, яъни ўта совитилган эритманинг шишасимон ҳолатга секин-асталик билан ўтиши кристалланишдан фарқли равишда шишаланиш дейилади. Шишанинг мўрт ҳолатга ўтиш температураси шишаланиш температураси T деб айтилади. Бундай шиша деб аталадиган аморф қаттиқ jismlарда худди суюқликлардагидек узок тартиблик кузатилмайди. Уларда яқин тартиблик кузатилади (0,7 нм дан кичик масофаларда).

Эритмаларнинг қовушқоқлиги уларнинг шишасимон ҳолатга ўтиш қобилиятини аниқловчи асосий омил ҳисобланади. Температура пасайтирилганда қовушқоқлик таъми совутилиш жараёнида тез ва узлуксиз кўп тартибгача ошадиган (масалан, $\sim 10^{11}$ Па·с. гача) ўта совитилган суюқликларгина шиша кўринишда қотади. Куйидаги жадвалда баъзи бир кристалл ва шиша ҳолатида қотадиган эритмаларнинг қовушқоқликлари солиштирилган.

1.3-жадвал

Модда	Эриш температураси, °C	Қовушқоқлик, Па·с	Модда	Эриш температураси, °C	Қовушқоқлик, Па·с
Ge	937	$0,8 \cdot 10^{-3}$	SiO ₂	1722	10^6
Si	1414	$0,9 \cdot 10^{-3}$	GeO ₂	1116	$7 \cdot 10^6$
GaAs	1237	$1,8 \cdot 10^{-3}$	B ₂ O ₃	450	10^6
H ₂ O	0	$2 \cdot 10^{-3}$	As ₂ O ₃	312	10^5
Al ₂ O ₃	2050	$60 \cdot 10^{-3}$	BcF ₃	550	10^5

Жадвалдан кўришиб турибдики, шишаланадиган моддаларнинг қовушқоқлиги кристалланидиган моддаларникига қараганда 6-9 тартибга юқори экан. Мана шу фарқ бу моддаларнинг ўта совутилишда ўзларини ҳар хил тутишларини белгилаб беради. Шундай қилиб, моддаларнинг эритма ҳолатидан қаттиқ ҳолатга ўтиши икки хил йўл билан боради:

1. Кристалланиш.
2. Шишаланиш.

Эритманинг кристалланиши белгиланган температура юз беради ва бунда модданинг хоссалари кескин ўзгаради. Эритманинг шишаланиши эса ҳар бир модда учун маъ-

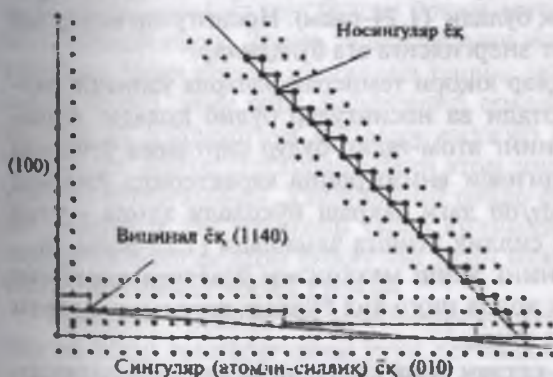
лум бир температура интервалида юз беради ва бунда мод-
данинг хоссалари бир текис ўзгариб боради.

Ўта тўйинган суяқ қоришмалардан гомоген муртак
ҳосил бўлиш жараёнлари кўп ҳолларда ўта тўйинган буғ-
лардан ва ўта совитилган эритмалардан муртаклар ҳосил
бўлиши жараёнларига ўхшаш бўлади.

1.10. КРИСТАЛЛАРНИНГ ЎСИШ МЕХАНИЗМИ ВА КИНЕТИКАСИ

1.10.1. БЎЛИНИШ СИРТЛАРИ СТРУКТУРАСИ

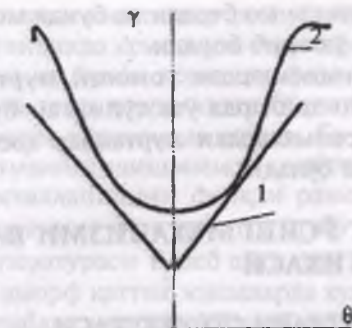
Термодинамика қонунларига биноан флуктуация нати-
жасида ҳосил бўлган кристалл муртакларнинг ўсиши бош-
ланғич муҳитдаги кичик ўта тўйинишларда ҳам кузатили-
ши керак эди. Бироқ берилган ўта тўйинишда кристалл ёқла-
рининг ўсиш тезлиги бир хил шароитларда сиртининг атом
структурасига боғлиқ бўлар экан. Идеал кристаллларда ёқлар-
нинг сиртлари атом структуралари бўйича уч хилга бўли-
нади: сингуляр, вицинал ва носингуляр (диффузли).



1.24-расм. Оддий куб панжарада ҳар хил
ориентациядаги ёқларнинг сирт структуралари

Сингуляр деб
идеал шароитда
ҳеч қанақа поғона
бўлмаган атомли-
силлик ёққа
айтилади (1.24-
расм). Бундай
сиртларга мисол
қилиб оддий куб
панжарадаги
(100) ёқни ёки
олмоссимон
панжарадаги
(111) ёқни,
яъни кичкина
Миллер ин-

декслари билан ифодаланадиган ёқларни кўрсатиш
мумкин. Сингуляр ёқлар бошқаларга қараганда энг кичик эр-
кин сирт энергиясига ва ретикуляр зичликка (атомларнинг
таҳлили зичлигига) эга. Ёқларнинг эркин сирт энергияси у
нинг ориентацияга боғлиқлигини кўрсатадиган Вульф ди-



1.25 - расм. Кристаллнинг эркин сирт энергияси анизотропияси:

- 1 — атомли-текис сирт учун;
2 — атомли-ғадир-будур сирт учун.

аграммасида сингуляр ёқларга ўткир минимум тўғри келади ва бирламчи ҳосила $d\gamma/d\theta$ да узилиш рўй беради (1.25-расм, 1).

Вицинал ёқ деганда сингуляр ёққа яқин ориентацияланган сирт тушунилади (1.24-расм). Вицинал ёқлар сингуляр ёқлар билан унча катта бўлмаган бурчак ташкил қилиб, сингуляр ёқларнинг монокристалл баландликдаги

поғоналар билан кесишган силлиқ платолардан ташкил топади. Вицинал ёқлар поғоналар бўлганлиги учун сингуляр ёқларга қараганда юқорироқ сирт энергияси билан характерланади.

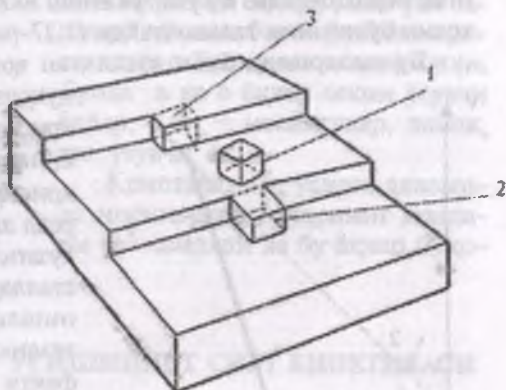
Носингуляр сиртлар сингуляр сиртлар билан нисбатан катта бурчак ҳосил қилади ва поғоналарнинг концентрацияси юқорироқ бўлади (1.24-расм). Носингуляр ёқлар энг катта эркин сирт энергиясига эга бўладилар.

Сингуляр ёқлар юқори температураларда ўзининг силлиқлигини йўқотади ва носингуляр бўлиб қолади. Атомсиллиқ сиртларнинг атом-ғадир-будур сиртларга ўтишида эркин сирт энергияси анизотропия характерида ўзгариш юз беради ва $d\gamma/d\theta$ даги сакраш йўқолади ҳамда γ учун ўткир минимум силлиқ ўтишга алмашади (1.25-расм, 2).

Кристаллларнинг ўсиш механизми ўсаётган сиртнинг ҳолатига боғлиқ ҳолда икки хил бўлади: қатламма-қатлам ўсиш ва нормал ўсиш.

1. **Қатламма-қатлам ўсиш** сингуляр ва вицинал сиртларда амалга ошади. Қатламма-қатлам ўсиш назариясининг асосчилари Коссель, Странский ва Фольмердир. Бу назарияга биноан, ўсаётган кристалл сиртига тушган атом поғонанинг узилган жойида энг маҳкам боғланади (1.26-расм, 3), чунки бундай ҳолатда (агар мисол тариқасида оддий куб панжара қаралаётган бўлса) атом энг яқин олтига қўшни атомдан учтаси билан боғ ҳосил қилади.

III) у вақтда погонанинг ўзидаги атом (1.26-расм, 2) фақат иккита қўшни атом билан, силлиқ ёқдаги атом эса (1.26-расм, 1) фақат битта қўшни атом билан боғ ҳосил қилади. Ташқи фазадан кристалл сиртига тушаётган атом энергиясининг бир қисмини панжарага беради ва кристалл сирт атомларининг боғланиш кучлари майдонига тушиб адсорбцияланган ҳолатга ўтади. Ўсишнинг оддий шароитларида адсорбцияланган атомларда кристалл сиртида силжиб юришлари учун кераклича энергия захираси мавжуд бўлади. Атом кристаллга боғланиши



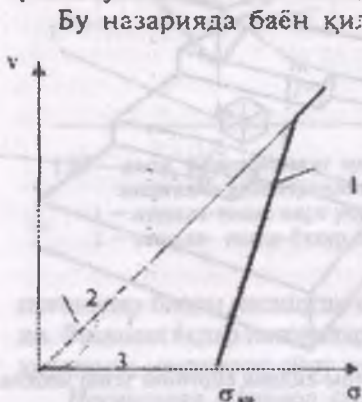
1.26-расм. Атом-силлиқ сиртнинг ўсиш модели.

ёки қайтадан буғланиб кетиши учун сирт бўйлаб бир неча атомлараро масофага тенг бўлган ўртача миграция йули λ_s ни босиб ўтиши керак. Демак, ташқи фазадан келаётган атомнинг тўғридан-тўғри поғона узилишига тушиш эҳтимоли жуда ҳам кичик бўлиб, атом сирт диффузияси орқали поғонага етиб келади ва узилишгача бўйлама силжиб кристалл бўлиб тахланади. Қатор тўлгандан кейин атом зинага бирикиб яна узилиш ҳосил қилади. Узилишнинг пайдо бўлиши учун янада юқорироқ ўта тўйиниш талаб қилинади, чунки зинага адсорбцияланган атом фақат энг яқин иккита қўшни атом билан боғланиш ҳосил қилади.

Назарий баҳолашлар шуни кўрсатдики, типик моддалар ва ўсиш температураси учун поғонада ҳар қайси тўртўн атомлараро масофага битта узилиш тўғри келади. Бундай узилишларнинг зичлиги кераклича катта бўлиб, бунда поғона кристаллнинг ўсиш жараёнида адсорбцияланган атомлар учун узлуксиз сток сифатида ҳаракат қилади.

Мономолекуляр қатлам тўлгандан сўнг икки ўлчамли муртак ҳосил бўлиш йули билан янги қатламнинг туғилиши учун анча катта ўта тўйиниш талаб қилинади. Агар ўсишнинг оддий шароитида погонанинг ҳаракати учун бир фазадан кичик бўлган ўта тўйиниш етарли бўлса, икки ўлчам-

ли муртакнинг ҳосил бўлиши учун эса ўта тўйиниш ўн фоиз атрофида бўлиши керак. Демак, Коссель-Странский - Фольмер назарияси бўйича сингуляр ёқлар узилиб-узилиб ўсиши керак ва уларнинг ўсиши учун маълум бир критик ўта тўйиниш керак бўлади. Бу ўта тўйиниш икки ўлчамли муртакнинг ҳосил бўлишини таъминлайди (1.27-расм, 1).

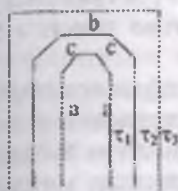


1.27-расм. Ёқлар ўсиши нормал тезлигининг ўта тўйинишга боғлиқлиги графиги: 1 - икки ўлчамдан ўсишга ҳосил бўлишдаги билан боралиган ўсишнинг қатламма қатлам механизми; 2 - носингуляр ёқларда ўсишнинг нормал механизми; 3 - ўсишнинг қатлам-спирал механизми.

нуксонлари бўлмаган идеал кристаллар ўсишининг жараёнлари учун тўғри бўлиб, кристаллар ўстирилишининг реал шароитларида жуда кам кузатилади. Кўп ҳолларда кристаллар жуда кичик ўта тўйинишларда ҳам маълум бир тезликлар билан ўса олиш факти кристаллар ўсиш сиртида доимий таъсир қиладиган поғона манбаи бўлиб, унинг вазифасини *винтли дислокация* бажарар экан, деган хулосага олиб келади.

2. Нормал ўсиш. Кристалларнинг нормал ўсиши носингуляр сиртларда амалга ошади. Бу сиртлар атомли-

гадир-будур бўлиб, узилишлар билан бир текис қопланганлиги учун янги заррачаларнинг бирикиши амалда ихтиёрый жойда юз беради. Узилишлар миқдори кристалланиш тезлигини чегараламайди ва ёқлар ўз-ўзига перпендикуляр ҳолда ўсади, яъни ўсишнинг нормал механизми амалга ошади. Демак, ҳар қандай ўта тўйинишда носингуляр ёқларнинг ўсиш жараёни лавом этади. Носингуляр ёқларнинг ўсиш тезлиги тўйинишга пропорционал бўлади ва чизиқли функция (Герц-Кнудсен тенгламаси) билан ифодаланади (1.27-расм, 2). Носингуляр ёқларда ўсиш нукталарининг концентрацияси сингулярга қараганда юқори бўлганлиги учун носингуляр ёқларнинг ўсиш тезлиги ҳам анча катта бўлади. Кристаллнинг ўсиш жараёнида унинг носингуляр ёқлари йўқ бўлиб кетиши мумкин. Бунинг натижасида кристалл кичик



1.28-расм. Кристаллнинг ўсиш жараёни давомида ундаги носингуляр ёқларнинг йўқолиши $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$ бўлиб кетади.

Миллер индексли секин ўсувчи, асосан сингуляр ёқлар билан қопланади. Бунинг 1.28-расмда келтирилган схема орқали тунгунтириш мумкин. Бу расмда ёқлари ўзига-ўзи параллел кўчиши билан ўсаётган кристаллнинг қирқими келтирилган. Бунда a ва b ёқлар секин ўсувчи ёқлар; c ёқ — носингуляр, демак, тез ўсувчи ёқ.

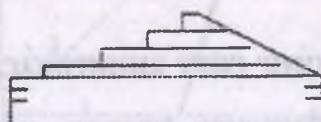
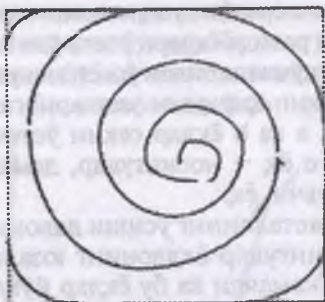
Кристаллнинг ўсиши давомида носингуляр ёқларнинг юзлари тез камаяди ва бу ёқлар йўқолиб кетади.

1.10.2. КРИСТАЛЛАР ЎСИШИНИНГ СИРТ КИНЕТИКАСИ

Бартон, Кабрера ва Франк томонидан биринчи марта кристаллларнинг қатлам-спирал ўсиш назарияси газ фазадан кристалланишга қўлланилган бўлиб, уни сулштирилган қоришмадан ва эритмадан ўсишга ҳам ишлатиш мумкин. Бу назарияга биноан сингуляр (ёки вицинал) ёқлардаги поғоналар ўсишининг манбаи винтли дислокациялар бўлиши мумкин. Винтли дислокация ҳосил қилган поғона унга заррачалар тахланганда спиралсимон бўлиб айланади ва ҳосил бўлаётган кетма-кет ўрамлар поғоналар эшелонини шакллантиради. Бунинг натижасида ўсаётган сиртда пирамидалар ҳосил бўлади (1.29-расм). Бу пирамидаларни ҳосил қилаётган поғоналарнинг концентрацияси катта бўлиб, ўсиш сиртига чиқаётган винтли дислокацияларнинг миқдори бонлиқ бўлмайди.

Озиқлантирувчи муҳит билан контаклда бўлган кристалл сиртида кристаллни ташкил қилган модданинг заррачалари адсорбция ҳолатида туради. Адсорбцияланган заррачалар учта йўналишда: сиртга перпендикуляр ва унга иккита параллел йўналишда иссиқлик тебранишларида қатнашади. Биринчи турдаги тебранишларда энергиянинг флукутацияси заррачанинг сиртдан узилишига ва унинг муҳитга ўтишига олиб келади. Иккинчи турдаги тебраниш бу заррачаларнинг сирт бўйлаб диффузияли миграция қилишига шароит яратади. Агар ўсаётган сирт устида ўта тўйиниш ҳосил қилинса, унда атроф-

муҳитда ва адсорбцияли қатламда, то ўта тўйиниш йўқолмагунча кристалланиш кетадиган поғона томонга диффузия бошланади.



1.29-расм. Винтли дислокация таъсирида ўсаётган сиртнинг морфологияси.

Газ фазадан кристалланишда ўсиш поғонасининг қиррасига тўғридан-тўғри бугдан тушаётган заррачалар миқдори буг зичлигининг камлиги ва қирра сиртининг кичиклиги туфайли унча катта эмас. Шу сабабли кристаллнинг ўсишига асосий ҳиссани сиртнинг ҳар хил қисмларида адсорбцияланган заррачаларнинг текис диффузияли оқими беради. Бу ҳолат учун қатлам-спирал механизми сирт ўсишининг нормал тезлиги қуйидаги ифода орқали аниқланади:

$$V = k_1 \Omega n_0 v k_2 e^{-\frac{W}{kT}} \left(\frac{\sigma^2}{\sigma_1} \right) \ln \left(\frac{\sigma_1}{\sigma} \right) \quad (1.73)$$

бу ерда, k_1 — адсорбцияли қатлам билан синишлар ўртасидаги заррачалар алмашиниш тезкорлигини ифодаладиган коэффициент, $k_2 = X_0/\lambda_s$ нисбат катталигини ифодаладиган коэффициент (X_0 — поғонадаги синишлар орасидаги ўртача масофа), Ω — заррачанинг ҳажми; n_0 — кристаллдаги атомларнинг сирт зичлиги; v — заррачанинг иссиқлик тебранишлари частотаси, σ — ўта тўйиниш; $\sigma_1 = (2\pi r_{kp}/\lambda_s)\sigma$ (r_{kp} — критик муртакнинг радиуси, λ_s — адсорбция ҳолатидаги заррачанинг ўртача силжиши), W — заррачанинг бугланиш энергияси, k — Больцман доимийси; T — температура.

Кичик ўта тўйинишлар учун ($\sigma \ll \sigma_1$) (1.73) ифодадан ўсиш тезлигининг ўта тўйиништа параболик қонун бўйича боғланганлиги келиб чиқади:

$$V = k_1 \Omega n_0 v k_2 e^{-\frac{W}{kT}} \left(\frac{\sigma^2}{\sigma_1} \right) \quad (1.74)$$

Катта ўта тўйинишлар $\sigma \approx \sigma_1$ учун чизикли қонунга эга бўламиз:

$$V = \kappa_1 \Omega n_0 v \kappa_2 \sigma e^{-\frac{W}{kT}} \quad (1.75)$$

Кристалларнинг газ фазасидан қатлам-спирал ўсишида ўсиш тезлигининг ўта тўйинишга йиғинди боғланиши (1.27-расм, 3)да кўрсатилган.

Қоришмалардан ўсиш жараёнларининг таҳлили шуни кўрсатдики, бунда кичик ўта тўйинишларда ўсиш тезлигининг ўта тўйинишга боғлиқлик қонуни параболик қонунга яқин бўлар экан. Ўта тўйиниш σ нинг ошиб бориши билан бу боғланиш чизикли қонунга яқинлашади. Параболик қонундан чизикли қонунга ўтиш кристаллнинг сиртига яқин жойлашган диффузион қатлам δ нинг қалинлигига, яъни қоришмани аралаштириш интенсивлигига боғлиқ бўлади.

Эритмадан кристалл ўсишнинг сирт кинетикаси фақат кристалланиш фронтининг тузилишигагина боғлиқ бўлмасдан, балки қовушқоқ эритмалардан ўстирилаётган кристалларнинг ўсишига ҳалақит қўладиган эритманинг қовушқоқлигига ҳам боғлиқ бўлади (масалан, кварц кристаллари) (1.23-расмга қаранг).

Атом - ғадир-будур сиртлар нормал механизм ҳолида ўсади. Бунда ўсиш марказларининг зичлиги сирт атомлари зичлиги 10^{24} м^{-3} га яқин бўлади. Бу ҳолда сиртнинг ўсиш тезлиги кристалланиш frontiдаги ўта совитилиш ΔT га пропорционал бўлади:

$$v \sim \Delta T \quad (1.76)$$

Атом-силлиқ сиртларнинг ўсиши икки хил механизм-ли бўлиши мумкин:

1) икки ўлчамли ўсиш зиналарининг туғилиши билан борадиган қатламли ўсиш механизми; 2) ўсиш зиналарининг манбаи бўлган винтли дислокациялар қатнашган қатламли-спиралли механизм.

Биринчи механизм бўйича эритмадан кристалл ўсиш тезлиги кристалланиш frontiдаги ўта совитилишнинг ўсиш температураси билан ўта совитилишнинг экспоненциал функциясига кўпайтмасига пропорционал бўлади:

$$v \sim \Delta T \exp(-B/(T\Delta T)), \quad (1.77)$$

бу ерда, $B = \text{const}$.

Иккинчи механизм бўйича ўсишда ўсиш тезлиги ва кристалланиш frontiдаги ўта совитилиш бир-бири билан квадратик қонун билан боғланган:

$$v \sim \Delta T^2 \quad (1.78)$$

1.10.3. КРИСТАЛЛАРНИНГ ҶСИШ ЖАРАЁНИГА КИРИШМАЛАРНИНГ ТАЪСИРИ

Кристалларнинг Ҷсиш жараёнига киришмаларнинг таъсири ҳар хил бўлганлиги бу жараён механизмини ўрганишни қийинлаштиради. Бу ерда асосий ролни киришманинг табиати, унинг концентрацияси ва заряд ҳолати ўйнайди. Бъзи бир ҳолатларда киришмалар кристалларнинг Ҷсишини тезлаштира, бошқа ҳолатларда эса секинлаштиради.

Агар Ҷсаётган кристалл поғоналарнинг узилишлари киришма молекулаларини адсорбциялагандан кейин Ҷсишнинг актив нуқтаси бўлмай қолса (заҳарланса), унда поғоналар ҳаракатининг йиғинди тезлиги, демак, кристаллнинг Ҷсиш тезлиги камаяди. Киришмалар иштирокидаги Ҷсаётган кристаллнинг бошқа моделида, агар актив (заҳарланмаган) узилишлар оралиғидаги ўртача масофа заррачаларнинг сирт бўйлаб ўртача диффузия югуриш узунлигидан катта бўлса, унда поғоналарнинг ҳаракат тезлиги камаяди. Бундай киришмага газ фазасидан Ҷсаётган германий кристаллари учун кислород мисол бўлади. Унинг босими 10^{-1} Па атрофида бўлганда кристаллнинг Ҷсиш тезлиги бир-икки тартибга камайиб кетади.

Кристаллнинг сиртида жойлашган киришмаларнинг йирик ҳаракатсиз заррачалари ҳаракатланаётган поғона билан учрашиб, уни маҳкамлаши мумкин, яъни унинг ҳаракатланишини тўхтатади.

Газ фазасидан Ҷсаётган кристаллнинг сиртидаги киришмаларнинг юқори концентрацияларида суяқ фазали микротомчи ҳосил бўлиши мумкин ва бунинг натижасида шу жойдаги кристаллнинг Ҷсиш тезлиги газ — кристалл Ҷсиш механизмидан газ — суяқлик — кристалл Ҷсиш механизмига ўтиши ҳисобига бир неча тартибга ошиб кетади. Бундай жараёнга сурма киришмаси иштирокидаги германий кристаллининг газ фазасидан ёки кремний кристаллининг олтин киришмаси иштирокидаги Ҷсиши мисол бўлади.

1.10.4. КРИСТАЛЛАРНИНГ ҶСИШ ЖАРАЁНЛАРИНИ ТЕЗЛАШТИРИШНИНГ ЗАМОНАВИЙ УСУЛЛАРИ

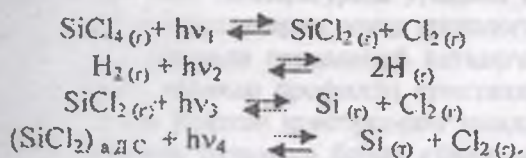
Ҳар хил ташқи таъсирлар ёрдамида кристалларнинг Ҷсиш жараёнларини анчага тезлаштираш, уларнинг струк-

тураларининг мукамаллик даражасини ошириш, кристалланиш температурасини камайитириш ва легирлаш жараёнларини бошқариш мумкин.

Ўсаётган кристаллни электромагнит нурлар билан нурлантириб ва унга электр ёки акустик майдонлар таъсир эттириб, ўсиш жараёнларини стимуллаш мумкин, деб ҳисобланади.

Электромагнит нурлар таъсирида озиклантирилаётган муҳитнинг молекулалари уйғонган (активлашган) ҳолатга ўтиш ёки парчаланиши (фотолиз) мумкин. Газ фазасидан ўстирилаётган кремний кристаллари тўлқин узунлиги диапазони $\lambda = 230+370$ нм бўлган ультрабинафша нурлар билан нурлантирилса, бу жараённинг температураси пасайитириш, ўстирилаётган кристалл структурасининг мукамаллигини яхшилаш ва кристалл ўсиш тезлигини икки марта ошириш имкониятини беради. Ўсиш жараёнларига нурлантиришнинг сезиларли таъсири нурланишнинг солиштирма қуввати $1-10 \text{ Вт/см}^2$ атрофида бўлганда кузатилади.

Нурланишнинг тўлқин узунликларини танлаб, бутун тизимнинг ёки алоҳида молекуланинг, ёки алоҳида қисмининг, ёки молекула боғининг тебраниш частоталари нурланиш частотаси билан резонанс ҳолатда бўлганда уларга селектив таъсир этиш мумкин. Айниқса ёруғликнинг монохроматик манбаларидан (масалан, лазерлардан) фойдаланилганда нурлантириш эффективлигини ошириш, жараён ёки реакцияларнинг алоҳида босқичларига нисбатан маълум бир танлаш имкониятига эга бўламиз. Масалан, $\text{SiCl}_4 - \text{H}_2$ тизимида кремний кристалларини ўстиришда энергиянинг $h\nu$ квантлари таъсирида қуйидагича фотохимёвий реакциялар бўлиши мумкин:



Бошланғич молекулаларнинг боғланиш энергияси ҳар хил бўлганлиги учун у ёки бу реакциянинг бошланишига туртки бўладиган нурланишнинг тўлқин узунлик диапазонлари ҳам ҳар хил бўлади. Бу тизимда ўстирилаётган кремний кристалли структураси

гурасининг мукамаллиги эса фотохимёвий реакцияда ҳосил бўладиган атомлар водороднинг таъсири натижасидадир.

Бундан ташқари электромагнит нурланиш, айниқса ярим ўтказгичларда ўсиш сиртини уйғотади ва фотоадсорбция ҳамда фотокатализининг таъсири натижасида ўсиш жараёнининг фазовий тангланишига эришиш мумкин, яъни нурланган жойда кристаллнинг локал ўсиши таъминланади. Бу микроэлектроникада катта аҳамиятга эга.

II БОБ

ЯРИМУЎТКАЗГИЧЛИ ВА ДИЭЛЕКТРИКЛИ МАТЕРИАЛЛАРНИНГ МОНОКРИСТАЛЛАРИНИ ОЛИШ ТЕХНОЛОГИЯСИ

2.1. ҚАТТИҚ ФАЗАДАН КРИСТАЛЛАРНИ ЎСТИРИШ

Қаттиқ фазадан кристалларнинг ўсишини таъминлайдиган қаттиқ фазали ўзгартириш жараёнлари кристалл панжара симметриясини ўзгартмасдан (рекристаллаш) ёки бошқа симметрияли панжарага эга бўлган янги структура (қайта кристаллаш) ҳосил қилиш билан бориши мумкин. Қаттиқ фазали ўзгартиришнинг ҳар хил турдаги жараёнлари кўпинча *қайта кристаллаш (перекристаллизация)* деган умумий тушунча билан бирлаштирилади.

Қаттиқ фазадан монокристалл ва эпитаксиал қатламлар олишнинг асосий усуллари уч турга бўлинади:

1. Қаттиқ фазада деформацияни куйдириш (отжиг) ва «спекание» қилиш йўли билан рекристаллаш.
2. Полиморфли ўзгартиришларда қайта кристаллаш.
3. Аморф ҳолатдан ва ўта тўйинган қаттиқ қоришмадан қайта кристаллаш.

Кристалл ўстиришнинг қаттиқ фазали усуллариининг афзалликлари қуйидагича: жараёнларни материалларнинг эриш температурасидан паст температурада ўтказиш имконияти, бунинг натижасида кристалларни олиш технологияси соддалашади, айниқса эриганда парчаланиб кетадиган кимёвий бирикмалар бўлса; керакли профили кристалларни олиш соддалашади, чунки ўсаётган кристаллнинг шакли ўсиш жараёни бошлангунгача олдиндан бериб қўйилади; ўстириш температуранинг нисбатан кичиклиги, яъни унга мос ҳолда диффузия коэффициентининг кичиклиги сабабли ўстириладиган кристаллда, айниқса юпқа монокристалл қатлам ўстириладиганда, киришмаларнинг тақсимооти ҳам қатламда, ҳам тагликда бошлангич материалдагидай ўзгартмасдан сақланади.

Кристалл ўстиришнинг қаттиқ фазали усулларининг камчиликларига қаттиқ фазали кристалланишнинг потенциал марказлари зичлигининг юқорилиги, муртақ ҳосил бўлишни бошқаришнинг қийинлиги ва шу сабабли нисбатан катта ўлчамли монокристаллар олишнинг қийинчилиги кабилар киради. Шу сабабли йирик монокристаллар ҳосил қилишда қаттиқ фазали усуллар кам қўлланилади. Фақат аморф ҳолатдан ва ўта тўйинган қаттиқ қоришмалардан қайта кристаллаш усуллари ярим ўтказгичли ва микроэлектрон асбоблар технологиясида юпқа эпитаксиал қатламлар олишда кенг ишлатилмоқда.

2.2. СУЮҚ ФАЗАДАН КРИСТАЛЛАРНИ ЎСТИРИШ

Суюқ фазадан монокристаллар ўстиришнинг барча технологик усуллари иккита гуруҳга ажратиш мумкин: ўз хусусий эритмасидан ва қоришмасидан.

Эритмадан кристаллар ўстириш. Эритмадан кристаллар ўстириш жараёни саноатда энг кўп тарқалган, чунки бунда унумдорлик бошқа жараёнларга қараганда анча юқоридир. Айниқса бир компонентли эритмалардан, яъни чет қиришмалар бўлмаган (бўлса ҳам кичик миқдорда) тизимлардан кристаллар ўстириш тезлиги бошқа усулларга қараганда 100 мартадан ортиқ каттадир.



2.1-рasm Кристаллни эритмадан йўналишли кристалланиш билан ўстиришда температуранинг тақсимланиш схемаси.

Конгруэнт эрийдиган, яъни эриганда кристалл таркиби билан бир хил бўлган материаллар ҳамда эриш температу-

расида буғ босимлари кичик бўлган материаллар учун эритмадан ўстириш жараёни нисбатан содда жараён ҳисобланади. Конгруэнт эримайдиган материаллар учун ўстириш усули ва жараёнини ўтказиш учун керак бўладиган усуллар мураккаблашади.

Эритмадан монокристалллар ўстиришда ҳар хил усуллардан фойдаланилади. Бу усулларнинг ҳаммаси асосида *эритмани йўналишли кристаллаш ётади*. Бунда эритмада ΔT ўта совутилиш ҳосил қилинганда кристаллнинг пайдо бўлиши ва ўсиши бир фаза чегарасида амалга ошади ҳамда иссиқлик кристалланиш фронтидан битта йўналишда олиб кетилади (2.1-расм). Бу эса эритмани битта монокристалл кўринишида кристаллаш имкониятини беради.

Йўналишли кристаллаш усуллари учта гуруҳга бўлиш мумкин:

1. Бу гуруҳга кирадиган усулларда бошланғич маҳсулотнинг (заготовканинг) ҳаммаси эритилади ва бир томондан кристалланади. Бу усуллар *нормал йўналишли кристаллаш* усуллари дейилади.

2. Иккинчи гуруҳга эритилган бошланғич маҳсулотдан чўзиб тортиш йўли билан монокристалл ўстириш усуллари киради. Бу усуллар *эритмадан кристалларни тортиб ўстириш* усуллари дейилади.

3. Учинчи гуруҳга ҳар бир вақт мобайнида бошланғич маҳсулотнинг фақат унча катта бўлмаган бир қисми (зонаси) эритиладиган ва кристалланидиган усуллар киради. Бу усуллар *зонали эритиш ёки зонали қайта кристаллаш* усуллари дейилади.

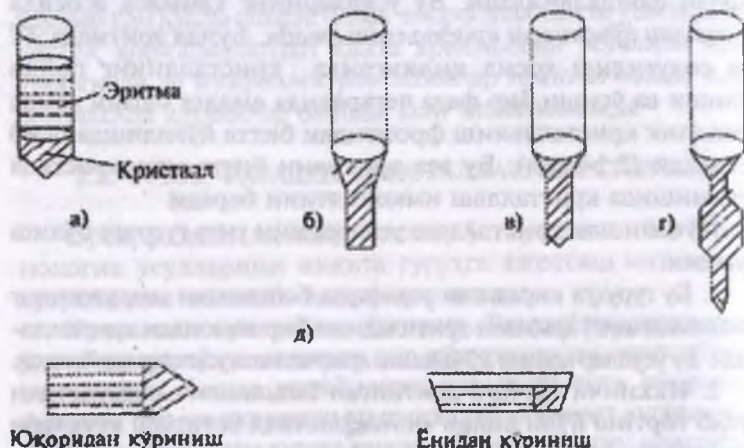
Бу гуруҳларга тааллуқли энг асосий усулларни кўриб чиқамиз.

2.2.1. ЭРИТМАЛАРНИ НОРМАЛ ЙЎНАЛИШЛИ КРИСТАЛЛАШ УСУЛЛАРИ

Бу усулларнинг ҳаммаси учун умумий бўлган нарса ўсиш жараёни давомида ўсаётган кристаллнинг эритма турган контейнер (тигель) деворлари билан контактда бўлишидир. Бу усулларда кристалланиш фронтидаги ўта совутилиш температуравий градиентли иссиқлик майдонини ҳосил қилаётган қиздиргичга нисбатан эритмали тигелни силжитиб ёки қиз-

дирғични эритмәли тигелга нисбатан хәрәкәтлантириб ҳосил қилинади.

Нормал йўналишли кристаллаш жараёнини махсус ўстирмасиз (затравкасиз) амалга ошириш мумкин. Бу усулда кристалланидиган материалнинг ҳаммаси жараённинг бошида эриган ҳолатда бўлади.



2.2-расм. Нормал йўналишли кристалланиш усули билан кристаллар ўстириш учун қўлланиладиган ҳар хил шаклли тигелларнинг схемаси.

Совутилиш жараёнида кристаллнинг эриш температурасидан паст бўлган тигелнинг соҳаларида бир нечта кристалланиш марказлари ҳосил бўлади. Кристаллнинг фақат битта кристалланиш марказидан ўсиш эҳтимолини ошириш учун махсус ҳар хил конструкцияли тигеллардан фойдаланилади (2.2-расм). Бунда тигеллар иссиқлик майдонида вертикал (2.2-расм, а-г; Брижмен усули) ва горизонтал (2.2-расм, д) жойлашиши мумкин.

Нормал йўналишли кристаллаш жараёнини ўтказиш учун қуйидаги аслахалар керак бўлади: материали эритмага ва кристалланиш жараёни ўтказиладиган атмосфера газига кимёвий чидамли, берилган шаклли тигель; керакли иссиқлик майдонини ҳосил қилиб берадиган печь; печнинг температурасини бошқарувчи ва тигель ёки қиздирғични механик хәрәкәтлантирувчи тизимлар.

Тигелнинг материали эритма билан ҳўлланмаслиги керак, чунки шу ҳолдагина ўстирилган кристаллни тигелдан уни синдирмасдан чиқариб олиш ҳамда қолдиқ деформация ва нуқсонларни минимумга келтириш мумкин. Бундан ташқари тигель кераклича термик ва механик мустаҳкамликка эга бўлиши керак. Тигеллар тайёрлаш учун кўпинча кварцли шиша, алюминий оксиди, графит, платина, бериллий оксиди, магний оксиди, цирконий диоксиди, торий диоксиди ва бошқа материаллардан фойдаланилади.

Агар тигел материалини ҳўллайдиган моддалардан кристалл ўстириляётган бўлса, унда жуда ҳам юпқа деворли, масалан, платинали контейнер тайёрланади. Бундай контейнерлар совутилганда осон деформацияланади ва ўстириляётган кристалларда катта механик кучланишлар ҳосил қилмайди.

Нормал йўналишли кристаллаш усули билан бир қатор яримўтказгичли ва диэлектрик материалларнинг йирик монокристаллари ҳосил қилинади. Al_2O_3 корунднинг кристаллари молибденли тигелда $2037^{\circ}C$ температура ва 10^{-1} Па босимли вакуумда 10 мм/соат тезлик билан ўстирилади. Ҳозирги вақтда вертикал йўналишли кристаллаш усули (Брижмен усули) билан ўстирмадан фойдаланиб диаметри 200 мм ва узунлиги 300 мм бўлган кристаллар ўстирилмоқда. Бундай кристалларда дислокацияларнинг зичлиги 10^2 см^{-2} дан ошмайди. Горизонтал йўналишли кристаллаш усули (асосан Х.С.Багдасаров томонидан ривожлантирилган) билан қалинлиги 30 мм ва юзаси $300 \times 300 \text{ мм}^2$ бўлган корунднинг монокристалли пластиналари ҳосил қилинмоқда. Кристаллари нормал йўналишли кристаллаш усули билан ўстириладиган баъзи бир материалларга мисоллар куйидаги 2.1 - жадвалда келтирилган:

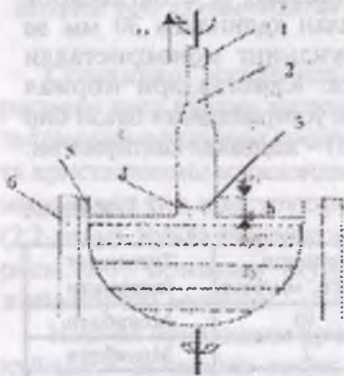
2.1-жадвал

Кристаллнинг материали	Эриш температураси $^{\circ}C$	Ўстириш тезлиги, мм/соат	Тигелнинг материали
Al_2O_3	2037	10	Молибден
VAl_2O_3	1975	2	Молибден
$Gd_2Ga_2O_7$	1825	2	Иридий
$FeAl_2O_3$	1790	10	Иридий
$VFeO_3$	1685	2	Платина
CaF_2	1392	1	Графит
LiF	870	3	Платина

Кўриб ўтилган усулнинг асосий камчилиги ўстириладиган кристалл билан тигелнинг чизиқли кенгайиш температуравий коэффициентларининг ҳар хиллиги натижасида мукаммал кристаллар олишнинг қийинлигидир.

2.2.2. КРИСТАЛЛАРНИ ЭРИТМАДАН ТОРТИБ ЎСТИРИШ УСУЛЛАРИ

Бу усуллар ҳозирги вақтда саноатда назоратланадиган ва қайтариладиган хоссали яримўтказгичли ва диэлектрик материалларнинг йирик монокристалларини ишлаб чиқаришда энг кўп тарқалган усуллардан ҳисобланади. Бу усулларнинг ҳар хил модификациялари кўп бўлиб, буларнинг ҳаммаси Чохральский усули номи билан аталади. Кристалларни эритмадан тортиб ўстириш усулининг принципи биринчи марта 1916 йилда Чохральский томонидан таклиф қилинган эди. Бу усулнинг моҳияти қуйидагича: бошланғич материал (кукун ёки поликристалл бўлагини кўринишида) яхшилаб тозалангандан сўнг тигелга солинади ва эритилиш ҳолатига келтирилади. Бу жараён герметик камерада вакуумда ёки нейтрал (инерт), оксидловчи ёки қайтарувчи атмосферада ўтказилади. Кейин ўлчамлари бир неча миллиметр бўлган ўстирма



2.3-расм. Эритмадан тортиш усули билан кристалл ўстириш схемаси: 1-ўстирма; 2-кристалл бўйни; 3-кристалланиш фронти; 4-эритманинг ўта совиغان соҳаси;

5-тигель; 6-қиздиргич.

(затравка) совитиладиган кристалл ушлагичга ўрнатилиб ва керакли кристаллографик йўналишда ориентацияланиб, эритмага ботирилади. Ўстирманинг ботирилган учи қисман эритмадан кейин ва керакли температура режимига чиқилгандан сўнг юқорига қараб шундай тезликда тортиладики, бунда эритманинг кристалланиши ўстирма кристаллидан бошланиши керак. Кристаллнинг диаметри тортиш тезлигини ва эритма температурасини танлаб олиш билан бошқарилади.

Эритмадан тортиш усули билан кристалл ўстириш схемаси 2.3 -расмда келтирилган.

Эритма-ўстирманинг бўлиниш чегараси эритма сиртидан юқорида жойлашган бўлади (2.3-расм). Унинг баландлиги h эса эритманинг қиздирилганлигига ва ўстирмадан иссиқлик олиб кетилиш шароитига боғлиқ бўлади. Эритманинг цилиндрик устуни баландлигини унинг оғирлиги билан бўлиниш чегарасидаги сирт таранглик кучини тенглаштириб баҳолаш мумкин:

$$2\pi\gamma = h\rho_c \pi r_c^2 g, \quad (2.1)$$

бу ерда, γ — эритма устунининг радиуси, γ — эритманинг сирт таранглиги, h — эритма устунининг баландлиги (одатда 2-5 мм атрофида бўлади), ρ_c — эритманинг зичлиги, g — оғирлик кучи тезланиши.

Бу босқичда асосий рол жараённинг иссиқлик шароитларига тааллуқли бўлиб, улар кристалланиш фронтининг шаклига боғлиқ бўладиган кристалл ва эритмадаги температура градиентини, кристалланиш фронти яқинидаги эритманинг ўта совитилган соҳасининг ўлчамларини, кристаллнинг диаметри ва ўсиш тезлигини, ундаги термик кучланиш ва ҳоказоларни аниқлайди. Бу жараёндаги иссиқлик узатилиши қиздиргичдан тигелга келаётган иссиқлик оқими ҳамда эритма ва кристаллдан олиб кетилаётган иссиқлик оқимларининг йиғиндиларидан ташкил топади. Бу оқимларнинг ўзаро нисбати ўстирилаётган монокристаллдаги ва эритмадаги изотерма шакли ва температура градиентини аниқлайди. Иссиқлик узатиш жараёнларига ўсиш камерасидаги атмосферанинг характери сезиларли таъсир кўрсатади. Вакуумда кристалл ўстирилганда иссиқлик узатилиши фақат нурланиш йўли билан амалга ошади. Газли муҳитда эса иссиқлик узатишда асосий ролни конвекцияли жараёнлар ўйнайди. Бу ҳолатда иссиқлик узатилишининг интенсивлиги газнинг босими ва унинг иссиқлик сифимининг ошиши билан ортади.

Температура градиенти таъсирида ўсаётган монокристаллда термик кучланишлар ҳосил бўлади ва бунинг натижасида дислокациялар пайдо бўлади. Температура градиентининг камайиши дислокациялар ҳосил бўлишини камайтиради ва кристаллнинг ўсиш тезлигини оширади.

Ўсаётган кристаллдан олиб кетилаётган иссиқлик оқими эритмадан келаётган иссиқлик оқими ва бўлиниш чегара-

сида кристалланиш туфайли ажралаётган иссиқлик миқдори йиғиндиларидан ташкил топади. Эритмадан келаётган иссиқлик оқими Q_0 эритмадаги температура градиентига пропорционал бўлади; кристалланиш иссиқлиги Q_k кристалл массасининг ўсиш тезлигига (кристаллнинг чизиқли ўсиш тезлиги v нинг кўндаланг кесим юзаси $s = \pi d^2/4$ ва кристалл zichлиги ρ га кўпайтмасига тенг) ва кристалланишнинг солиштирма иссиқлиги L га пропорционал. Кристалл ўсишининг мумкин бўлган максимал тезлиги унда ажралиб чиқаётган иссиқлик Q_0 нинг олиб кетилиш тезлиги билан аниқланади. Иссиқлик баланси шарти бўйича $Q_0 = (Q_0 + Q_k)$. $Q_k = (\pi d^2/4) v \rho L$ ни эътиборга олсак, унда

$$v = (4/\pi d^2) \cdot (Q_0 - Q_0) / \rho L, \quad (2.2)$$

$$d = 2 \cdot (Q_0 - Q_0) / \pi v \rho L)^{1/2} \quad (2.3)$$

ларни ҳосил қиламиз.

Демак, кристаллнинг ўсиш тезлигини ошириш учун эритмадаги температура градиентини минимумга келтириш, яъни ундан олиб кетилаётган Q_0 иссиқликни камайтириш керак экан. Бўлиниш фазасидан узатилаётган Q_0 иссиқликнинг катталиги ўзгармас бўлганда ўсаётган кристаллнинг диаметрини ошириш учун ўсиш тезлигини камайтириш керак (Q_0 билан аниқланадиган эритманинг температураси ўзгармас бўлганда) ёки эритманинг температурасини пасайтириш керак (тортиш тезлиги ўзгармас бўлганда). Лекин амалда кристаллнинг диаметри эритманинг температурасини ўзгартириб бошқарилади. Ўсиш шароитини стабиллаш учун замонавий қурилмалар қиздиргичнинг температурасини ушлаб турадиган, ўсаётган қуйманинг диаметрини, тигел ва кристаллни кўтариш ва айлантиришни узлуксиз назорат қилиб турадиган автоматик тизимлар билан таъминланган. Бу тизимлар ЭХМ орқали бошқарилади.

Кристаллни ўстириш жараёни уни эритмадан узиш билан якунланади.

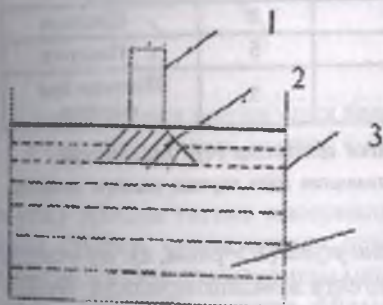
Киропулос усули. Эритмадан кристаллни тортиб ўстириш усулига яқин усуллардан бири Киропулос усули ҳисобланади (2.4-расм).

Бу усулнинг фарқи шундаки, бунда ўстирма эритмага туширилгандан кейин тортилмайди ва унда кристаллнинг ўсиши модданинг эриш температурасига мос келувчи изотерма ҳисобига бўлиб, у эритма ичкарасига силжиб боради.

Бу эритманинг температурасини пасайтириш билан, кристалл ушлагич орқали ўстирмани совитиш билан амалга оширилади. Бу усул ёрдамида кўндаланг кесим диаметри ба- ландалликка қараганда катта бўлган кристаллар ўстирилади.

Кристалларни тортиб ўстириш усуллари-нинг усту- нлиги шундаки, бунда кристаллар фазода эркин ўсади, ташқа- ридан механик таъсир бўлмайди ҳамда кристаллнинг ўлчам- ларини осон бошқариш мумкин.

1990 йил бутун дунёда 2000 т кремний тортиш усули билан ўстирилган. Бу эса ўстирилган ҳамма кремнийнинг 90-95% ни ташкил этади. Уларнинг максимал габаритлари: диаметри $\varnothing 150-300$ мм га, узунликлари $L=1,5-2$ м га етди ва йилдан-йилга ошиб бормоқда ҳамда борган сари ўстири- лаётган кристалларнинг структуралари мукаммаллашмоқда. Мас-



2.4-расм. Киропудос усули билан кристаллар ўстириш схемаси: 1-ў- тирма; 2-ўсаётган кристалл; 3-ти- гель; 4-эритма.

алан, юқорида келтирилган ўлчамли кристаллар амалда дислокациясиз ўстирил- моқда. Кристалл ўстирила- диган қурилмалар қувват ва температурани юқори аниқликда бошқарадиган тизимлар билан таъмин- ланмоқда. Бундай тизимлар ёрдамида 1500°C гача қиз- диришда температурани $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ аниқликкача ушлаб туриш мумкин.

Ҳозирги вақтда эрит- мадан тортиш усули би- лан учувчан компонент буғининг босими унча юқори бўлмаган кўпчи-

лик ярим ўтказгичли материалларнинг монокристаллари ўстирилмоқда (масалан, $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ гуруҳидаги ярим ўтказгичли бирикмаларнинг нитридлари каби). Монокристаллари эрит- мадан тортиш усули билан ўстириладиган диэлектрик ма- териаллар 2.2- жадвалда келтирилган.

2.2.3. ЗОНАЛИ ЭРИТИШ УСУЛЛАРИ

Зонали эритиш усуллари- дан материалларни ўта чуқур тозалаш билан бир қаторда ярим ўтказгич ва диэлектрик монокристалларини ўстириш учун ҳам фойдаланиш мум- кин. Бу усулнинг икки хил варианты мавжуд:

№	Материал	Эриш температураси, °C	Ўсиш тезлиги, мм/соат *	Тигелнинг материали
1	$MgAl_2O_4$	2100	6	Иридий
2	$V_2Al_4O_{13}$	1975	2	Иридий
3	$LiTaO_3$	1650	10	Иридий
4	$CaWO_4$	1550	10	Родий
5	$MnFe_2O_4$	1500	5	Платина
6	$NaBa_2Nb_3O_{13}$	1450	5	Платина
7	$Sr_{0.1}Ba_{0.9}Nb_3O_{13}$	1406	5	
8	$LiNbO_3$	1238	5	Платина
9	$ZnWO_4$	1200	10	Платина
10	$BaClF$	1008	8	Платина
11	$Bi_{10}SiO_{20}$		5	Платина
12	KCl	770	5	Платина ёки фарфор

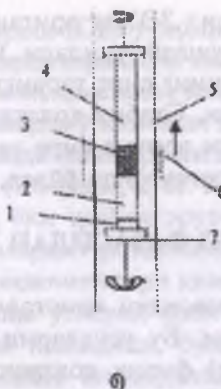
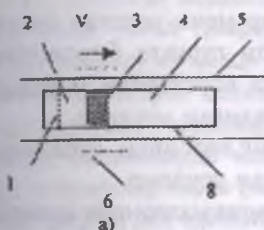
* Ўсиш тезлиги диаметри 20 мм бўлган кристаллар учун келтирилган, гириляётган кристаллнинг диаметри хатталашган сари тортиш тезлиги камаяди.

1) *Горизонтал зонали эритиш усули* (2.5-расм, а). Бу усулда кристалланаётган материал тигелга жойлаштирилади. Бунда тигел материалга ҳам нормал йўналишли кристаллаш усулидаги тигелга қўйиладиган талаблар қўйилади.

Зонали эритиш усуллари билан кристаллар ўстиришда тигелнинг бир чеккасида жойлаштирилган ўстирмадан фойдаланилади. Жараённинг бошланишида ўстирма билан бошланғич материал чегарасида эритилган зона ҳосил қилинади. Бунда ўстирманинг бошланғич материалга тегиб турган қисми эритилади. Ундан кейин эритилган зона секин-асталик билан ўстирмадан бошлаб бошланғич материалнинг бир бошидан охири томон силжитиб борилади. Бунинг натижасида бошланғич материалнинг монокристаллга айланиб ўсиши таъминланади. Зонали эритиш билан кристаллаш усулининг устуңлиги тигелдан фойдаланмасдан ўстириш имконияти бўлиб, бу вертикал тигелсиз зонали эритиш усулидир.

2) *Вертикал тигелсиз зонали эритиш усули* (3ЭУ) (2.5-расм, б). Вертикал тигелсиз 3ЭУда (сузувчи зона

1. Ўстирма
2. Кристалл
3. Эритилган зона
4. Бошланғич материал
5. Герметик камера девори
6. Юқори частотали печь-индуктор
7. Кристалл ушлағич
8. Тигель



2.5-расм. Зонали эритиш усули билан кристаллар ўстириш схемалари: в-горизонтал зонали эритиш; б-вертикал тигельсиз зонали эритиш.

усули) эритма тигель материаллари билан ифлосланишдан холи бўлади ҳамда тигель деворлари томонидан ўсаётган кристаллга таъсир қиладиган механик қучланиш бўлмаганлиги учун нуқсонлар ҳосил бўлмайди. Сузувчи зона усули яримўтказгич ва диэлектрикларнинг ўта тоза монокристалларини ўстиришда ҳамда эриш температураси ва эриган ҳолатда кимёвий активлиги юқори бўлган материалларни ўстиришда қўлланилади.

Бошланғич материалнинг солиштирма электр қаршилигига боғлиқ ҳолда эриган зона юқори частотали қиздиргич, электрон нурли қиздиргич, фокусланган нурлар энергияси каби манбалар орқали шаклланади. Кўпроқ эритманинг самарали аралашиниши таъминлайдиган юқори частотали қиздиргичдан фойдаланилади.

Намуна бўйлаб эритилган зонани силжитиш учун намуна қиздириш манбаига нисбатан ёки қиздириш манбаи намунага нисбатан силжитилади.

Юқориги ва пастки кристалл ушлағичлар қарама-қарши йўналишларда айлантирилади. Бунинг натижасида эритма яхши аралашади ва кристалл цилиндр шаклида ўсади.

Тигелсиз ЗЭУда эриган зона сирт таранглик кучлари ёрдамида ушлаб турилади. Унинг шакли гидростатик босим ва эритманинг сирт таранглик кучлари нисбатларига боғлиқ бўлади. Стабил ҳолатдаги эриган зонанинг максимал баландлиги эритма сирт таранглигининг унинг зичлигига нисбати қанча катта бўлса, шунча катта бўлади.

2.3. ГАЗ ФАЗАСИДАН КРИСТАЛЛАР ЎСТИРИШ

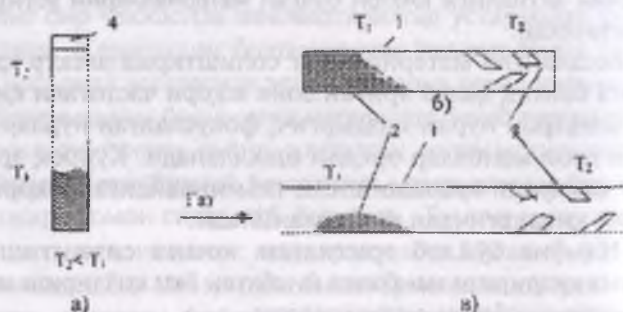
Газ фазасидан кристаллар бир неча усуллар ёрдамида ўстирилади. Бу усулларни иккита гуруҳга бирлаштириш мумкин: а) физик конденсацияга асосланган усуллар, ва б) кимёвий реакция иштирок эталиган усуллар.

Биринчи гуруҳ усулларидан энг асосийси сублимация-конденсация жараёнига асосланган усулдир.

Иккинчи гуруҳ эса газсимон бирикмаларнинг кристалланиш зонасида ажралиши (ёки қайтарилиши) натижасида кимёвий синтез ва кимёвий транспорт усулларига асосланган.

Газ фазали усуллар ёрдамида энг керакли электрон техника материалларининг монокристаллари, биринчи навбатда $A^{IV}B^{VI}$, $A^{IV}B^{IV}$, SiC каби бирикмалар ҳосил қилинади.

Газ фазасидан кристаллар ўстириш нисбатан паст температураларда, материалнинг эриш температурасидан анча паст температураларда ўтказилади.



2.6-расм. СКУ ёрдамида газли фазадан кристалл ўстириш: а,б-берк тизимлар; в-оқар тизим. 1-контейнер; 2-бошланғич модда (шихта); 3-оммавий кристалланиш зонаси, 4-монокристалл устирма

Сублимация - конденсация усули (СКУ) билан эриш температурасидан паст температураларда кераклича юқори буғ босимига эга бўлган моддаларнинг монокристалли ўстирилади. Бу жараёнлар ё берк ёки оқар тизимларда ўтказилади (2.6-расм).

Берк тизимни энг осон ҳолда кавшарланган кварцли ампулада ҳосил қилиш мумкин (2.6-расм, а, б). Қийин эрувчан моддалар учун корунддан ёки қийин эрувчан металллардан кавшарлаб ясалган тигеллардан фойдаланилади. Агар кристалланаётган модданинг компонентлари кимёвий актив бўлса, унда тигел графит, шиша углерод каби материаллардан ногерметик ҳолда шундай ясаладики, бунда тигелдан буғларнинг чиқиб кетиши ҳисобга олмайдиган даражада бўлади. Бундай тизимлар *квазиберк тизимлар* дейилади.

Берк тизимларда масса узатиш газли муҳитга боғлиқ ҳолда молекуляр оқим (вакуумда) ҳамда молекуляр ёки конвектив диффузия ҳолатларда амалга оширилади.

Оқар тизимларда кристалл ўстиришда бошланғич модданинг буғларини кристалланиш зонасига инерт газ оқими олиб келади (2.6-расм, в).

Газ фазасидан кристалллар ўстиришнинг ҳамма усулларида кристалллар ўз ҳолича ҳосил бўладиган кристалланиш марказларидан (масалан, реактор деворларида) (2.6-расм, б, в) ёки ўстирмадан фойдаланиб (2.6-расм, а) ўстирилиши мумкин.

2.4. ПРОФИЛЛИ МОНОКРИСТАЛЛАР ҲОСИЛ ҚИЛИШ

2.4.1. ШАКЛЛАНТИРИШНИНГ АСОСИЙ ПРИНЦИПЛАРИ

Юқорида кўрсатилган усуллар ёрдамида керакли шаклдаги ва керакли ўлчамли кристаллларни ўстириш мумкин эмас. Профиллаш ёрдамида ўстиришга шундай усуллар кирадики, бундай усуллар билан энг рационал геометрик шаклдаги кристалллар ўстирилади ва улар асосида асбоблар яратилади. Ярим ўтказгич ва диэлектрикларнинг профилланган кристаллари қуйидаги мақсадлар учун ўстирилади:

1) материаллардан, айниқса қиммабаҳо ноёб материаллардан асбобларни кесиб ва жилвирлаб тайёрлашда йўқотишлар камайтирилади (механик қайта ишловда йўқотишлар 70-90% га боради);

2) юқори қаттиқликка эга бўлган, ишлов бериш қийин бўлган материалларда механик қайта ишловга сарфланадиган меҳнат камайтирилади;

3) улар асосида тайёрланадиган асбобларга қўйиладиган талаблардан келиб чиқиб, керакли электрофизик ва геометрик параметрли кристаллар олиш (дисклар, мембраналар, ипсимон ва лентали кристаллар, цилиндрик шаклдаги кристаллар ва ҳ.к.);

4) материаллар ва улар асосида асбоблар ишлаб чиқаришни автоматлаштириш ва узлуксиз жараёнларни ишлаб чиқиш учун шарт-шароитни яратиш;

5) материални рационал сарф қилиш оқибатида ва профилланган кристалларда пайдо бўладиган янги хоссалар асосида унинг қўлланиладиган соҳаларини қараб чиқиш.

Профилланган кристалларни ўстириш учун кристалланаётган моддани шакллантирадиган ҳар хил физик-кимёвий омиллардан фойдаланилади:

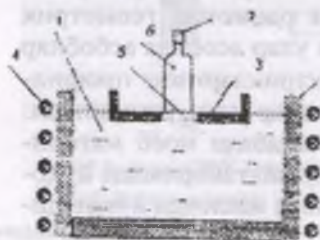
- кристаллнинг ўсишини механик чегаралаш;
- кристалланиш тезлигининг анизотропияси;
- кристалланиш жараёнига капилляр куч ва иссиқлик

майдонларининг таъсири.

Профилланган кристалларни қаттиқ фазали айланишдан, эритмадан, суюқ қоришмадан ва газли фазадан кристаллаб ўстириш мумкин.

Газ ва суюқ фазалардан плёнкаларни эпитаксиал ўстириш монокристалл тагликда юпқа кристалл қатламларнинг профилли кристалланиш жараёнига мисол бўла олади.

Профилланган кристалларнинг эритма менискини шакллантириш ёрдамида ўстириш Степанов томонидан таклиф қилинган. Бу усулда менискка шакл бериш учун махсус шакллантирувчилар ёрдамидан фойдаланилди. Бундай шакллантирувчилар сузгич кўринишида бўлиб, эритманинг мениски сузгичдаги тешикдан тепароқда бўлади ва у эритма билан ҳўлланмайдиган материалдан ясалади.



2.7-расм. Пластина кўринишдаги монокристаллни тортиб ўстирувчи қурилманинг схематик қўриниши: 1-эритма; 2-тигель; 3-графитли сузгич; 4-юқори частотали индуктор; 5-тирқиш; 6-монокристалл пластинаси; 7-устирма.

Степанов усули ёрдамида лента, пластина ва бошқа шаклдаги монокристалларни ўстириш мумкин.

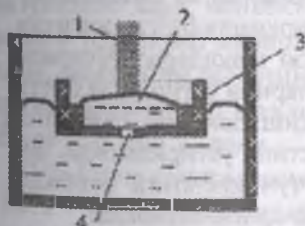
2.4.2. СТЕПАНОВ УСУЛИ БИЛАН ПРОФИЛЛИ КРИСТАЛЛАР ЎСТИРИШ ТЕХНОЛОГИЯСИНИНГ ХУСУСИЯТЛАРИ

Юпқа пластина шаклида кристаллини Степанов усули билан ўстиришда фойдаланиладиган оддий қурилманинг схемаси 2.7-расмда кўрсатилган.

Бу қурилмада шакллантиргич кесилган тирқишли сузгич кўринишда бўлиб, графитдан тайёрланган. Тирқиш эритма сатҳидан 8-9 мм пастда жойлашгани учун эритманинг босим остида тирқишдан ўтиши таъминланади. Тирқишнинг шакли ва чуқурлиги кристалланиш жараёнининг турғунлигига кучли таъсир қилади.

Степанов усулида профилланган кристалларни ўстириш тезлиги 1-10 мм/мин ни ташкил қилиши мумкин. Бу усулнинг керакли хусусиятларидан бири ўсаётган кристаллнинг тирқиш девори билан контактда бўлмаслигидир. Кристалл лентаси билан тирқиш орасидаги очиқлик текислик қисмида 10-20 мкм, чеккасида эса 50-100 мкм атрофида бўлади.

2.8-расмда кварцдан тайёрланган сузгичнинг фасонли чуқурчасидан лентали монокристаллни ўстириш схемаси тасвирланган. Бунда фасонли чуқурчага эритма капилляр тешик орқали ўтади. Бу эса сузгичдаги эритма атомлари-



2.8-расм. Капилляр каналли сузувчи тигелнинг фасонли ўйма орқали маълум шаклдаги монокристалл ўстириш қурилмасининг схемаси: 1-лента кўринишда тортиб ўстириладиган монокристалл; 2-эритма; 3-сузувчи тигель; 4-капилляр канал.



2.9-расм. Тубида тор тешик бўлган тигель орқали профилланган монокристалл ўстирувчи қурилма схемаси.

нинг тигелга диффузияли узатилиш жараёнини йўқ қилиш имкониятини беради.

2.9-расмда тигелнинг тубидаги тор тешикча орқали Степанов усули билан яримўтказгичли монокристаллар ўстириш схемаси тасвирланган. Бунда кристалланувчи томчи ўсаётган кристалл ва тигель ўртасидаги сирт таранглик кучлари билан ушлаб турилади.

Степанов усули билан германий кристаллини ўстиришда шаклантирувчилар кўпинча графитдан тайёрланади. Графит германий эритмаси билан ҳўлланмайди ва у яримўтказгич даражасидаги тозаликда бўлганлиги сабабли ўсаётган кристалларни ифлослантирмайди. Германийнинг профилланган монокристалларини ўстиришда шакл берувчилар сиртига курумнинг юпқа қатлами суртилган кварцдан ҳам тайёрланиши мумкин.

Кремнийнинг профилланган монокристалларини ўстиришда шакл берувчилар учун материаллар танлаш анча мураккаб муаммодир, чунки кремний эриш температура-сида юқори кимёвий активликка эга бўлади. Шу сабабли синаб кўрилган кўп материалларнинг орасидан фақат нитрит бордан тайёрланган шакл берувчиларда қониқарли натижаларга эришилди. Эни 35 мм гача ва қалинлиги 2,5 мм гача бўлган лентасимон кремний аргон атмосферасида ёки вакуумда 2 мм/мин тезлик билан ўстирилади.

Ҳозирги даврда германий ва сапфирнинг профилланган монокристалларини ўстиришда энг катта муваффақиятларга эришилди. Степанов усули билан германий ва сапфирнинг монокристаллари пластина, квадрат қирқимли бўлган ингичка ленталар, цилиндр, трубача ва ҳоказо шаклиларда ўстирилмоқда. Айниқса сапфирнинг кристалларини ўстиришда битта ўстирмалан шакл берувчининг тирқишидан бир пайтнинг ўзида эни 100 мм бўлган еттигита пластина ўстирилмоқда. Бу пластиналар микроэлектроника учун кремний асосида эпитаксиал қатламлар ўстиришда кенг қўлланилмоқда.

2.5. МОНОКРИСТАЛЛ ЎСТИРИШДА ТЕХНОЛОГИК ЖАРАЁНЛАРНИ БОШҚАРИШ

Кристалларни ўстириш кўп омилли мураккаб жараён бўлиб, унинг параметрлари ўстирилаётган монокристалл-

нинг материалига ва ўстириш усулига боғлиқ бўлади. Ўстирилган кристаллнинг сифати унинг кристалл структурасининг мукамаллигига, дислокациянинг борлигига ва зичлигига, термоэластик кучланишларга, солиштирма қаршиликнинг бир хиллигига, киришмаларнинг кўндаланг кесим ва узунлик бўйича бир хил тақсимланганлигига боғлиқ бўлади. Сифатли монокристалл олиш учун технологик режимлар мукамал бўлган назорат ва бошқарувчи қурилмалар ёрдамида аниқ ушлаб турилади. Ҳозирги даврда автоматлаштирилган бошқариш тизимларини яратиш мақсадида технологик жараёнларни назорат қилиш ва бошқариш соҳаларидаги энг катта ютуқлар эригмадан кристаллларни ўстириш усуллари учун эришилган.

Монокристаллларни ҳосил қилиш усулларида қатъи назар технологик жараён ва кристалл — эритма тизими параметрларини назорат қилиш усуллари алоҳида ажратилади. Кристаллларни олиш усулига боғлиқ ҳолда технологик жараёнларнинг параметрларига кристалл ва тигелнинг айланиш тезликлари, кристаллни тортиш тезлиги ва эриган зонанинг ўтиши, қайиқчани тортиш тезлиги, қиздиргичнинг ва атроф муҳитнинг (кристаллаш камерасининг ички ҳажми) температураси, камера деворини ва ўстирмани совитувчи сувнинг босими ва ўтиш тезлиги ва ҳоказолар киради.

Кристалл — эритма тизимининг параметрларига эритма ва кристаллнинг температураси ва улардаги температура градиентлари, конвектив оқимлар ҳосил қилаётган эритмадаги тезликлар майдони, менискнинг шакли ва баландлиги, эритилган зонанинг баландлиги ва шакли, кристалланиш фронтининг шакли, ўсаётган кристаллнинг диаметри ва шу кабилар киради.

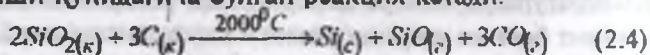
Ўсаётган кристаллнинг сифатини бошқариш учун кристалл — эритма тизимидаги параметрларнинг назорати асосий аҳамиятга эга. Ўсаётган кристаллнинг диаметрини назорат қилишда Степанов усулидаги шакл берувчилардан, телекамералардан, рентген қурилмалардан ва тортувчи мосламалардан фойдаланилади. Менискнинг баландлигини назорат қилишда фотопирометр, лазерли локация каби усуллардан фойдаланилади.

2.6. АСОСИЙ МОНОКРИСТАЛЛИ МАТЕРИАЛЛАР ТЕХНОЛОГИЯСИ

2.6.1. КРЕМНИЙ МОНОКРИСТАЛИНИ ОЛИШ ТЕХНОЛОГИЯСИ

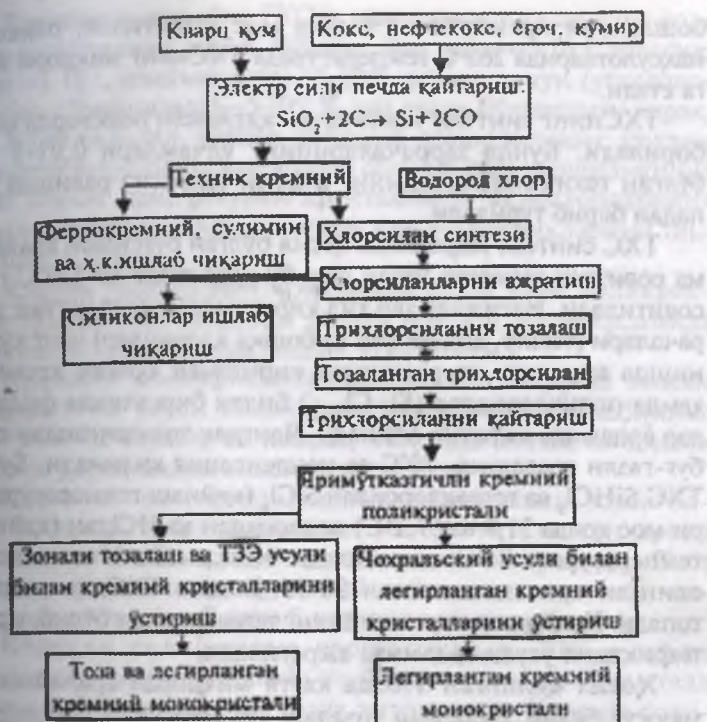
Яримўтказгичли кремний монокристаллини олиш технологияси қуйидаги асосий босқичлардан ташкил топади: 1) техник кремний олиш; 2) техник кремнийни осон қайтариладиган учувчан бирикмага айлантириш; 3) бирикмани тозалаш ва қайтариш ҳамда ундан кремнийнинг поликристалл стерженларини ҳосил қилиш; 4) кристаллаш усули билан кремнийни яқуний тозалаш (тигелсиз зонали эритиш); 5) легирланган монокристалларни ўстириш (Чохральский усули билан).

2.10-расмда кремний ишлаб чиқариш асосий босқичларининг схемаси келтирилган. Техник кремний олиш учун кремний диоксида (SiO_2) углерод (C) билан қайтарилади. Бу жараён электр ёйли печларда графитли электродлар ёрдамида ўтказилади. Печь энг тоза навли кварц куми ва кўмир, кокс ва ёғоч пайрахаси кўринишидаги углерод аралашмаси билан тўлдирилади. Электр токининг таъсирида бу аралашма 2000°C гача қиздирилади ва натижада умумий кўриниши қуйидагича бўлган реакция кетади:



Бундай йўл билан ҳосил қилинган техник кремнийнинг таркиби: $98\div 99\%\text{Si}$, $1\div 2\%(\text{Fe}, \text{Al}, \text{B}, \text{P}, \text{Ca}, \text{Cr}, \text{Cu}, \text{Mg}, \text{Mn}, \text{Ni}, \text{Ti}, \text{V}$ ва бошқалар) дан иборат бўлади.

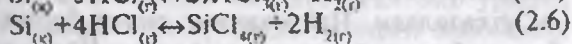
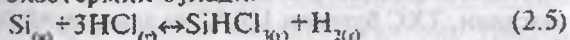
Поликристалл кремний олишнинг замонавий технологияси трихлорсиланни водород билан қайтарилишига, кремний тетрахлоридини рух билан қайтарилишига ва моносиланни пиролиз қилишга асосланган. Кремнийнинг 80% га яқини трихлорсиланни (ТХС) водород билан қайтариш (тиклаш) йўли билан олинади. Бу жараён қуйидаги афзаликларга эга: ТХС ҳосил қилишнинг осонлиги ва тежамкорлиги, ТХСни тозалашнинг самарадорлиги, кремнийни ажратиш олиш ва ўтказиш тезлигининг юқорилиги (кремний тетрахлоридидан фойдаланилганда кремнийнинг ажралиши 15% ни, ТХСдан фойдаланилганда эса энг ками билан 30% ни ташкил қилади), маҳсулот таннархининг камлиги.



2.10-расм. Яримўтказгичли кремний ишлаб чиқаришнинг технологик схемаси.

Трихлорсилан кремнийни гидрохлорлаш йўли билан ҳосил қилинади: бунда техник кремний $260^{\circ}\text{--}400^{\circ}\text{C}$ температурада хлорид кислотаси билан таъсир эттирилади.

Кремнийнинг хлорсиланларини олиш реакциялари қайтарилидучан ва экзотермик бўлади:



300°C дан юқори бўлган температурада реакция маҳсулотларида ТХС бўлмайди. ТХСнинг чиқиш миқдорини ошириш учун жараённинг температураси камайтирилади. Бу эса (2.6) реакциянинг тезлигини анчага секинлаштиради. (2.5) реакциянинг тезлигини ошириш учун катализаторлардан (мис, темир, алюминий ва бошқалар) фойдаланилади. Масалан,

бошланғич кремнийга 5% гача мис киритилса, реакция маҳсулотларида 265°C температурада ТХСнинг миқдори 95% га етади.

ТХСнинг синтези «қайновчи» қатламли реакторда олиб борилади. Бунда заррачаларининг ўлчамлари 0,01-1 мм бўлган техник кремнийнинг кукунли узлуксиз равишда тепадан бериб турилади.

ТХС синтези жараёнида ҳосил бўлган бугсимон аралашма совитиш зонасига ўтади ва у бу ерда тезда 40-130°C гача совитилади. Натижада ҳар хил киришмаларнинг қаттиқ заррачалари (темир, алюминий ва бошқа хлоридлар) чанг кўришида ажралади ва реакцияга киришмай қолган кремний ҳамда полихлоридлар ($Si_n Cl_{4n-2}$) билан биргаликда филтёрлар ёрдамида ажратиб олинади. Чангдан тозалангандан сўнг буг-газли аралашма -70°C да конденсация қилинади. Бунда ТХС $SiHCl_3$ ва тетрахлорсилан $SiCl_4$ (қайнаш температуралари мос ҳолда 31,8 ва 57,2°C) водороддан ва HCl дан (қайнаш температураси 84°C) ажратилади. Конденсация натижасида олинган аралашма асосан 90-95 % гача ТХСдан ташкил топади. Қолганлари кремнийнинг тетрахлориди бўлиб, у ректификация усули ёрдамида ажратилади.

Ҳосил қилинган ТХСда катта миқдорда аралашмалар мавжуд бўлиб, булардан тозалаш ўта мураккаб жараёндир. Тозалашнинг ректификация усули энг самарадор усул ҳисобланади, лекин бу усул билан ҳамма киришмалардан тозалаб бўлмайди. Шу сабабли чуқурроқ тозалаш учун қўшимча талбирлардан фойдаланилади. Масалан, кристаллизация усуллари билан ТХСни бор, фосфор, углероддан кераклича тозалаш қийин. Тозалашнинг эффективлигини ошириш учун бу микроаралашмалар учмайдиган ёки комплексли бирикмаларга айлантотилади. Бордан тозалаш учун, масалан, ТХС буглари 120 °C да алюминий пайрахаси орқали ўтказилади. Пайраханинг сирти борни ютиб, ТХСни бордан бутунлай тозалайди. Алюминийдан ташқари кумуш, мис ёки сурьмадан ҳам фойдаланиш мумкин.

Фосфордан тозалаш учун ТХС хлор билан тўйинтирилиб, фосфоручлориди пентахлоридга айлантотилади. Қоришмага алюминий хлориди қўшилганидан сўнг учмайдиган бирикма PCl_5 , $AlCl_3$ ҳосил бўлади. У эса ректификация билан чиқариб юборилади.

Тозалангандан сўнг ТХСда микрокиришмаларнинг қолдиқ миқдорлари масса бўйича: бор учун— $3 \cdot 10^{-4}$, фосфор учун— $1 \cdot 10^{-1}$, мышьяк учун— $5 \cdot 10^{-10}$, углерод учун (углеводородлар кўринишида)— $5 \cdot 10^{-1}$ % дан ошиқ бўлмаслиги керак.

Намуналарни электр ўлчашда донорларнинг қолдиқ миқдори п-турли кремнийларда солиштирма қаршиликнинг 5000 Ом·см дан, р-турли кристалларда акцепторларнинг қолдиқ миқдори 8000 Ом·см дан кам бўлмасликларини таъминлаши керак.

Юқори тозаликдаги кремнийни олиш учун поликристалл стерженлар вакуумда зонали эритиш усули ёрдамида кристаллизацияли тозалашдан ўтказилади.

Кремний монокристалларини ишлаб чиқариш асосан Чохральский усули билан (электрон саноати талабининг 80 - 90% га яқини) ва камроқ миқдорда тигелсиз зонали эритиш усули билан амалга оширилади.

Кремний монокристалларини Чохральский усули билан ўстириш киришмалардан махсус тозаланган аргон оқимида $\sim 10^4$ Па паст босимда амалга оширилади. Паст босимда ўстирилганда кремний эритмасидан учувчан киришмаларнинг учиби чиқиб кетиши осонлашади.

Керакли солиштирма қаршиликли п- ёки р-турли монокристалл ҳосил қилиш учун бошланғич поликристалл кремний ёки эритма мос ҳолда легирланади. Қозонга солинадиган поликремнийга мос элементлар (P, B, As, Sb ва бошқалар) ёки уларнинг кремний билан қотишмаси киритилади. Бу эса легирлашнинг аниқлигини оширади.

Чохральский усули билан ҳосил қилинадиган кремний монокристалларининг асосий қисми интеграл микросхемалар ишлаб чиқаришда фойдаланилади, озгина қисми (2 %) қуёш элементларини тайёрлашга сарф бўлади.

Тигелсиз зонали эритиш усули билан кремний кристалларини ўстириш ички диаметри бошланғич поликристалл стержени ва кристаллдан кичик бўлган бир ўрамли индуктор асосида амалга оширилади. Ҳозирги замонавий тизимларнинг деярли ҳаммасида индуктор стационар ҳолатда бўлади, поликристалл стержен ва ўсаётган кристалл эса силжигилади. Тигелсиз зонали эритиш усулида кристаллларни ўстириш тезлиги Чохральский усулига қараганда икки марта катта, лекин техник қийинчилик сабабли кремний кристаллининг диаметри (~ 150 мм) Чохральский усули билан олиннадиган кристалл диаметридан кичик бўлади.

Тигелсиз зонали эритиш усули билан олинадиган кремний монокристаллари ишлаб чиқарилаётган кремний монокристаллари умумий ҳажмининг 10% ни ташкил қилиб, асосан дискрет асбоблар, айниқса катта қувватли тиристорлар тайёрлаш учун сарфланади.

2.6.2. АРСЕНИД ГАЛЛИЙ МОНОКРИСТАЛЛАРИНИ ОЛИШ ТЕХНОЛОГИЯСИ

Технологик циклнинг биринчи босқичида арсенид галлий GaAsнинг поликристали галлий ва мышьяк компонентларининг қотишмаси ҳолида синтез қилинади. Бунда галлий эритмаси мышьяк буғи билан таъсир эттирилади. Кўпинча арсенид галлийнинг синтези натижасида ҳосил қилинадиган поликристаллни монокристаллга айлантириш битта технологик қурилмада амалга оширилади. Мышьяк компоненти осон учувчан булгани учун галлий ва мышьякни бир-бирига ҳимоя қатлами остида эритилган ҳолатда қўшилади. Ҳимояловчи қатлам қуйидаги талабларни қаноатлантириши керак: GaAs нинг эриш температурасида кимёвий барқарорлик; GaAs га қараганда зичлиги кам; GaAs эритмаси билан аралашмаслик; унда мышьяк буғларининг эримаслиги; кристаллни ўстиришда монокристаллнинг ўстирмадан ўсиш жараёнини назорат қилиш учун бу қатлам шаффоф бўлиши. Бу талабларнинг кўпчилигига бор оксиди B_2O_3 (юмшаш температураси $600^\circ C$) асосидаги ҳимоя қатлами жавоб бера олади. Бироқ $820^\circ C$ да эрийдиган мышьяк кучсиз бўлса ҳам B_2O_3 да эрийди. Бу эса мышьякнинг исроф бўлишига сабаб бўлади. Бу исрофни камайтириш учун ҳимоя қатламининг устида инерт газининг юқори босими ҳосил қилинади.

Кварцли тигелга Ga ва As аралашмаси солинади. Бунда мышьяк синтез пайтида буғланиш натижасида исроф бўлишини компенсациялаш учун стехиометрияга нисбатан ортиқчароқ қилиб олинади. Аралашма бор оксиди B_2O_3 бўлакчалари билан бекитилади. Бу бўлакчалар $600^\circ C$ да эриб, қалинлиги 20-40 мм ли қатлам ҳосил қилади.

Тигель $820-850^\circ C$ температурада, юқори босим камерасида (6 МПа), инерт газ атмосферасида қиздирилади. Бунинг натижасида мышьяк As (эриш температураси $817^\circ C$) ва галлий Ga (эриш температураси $-30^\circ C$) эриб компонентларнинг суюқ аралашмасини ҳосил қилади ва

GaAs синтезининг экзотермик реакцияси бошланади. Бунда ҳосил бўлган температура GaAsнинг эриш нуқтасидан бирмунча юқорироқ бўлади (GaAsнинг эриш температураси - 1238°C). Синтез жараёни синтез реакциясининг тугалланиши ва эритманинг гомогенлашишини таъминлайдиган вақт мобайнида ўтказилади.

Эритма совутилгандан сўнг GaAsнинг поликристали ҳосил бўлади ва Чохральский усули ёрдамида монокристаллга айлантирилади.

Синтез жараёнида эритмани ушлаб туриш вақти τ эритмага мишьякнинг диффузияси билан чегараланади ва қуйидаги тенглама билан ифодаланади:

$$\tau = 2,31 \cdot \lg \left[\frac{(C_c^* - C_c)}{(C_c^* - C_c^0)} \right] / (s, K_{cr}), \quad (2.7)$$

бу ерда, V — синтез қилинаётган эритманинг ҳажми, C_c^*, C_c^0, C_c — мишьякнинг эритмадаги мос ҳолда мувозанатли, бошланғич ва айни пайтдаги концентрациялари, s — эритманинг буғли фаза билан контакт юзаси, K_{cr} — мишьякнинг буғланиш (таъсирлашиш) коэффициенти.

Синтез жараёни тугатанидан сўнг эритма совутилади, натижада арсенид галлийнинг поликристалл қуймаси ҳосил бўлади.

Арсенид галлий монокристалларини ҳосил қилишнинг асосий усули бўлган Чохральский усули билан доиравий қирқим диаметри 75 мм бўлган дислокациясиз арсенид галлий монокристаллари ҳосил қилинади. Бунда кристаллар B_2O_3 ҳимоя қатлами тагидан GaAs поликристали эритмасидан тортиб ўстирилади. Жараён аргон ёки азот атмосфера-сида $(2+6) \cdot 10^6$ Па гача бўлган босимда ўтказилади. Ўстирилаётган кристаллнинг бир жинслилигини таъминлаш учун эритмага вертикал магнит майдони қўйилади. Кристалл ҳосил қилишдаги умумий шароитлар: ўстириш тезлиги 3-9 мм/соат, кристаллни ва тигелни айлантириш тезликлари мос ҳолда 6 айл/минут ва 15-30 айл/минут; B_2O_3 қатламдаги температура градиенти 100-150 град/см.

GaAs асосида интеграл микросхемалар ишлаб чиқаришда яримизоляцияловчи кристаллар ҳосил қилиш амалий аҳамиятга эга. Бунинг учун кристаллар ўсиш жараёнида тақиқланган зонада чуқур жойлашган акцептор сатҳларини берувчи хром билан $5 \cdot 10^{15}$ см⁻³ гача легирланади ҳамда салгина мишьяк билан бойитилган эритма ёки стехиометрия-

ли эритмадан тоза кристаллар ўстирилади. Бундай ўстирилган кристалларнинг солиштирма қаршилиги 10^9 Ом·см га етади.

2.7. НОКРИСТАЛЛ МАТЕРИАЛЛАР ТЕХНОЛОГИЯСИ

2.7.1. ШИШАСИМОН ҲОЛАТ ВА УНИНГ ХОССАЛАРИ

Кимёвий бирикмаларнинг ҳар хил органик ва ноорганик синфларига тегишли бўлган моддалар шишасимон ҳолатда бўлиши мумкин. Шиша ҳосил қилиш усуллариининг мукаммаллашиб бориши билан бундай материалларнинг сони ортиб бормоқда.

Органик шишаларга полиакрилатлар, поликарбонатлар, полистирол, винилхлориднинг метилметакрилат билан қўшма полимерлари каби органик полимерларнинг шишасимон ҳолатдагилари мисол бўлади.

Электрон техникада ноорганик бирикмалар асосидаги шишалар энг кўп ишлатилади. Бу шишалар қуйидаги синфларга бўлинади: элементар (оддий), галогенли, халкогенти, оксидли, металл, сульфатли, нитратли, карбонатли ва ҳоказолар.

Битта элементнинг атомларидан ташкил топган шишалар *элементар* шишалар дейилади. Фақат озгина сондаги элементларнинггина шишасимон ҳолати ҳосил қилинган. Буларга олтингугурт - S, селен - Se, мишьяк - As, фосфор - P ва углерод - C элементлари киради.

Шисасимон олтингугурт ва селен—эритмаларни тезлик билан совутиш орқали, шишасимон мишьяк — вакуумда сублимациялаш усули билан, шишасимон фосфор—100 МПа дан юқори босимда 250 °C да қиздириш билан, шишасимон углерод — органик смолаларни узоқ вақт пиролиз қилиш натижасида ҳосил қилинади.

Галогенид шишалар деб галогенлар асосида ташкил топган шишаларга айтилади. Буларнинг ичидан шиша ҳосил қилувчи BeF_2 бирикмаси асосидаги шишалар кўпроқ қўлланилмоқда.

*Халкогенид*ли шишалар деб аталадиган шишалар қуйидаги бирикмалар кўринишида бўлган кислородсиз тизимлар асосида ҳосил қилинади: As-X, Ge-As-X, Ge-Sb-X, Ge-P-X ва бошқалар. Бу ерда X = S, Se, Te.

*Оксид*ли шишалар энг кенг синфли бирикмалардан ташкил топади. Бунда қуйидаги оксидлар осон шиша ҳосил қилувчи оксидлар ҳисобланади: SiO_2 , GeO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 .

As_2O_3 . Оксидларнинг катта гуруҳи — TeO_2 , TiO_2 , SeO_2 , MoO_3 , WO_3 , Bi_2O_3 , Al_2O_3 , Ga_2O_3 , V_2O_5 лар бошқа оксидлар ва оксид аралашмалари билан эритилганда шиша ҳосил қилади. Масалан, куйидаги тизимларда шиша осон ҳосил бўлади: $CaO - Al_2O_3$, $CaO - Al_2O_3 - B_2O_3$, $P_2O_5 - V_2O_5$, $Me_mO_n - P_2O_5 - V_2O_5$, бу ерда Me_mO_n — ҳар хил модификацияловчи оксидлар. Шундай қилиб, шиша ҳосил қилувчи оксиднинг турига қараб шишалар куйидаги синфларга бўлинади: силикатли, боратли, фосфатли, германатли, теллуридли, алюминатли ва шу қабилар.

Саноатда ишлаб чиқариладиган шишаларнинг таркиби камида бешта компонентдан, махсус ва оптик шишалар эса ўн та компонентдан ташкил толади. Шишаларнинг таркибини ўзгартириб, уларнинг хоссаларини керакли томонга хоҳлаганча ўзгартириш мумкин.

Шишаларнинг қотиш ва эриш жараёнлари кристаллардан фарқ қилиб, маълум бир температура оралиғида секин-аста юз беради, яъни шишаларда аниқ бир қотиш ёки эриш температураси бўлмайди. Шиша пишириш жараёнида эритма суюқ ҳолатдан аввал пластик ҳолатга, кейин қаттиқ ҳолатга ўтади. Тескари жараёнда эса (шишанинг юмшатилишида) шиша аввал қаттиқ ҳолатдан пластик ҳолатга, юқорироқ температураларда эса суюқ ҳолатга ўтади. Шишаларнинг қотиш ёки эриш жараёнлари маълум бир температура оралиғида юз беради. Бу интервал *шишаланиш интервали* дейилади. У иккита температура билан чегараланган: юқори температура томондан юмшаш температураси — T_f (f - *Flussigkeit*-суюқлик) билан, паст температура томондан шишаланиш температураси — T_g (g - *Glas*-шиша) билан (2.11-расм). Шиша температура соҳасига боғлиқ ҳолда ҳар хил хоссаларга эга бўлган учта ҳолатда бўлиш мумкин: T_f дан юқорида қовушқоқли суюқ ҳолатда, $T_f - T_g$ юмшаш интервалида пластик ҳолатда ва T_g дан паст температураларда қаттиқ (мўрт) ҳолатда. T_f температураларда шиша массадан ингичка ипларни тортиш мумкин бўлади. Энг зарур шиша ҳосил қилувчи моддаларнинг асосий технологик хоссалари 2.3-жадвалда келтирилган.

Кристалл моддаларнинг эришидан (ёки эритманинг кристалланишидан) фарқли равишда шишанинг юмшаш (ёки шиша массанинг қотиш) жараёнлари бир фазали бўлади. Шишаланиш интервалида шишанинг юмшаши суюқ фаза ҳосил бўлмасдан юз беради. Мана шуларга асосан шишаланиш интервалида шиша хоссаларининг ўзгариш характерига қараб учта гуруҳга бўлинади:

2.3-жадвал

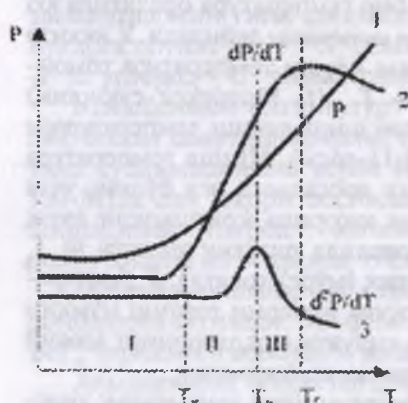
Модда	Юмшаш температураси	Шишланиш температураси	Эриш энтальпияси, КЖ/мол	Юмшаш температурасидаги қовушқоқлик, Па·с
SiO_2	1995	1495	8	10^4
GeO_2	1389	853	17,2	$7 \cdot 10^4$
B_2O_3	723	550	23	10^4
P_2O_5	853	537	71	$5 \cdot 10^4$
As_2O_3	585	420	18,7	10^3
BeF_2	823	523	41,2	$>10^5$
Se	493	305	6,2	2,2
P_2Se_3	603	455	-	-

Биринчи гуруҳга модда ҳолатларининг функцияларини ифодалайдиган (ички энергия, молли ҳажм, энтальпия, энтропия) P нинг хоссалари киради. Бу хоссалар температура ортиши билан текис ўзгаради (2.11-расм, 1- эгри чизик).

Шишанинг иккинчи гуруҳга кирадиган хоссалари P ҳолат функциясининг температура бўйича олинган биринчи ҳосиласи dP/dT (чизикли ва

ҳажмий термик кенгайиш коэффициентлари, иссиқлик сифими) бўлиб, T_g нуқтада эгилишга эга (2.11-расм, 2- эгри чизик). Учинчи гуруҳга кирадиган хоссалар (иссиқлик ўтказувчанлик, диэлектрик йўқотишлар) P дан температура бўйича олинган иккинчи ҳосила бўлиб, T_g нуқтада максимум ёки минимумга эга бўлади.

Булардан ташқари, шишанинг характерли параметрларига шишанинг таркибига боғлиқ



2.11-расм. Шишанинг (P) ва унинг ҳосилалари хоссаларининг шишланиш интервалида температурага боғланишлари:

I—қаттиқ ҳолат; II—пластик ҳолат;

III—суюқ (эритма) ҳолат.

булган T_1 , T_2 температуралари ҳамда шишаланиш интервали $(T_1 - T_2)$ киради. Шишаланиш температураси T_2 га шиша массанинг 10^{12} - 10^{13} Па·с қовушқоқлиги, T_1 температурага эса 10^8 Па·с қовушқоқлик мос келади.

2.7.2. ШИША ПИШИРИШНИНГ ФИЗИК-КИМӨВИЙ АСОСЛАРИ

Электрон техниканинг энг керакли материалларидан бири булган оксидли шиша пишириш жараёнларини қўриб чиқамиз.

Шиша ва эритмаларнинг қовушқоқлиги ва сирт таранглиги: Қовушқоқликнинг температуравий боғланиши энг зарур технологик характеристика бўлиб, шиша технологияси асосий босқичларининг параметрларини белгилаб беради: шиша ҳосил бўлиш, шиша массанинг гомогенлашуви ва тиниқлашуви, буюмларга шакл бериш, уларни куйдириш ёки тоблалаш ва ҳоказолар. Шишанинг қовушқоқлиги температурага боғлиқ ҳолда жуда кенг қийматларда ўзгаради: эритма ҳолатдаги 10 Па·с дан қаттиқ ҳолатдаги 10^{19} Па·с гача. Оксидли шишалар қовушқоқлигининг температуравий боғланиши 2.12-расмда кўрсатилган. Паст температураларда (T_1 гача) қовушқоқлик жуда кам ўзгаради. Қовушқоқликнинг кескин қамайиши 10^{15} - 10^7 интервалида юз беради.

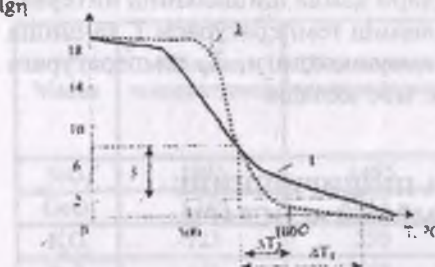
Эритма ҳолатдаги шишаларнинг температуравий боғланиши (T_1 дан юқори температура соҳаларида) тахминан қуйидаги тенглама билан ифодаланади:

$$\eta = A \exp [E_\eta / (RT)], \quad (2.7)$$

бу ерда, η — динамик қовушқоқлик коэффициенти, A — константа (10^{-4} - 10^{-5} Па·с) модданинг кимёвий табиатига боғлиқ бўлиб, Эйнштейн тенгламасидан ҳисобланиши мумкин: $A = Nh/V$ (бу ерда N — Авогадро сони, h — Планк доимийси, V — моли ҳажми); E_η — активлаш энергияси (оксидли шишалар учун 80-630 кДж/мол) бўлиб, тортишиш кучларини енгил ва ундан кейинги заррачаларнинг силжиш жараёнларидан келиб чиқади, температурага боғлиқ бўлади ва тахминан қуйидаги тенглама билан ифодаланади: $E_\eta = E_a/T$, бу ерда E_a — элемент-кислород боғнинг мустақамлигига пропорционал бўлган катталиқ.

Шакл беришнинг температуравий оралиғида қовушқоқликнинг ўзгариш характери бўйича шишалар қисқа ва узун шишаларга бўлинади (2.12-расм).

lg η



2.12-расм. Оксидли шишалар қовушқоқлигининг температурага боғланиш графиклари:

1,2—узуи ва қисқа шишаларнинг динамик қовушқоқликлари; 3—шакл беришнинг қовушқоқлик интервали ($\Delta T_1, \Delta T_2$ —шакл беришнинг температуравий оралиқлари).

ли катта ($\sim 250-500^\circ\text{C}$) бўлганлари эса узуи дейилади. Узуи шишалар учун шакл бериш режимини ишлаб чиқиш қисқа шишаларга қараганда анча осон.

Шишаларнинг қовушқоқлиги заррачалар орасидаги кимёвий боғларнинг мустаҳкамлигига боғлиқ бўлиб, улар ўз навбатида заррачанинг турига боғлиқ бўлади. Силикат шишалар ичида кварц шиша бир хил температуравий шароитда энг катта қовушқоқликка эга. Унинг таркибига ишқорий металлларнинг оксидлари киритилиши билан ҳосил бўлаган бинар ишқорий — силикат шишанинг қовушқоқлиги кескин камайиб кетади (2.4-жадвал).

2.4-жадвал

Таркиб	SiO_2	$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$	$2\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$
η , Па·с (1400°Сда)	169	28	0,16	0,1

Осон эрувчан, қовушқоқлиги кичик бўлган глазурилар тайёрлаш учун глазури таркибига фтор, барий, қўрғошин бирикмалари қўшилади.

Шиша ишлаб чиқариш учун хомашёвий материаллар. Шиша ишлаб чиқаришда хомашё сифатида қўлланиладиган материаллар технологик белги бўйича икки гуруҳга бўлинади: *асосий* ва *ёрдамчи*.

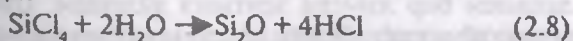
Асосий материалларга шишанинг асосини ташкил этувчи ва унинг хоссаларини белгиловчи материаллар киради.

Ёрдамчи материаллар шишанинг хоссаларини ҳар томонга ўзгартириш имкониятини берадиган ва лиширишни тезлаштирадиган компонентларни ўз ичига олади. Буларга ранг берувчи, тиниқсизлантирувчи, тиниқлантирувчи, ранг кетказувчи, оксидловчи, қайтарувчи, тезлатувчи ва шунга ўхшаш материаллар киради.

Материаллар келиб чиқиши жиҳатидан *табиий* ва *синтетик* материалларга бўлинади. Синтетик материаллар табиий материалларга қараганда анча тоза ҳисобланади. Хомашё материалларининг сифатига (кимёвий таркиб, киришмалар, дисперслик ва бошқалар) қўйиладиган талаблар шиша маҳсулотларнинг турига ва қаерда ишлатилишига боғлиқ бўлади. Электрон техникада қўлланиладиган шишалар ишлаб чиқариш учун (микроэлектроникада қатламлараро изоляциялаш, герметикловчи компаундлар, резистор ва конденсаторларнинг компонентлари, электромагнит, оптик, лазер нурланишларнинг сезгир датчиклари ва бошқалар учун) керак бўладиган хомашёга қўйиладиган талаблар тайёр шиша маҳсулотнинг сифатига қўйиладиган талаблар билан аниқланади.

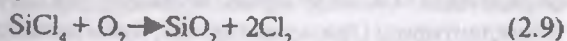
Шиша саноатида ҳар хил шиша маҳсулотлар тайёрлашда кремний диоксиди учун материал сифатида кварц қуми, майдаланган қум, кварцит ва толали кварц кабилардан фойдаланилади. Бунда тозалик даражаси бўйича қумнинг 15 хил русуми ишлатилади. Электрон техникада хомашёларнинг тозалигига бўлган талаб кучайганлиги сабабли синтетик SiO_2 ни ҳосил қиладиган қуйидаги усуллар ишлаб чиқилган:

а) газ фазали синтез, бунда тетраҳлорид кремнийдан водород-кислород алангасида қуйидаги реакция бўйича ҳосил қилинади:



Бу усул билан олинган кварц шишада гидрооксил гуруҳининг миқдори кўп бўлиб, иссиқликка чидамлиги камроқ бўлиши унинг камчилиги ҳисобланади;

б) кислородли, паст температурали плазмада тўғридан-тўғри оксидлаш:



Бу ҳолатдаги кварц шишасида гидрооксил гуруҳининг миқдори энг кам, бироқ унда массанинг 0,05 % гача хлор ионлари мавжуд бўлади;

в) SiO_2 гелидан, уни қуритиб, термик ишлов бериб ва 1800 °C да эритиб ҳосил қилинади.

Бундай хомашёдан ҳосил қилинадиган кварц шиша юқори даражали тозалик билан характерланади ва ундаги қолдиқ киришмалар массанинг 10^{-3} - $10^{-6}\%$ дан ошмайди. Бундай шишалардан хусусий ҳолда Чохральский усули билан кремний монокристаллари ўстириш учун кварцли тигеллар, диффузия жараёнлари ва ярим ўтказгичлар эпитаксияси ўтказиладиган кварцли реакторлар, оптик ва лазер шишаларини ишлаб чиқаришда ва ҳоказолар тайёрлашда фойдаланилади.

Шихта тайёрлаш. Маълум таркибли шиша маҳсулотини тайёрлаш учун аввал шихта тайёрланади. Шихта тайёрлаш учун керак бўладиган материаллар яхшилаб тозаланади, оптимал дондор қилиб майдаланади, керакли нисбатларда ўлчаниб яхшилаб аралаштирилади. Бунда шихтанинг асосий технологик кўрсаткичи таркибнинг бир жинслигидир. Пиширилган шиша массанинг сифати бошланғич материалларнинг аниқ ва кунт билан тайёрланганлигига ва уларнинг қандай аралашганига боғлиқ бўлади.

Компонентларнинг кимёвий таркиби шишаларнинг электрофизика хоссаларини белгилайди.

Шихтани ташкил этувчилар тайёрланиб яхшилаб аралаштирилгандан сўнг уни печга юклашдан олдин шиша пишириш жараёнини оптималлаш мақсадида шихтани зичлантириш керак бўлади. Бунинг учун у аввал ўта нозик майдаланади. Ундан кейин шихта брикетлаш, гранулалаш, ёпиб пишириш (спекание) каби усуллардан фойдаланиб зичлантирилади. Ундан кейин шиша пиширишни бошлаш мумкин.

Шиша пишириш. Шиша пишириш деб шундай термик жараёнга айтиладики, бунда ҳар хил компонентларнинг аралашмаси бир жинсли эритмага айланади. Шиша пишириш мураккаб жараён бўлиб, шихта компонентлари орасида кечадиган ҳар хил физик-кимёвий таъсирлашув натижасида суюқ шиша массанинг ҳосил бўлиши юз берадиган маълум бир катталиктидаги температура интервалида кузатилади. Масалан, силикат шиша пиширишда шиша қайнатишнинг беш bosқичи фарқланади: силикат ҳосил бўлиши; шиша ҳосил бўлиши; тиниқлантириш (газензлантириш); томогенлаштириш; совутиш.

Силикат ва шиша ҳосил бўлиш жараёнлари бир вақтнинг ўзида кечади. Силикат ҳосил бўлиш жараёнида шихта компонентлари ўзаро кимёвий таъсирланиб карбонатлар, сульфатлар ва бошқа моддалар силикатларга ва бошқа оралиқ бирикмаларга айланади.

2.7.3. ШИША МАҲСУЛОТЛАРИ ТЕХНОЛОГИЯСИ

Шиша қайнатишдан кейинги асосий технологик босқич шишага шакл бериш ҳисобланади. Бунда қовушқоқ эритма (шиша массаси) ташқи кучлар натижасида керакли конфигурацияли қаттиқ маҳсулотга айлантирилади ва секин-асталик билан совитилиб қаттиқ ҳолатга келтирилади. Шакллантириш жараёнида шишанинг қовушқоқлиги 10^2 дан 10^{12} Па·с гача ўзгаради.

Шакллантириш жараёни икки босқичга бўлинади: шакл ҳосил қилиш босқичи ва шаклни фиксациялаш босқичи.

Шакл ҳосил қилиш шиша масса оқиш ва пластик деформация ҳолатлари мумкин бўлган температуравий қовушқоқ-соҳада ўтказилади. Бу қовушқоқликнинг $10^2 - 4 \cdot 10^7$ Па·с оралиғига мос келади ва бунда температура оралиғи тахминан $1200-800^\circ\text{C}$ атрофида бўлади.

Шаклни фиксациялаш (қотириш) шакллантирилаётган маҳсулотни ҳосил қилинган конфигурацияси сақлаб қолинган ҳолда қотиришдир. Бу шишанинг интенсив қотадиган соҳасига тўғри келадиган, температуранинг $900-500^\circ\text{C}$ диапазонида, қовушқоқликнинг $10^8 - 10^{12}$ Па·с оралиғида амалга оширилади.

Шишага шакл беришнинг қуйидаги усуллари мавжуд:

- 1) чўзиш;
- 2) прокаткалаш;
- 3) пресслаш;
- 4) ҳаво пуфлаш;
- 5) пресс-ҳаво пуфлаш;
- 6) марказдан қочма шакллантириш;
- 7) шиша массанинг тагликда эркин оқишига асосланган флоат усули.

Шаклланган шиша маҳсулоти совитилганда унинг ташқи ва ички девор қатламлари орасидаги температуранинг фарқи туфайли ҳосил бўладиган механик кучланишни олиб ташлаш учун шиша маҳсулотлар қиздирилади. Қиздириш жараёни қуйидаги босқичларни ўз ичига олади:

- 1) маҳсулотни қиздириш температурасигача қиздириш (ёки совитиш);
- 2) кучланишни олиб ташлаш учун қиздириш температурасида ушлаб туриш;
- 3) масъулиятли совитиш. Бунда шишада қолдиқ кучланиш ҳосил бўлишидан сақлаш учун қиздиришнинг паст температурасигача секин-аста совитилади;

4) хона температурасигача тез совитилади.

Шишани тоблаш деб унда сунъий равишда бир хил тақсимланган кучланиш ҳосил қилишга айтилади. Тоблашда шиша $T_1 - T_2$ оралиқдаги температурагача қиздирилади ва маълум бир вақт бу температурада ушлаб турилгандан сунг тезлик билан бир текис совитилади. Бунинг натижасида маҳсулотнинг мустаҳкамлиги ошади.

2.8. КЕРАМИКА ВА ШИША КЕРАМИКА МАТЕРИАЛЛАРИ ТЕХНОЛОГИЯСИ

2.8.1. КЕРАМИКАЛИ МАТЕРИАЛЛАР ТЕХНОЛОГИЯСИНИНГ АСОСЛАРИ

Керамикали технология ҳозирги вақтда диэлектрикли, яримўтказгичли, магнитли, ўтказувчи ва ўта ўтказувчи материаллар асосида электрон техниканинг ҳар хил маҳсулотларини тайёрлашда кенг қўлланилмоқда. Керамикали материаллар учун умумий бўлган технологик операция бу модаларни эриш температурасидан паст температурада пиширишдир (спекание). Керамикали технологиянинг шиша технологиясидан асосий фарқи шундаки, бунда модаларнинг эритилишига йўл қўйилмайди.

Керамика кўп фазаги мураккаб тизимдан иборат. Унинг таркибида кристалли, шишасимон ва газли фазалар (одатда, берк ғоваклар кўринишида) мавжуд бўлади.

Кристалл фаза керамиканинг асосий фазаси бўлиб, материалнинг мазмунини ва хоссаларини (диэлектрик ва магнит синдирувчанлик, йўқотиш қуввати, чиқиқли кенгайишнинг температура коэффиценти, механик мустаҳкамлик) белгилайди.

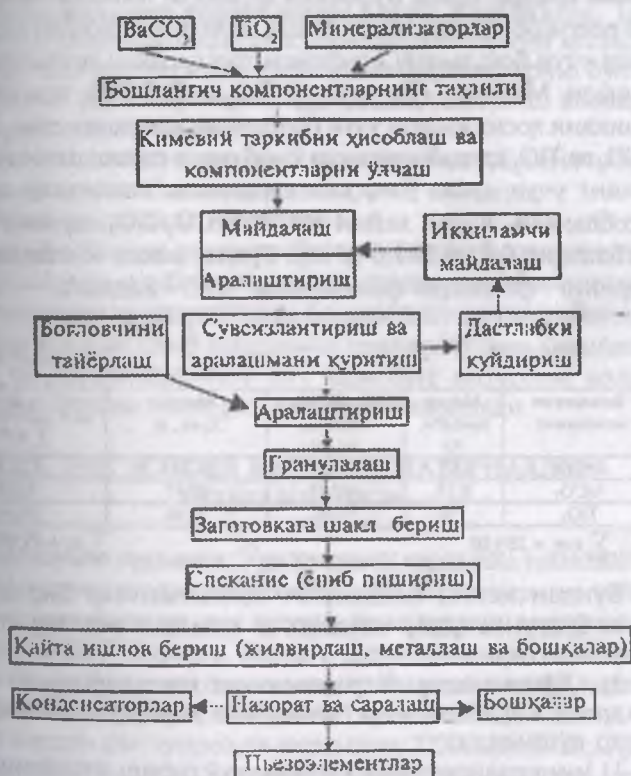
Шишасимон фаза шиша қатлам бўлиб, кристалл фазани ташкил қилувчи дончаларни боғлаб туради. Шишасимон фазанинг миқдори керамиканинг технологик хусусиятларини (пишириш температураси, пластиклик даражаси ва бошқалар) белгилайди. Унинг қиймати 30-40%дан ошмаслиги керак.

Керамикадаги *газли фаза* (берк ғоваклар кўринишида) маҳсулот тайёрлашнинг ўзига хос технологик жараёни натижасида ҳосил бўлади. Кўпинча у керамиканинг хоссаларига (механик ва электр мустаҳкамлик, диэлектрик йўқотишлар

каби) салбий таъсир қилади. Керамикали маҳсулотлар ишлаб чиқаришда асосий технологик жараёнлар қуйидагича:

- 1) шихта учун масса тайёрлаш;
- 2) шакл бериш;
- 3) қуритиш;
- 4) қуйдириш (обжиг).

BaTiO_3 , асосида сегнетокерамик маҳсулотлар ишлаб чиқариш жараёнининг технологик схемаси 2.13-расмда келтирилган. Албатта, керамиканинг ҳар бир конкрет тури ва маҳсулоти учун бу схемага ўзгартиришлар киритилади. Энди бу схемада келтирилган асосий технологик жараёнларни кўриб чиқамиз.



2.13-расм. BaTiO_3 керамикаси асосидаги маҳсулотлар ишлаб чиқариш жараёнининг технологик схемаси.

1. **Шихта тайёрлаш.** Шихтани тайёрлаш бошлангич материалларни тайёрлашдан бошланади. Бошлангич компонентларнинг сифатига қараб керамиканинг хоссаларини назорат қилиш ва бошқариш мумкин. Электрон техникада қўлланиладиган энг арзон керамик материаллар тайёрлаш учун хом ашё сифатида тупроқ, дала шпати, кремнезем, каолин ва бошқалар ишлатилади. Буларни майдалаш жараёнида темир аралашмалар хлор кислотаси ёрдамида ёки электр магнит ёрдамида олиб ташланади. Юқори сифатли керамика олишда заррачаларнинг ўлчами 0,5-5 мкм дан ошмаслиги керак.

2. **Шихта таркибини тайёрлаш ва бошлангич компонентларнинг аралаштириш.** Бу жараён керамика технологиясида асосий операция ҳисобланади. Бунда берилган таркибли керамика олиш учун бошлангич компонентлар керакли нисбатда ўлчаб олинади. Масалан: $(\text{Ba}_{0,85}, \text{Sr}_{0,15}) \text{TiO}_3 \Rightarrow \text{BaSrTiO}_3$, таркибли керамикани ҳосил қилиш учун бошлангич компонентлар, BaCO_3 , SrCO_3 , ва TiO_2 қандай миқдорда ўлчаб олиш кераклигини тоғамиз. Бунинг учун аввал унга компонентнинг молекуляр массаси ҳисобланади. Ундан кейин BaCO_3 , SrCO_3 , TiO_2 ларнинг моляр нисбатлари: 0,85:0,15:1,0 га тенг бўлган масса нисбатлари ва уларнинг фоизлари ҳисобланади (2.5 - жадвал).

2.5-жадвал

Бошлангич компонент	Моляр ҳисоси, X_i	Молекуляр массаси, m_i , кг	Масса, $X_i m_i$, кг	$\omega = \frac{X_i m_i}{\sum X_i m_i} \cdot 100\%$
BaCO_3	0,85	197,35	167,75	62,174
SrCO_3	0,15	147,63	22,15	8,206
TiO_2	1,0	79,90	79,90	29,615

$$\sum X_i m_i = 269,80$$

$$\sum \omega = 99,997\%$$

Бундан кейин бошлангич компонентлар бир жинсли масса бўлгунга қадар механик ва кимёвий усуллар ёрдамида аралаштирилади.

3. **Қўшилмалар.** Керамиканинг хоссаларини ва ишлаб чиқариш жараёнларини бошқариш учун қуйидаги қўшилмалар қўшилади:

1) минералловчилар 5% гача, куйдириш жараёнини тезлаштириш учун;

2) пластификаторлар, маҳсулотга шакл бериш жараёнини осонлаштириш учун;

3) модификацияловчи қўшилмалар, электрофизика хоссаларни бошқариш учун.

4. **Шихтани гранулалаш.** Бунда кукун ҳолатдаги шихта бир хил ўлчамда ва шаклда гранулаланади, асосан гранулалаш пресслаб шакл беришдагина қўлланилади.

5. **Маҳсулот заготовкасига шакл бериш.** Шакл беришнинг куйидаги усуллари кўпроқ қўлланилади:

- а) пресс-шакллашда совуқ пресслаш;
- б) қайноқ пресслаш;
- в) қайноқ қуйиш;
- г) муштукли пресслаш;
- д) изостатик пресслаш;
- е) вибрацияли зичлаш.

6. **Заготовкаларга термик ишлов бериш жараёнлари.** Термик ишлов беришдан мақсад кукун заррачаларини монокристалл қаттиқ жисм ҳолатигача бирлаштириш бўлиб, бунда унинг хоссалари компакт қаттиқ материал хоссаларига яқинлашади.

Термик ишлов бериш жараёни икки босқичдан ташкил топади:

- 1) технологик боғловчинини чиқариб юбориш;
- 2) ёпиб пишириш (спекание).

Биринчи босқич эриш ва боғловчининг буғланиш температураларида олиб борилади ва кукун заррачаларининг ёпиб пишириш температураси бошланишида тамомланади. Иккинчи босқич ёпиб пишириш температураен бошланишдан то заррачаларнинг зич монокристалл материал ҳолига келгунгача бўлган температураларда ўтказилади.

2.8.2. ЭНГ АСОСИЙ КЕРАМИК МАТЕРИАЛЛАР ТЕХНОЛОГИЯСИ

Ўрнатиловчи керамика. Ўрнатиловчи керамика технологиясининг хусусиятларини микросхемалар тагликларини тайёрлашда ишлатиладиган энг асосий ўрнатиловчи материаллар мисолида кўриб чиқамиз. Буларга биринчи навбатда алюминий оксиди ва бериллий оксиди асосидаги керамикалар киради.

Қувватли микросхемаларнинг кўпчилигида таглик сифатида юқори соғ тупроқли керамика 22ХС (96% Al_2O_3) ва поликор (99,7% Al_2O_3) асосидаги алюминий оксидли керамика ишлатилади.

Алюминий оксидининг бир нечта полиморфли модификациялари мавжуд бўлиб, улар α -, β - ва γ - Al_2O_3 ларидир.

α - Al_2O_3 —корунд, алюминий оксиди асосидаги керамикали маҳсулотларнинг бош кристалл фазаси бўлиб, тригонал сингонияга тааллуқлидир. У 2050°C температурада эрийди. β - Al_2O_3 гексагоналли кристалл панжарага эга бўлиб, алюминий оксидининг тоза модификацияси ҳисобланмайди. У билан Al_2O_3 нинг миқдори юқорилиги билан фарқланадиган маълум бир алюминатлар гуруҳи шартли равишда белгиланади. γ - Al_2O_3 куб кристалл панжарага (шпинел тури) эга ва корунддан кимёвий активлигининг юқорилиги билан ажралиб туради. γ - Al_2O_3 1100°C температурадан юқори-роққа қиздирилганда қайтмайдиган бўлиб α - Al_2O_3 га айланади ва бунда унинг ҳажми 14% гача кичраяди.

22ХС ва поликор керамикаларини ишлаб чиқаришда хом ашё сифатида техник соғ тупроқдан фойдаланилади. Унда киришмаларнинг, асосан натрий оксидининг миқдори 0,2% дан кам бўлиши керак. Унинг таркибида кўп миқдорда γ - Al_2O_3 фазаси мавжуд бўлиб, керамикани ёпиб пиширишда ҳажмининг сезиларли камайишига (29% гача) сабаб бўлади. Бутунлай термик турғун бўлган α - Al_2O_3 дан иборат минералогик бир жинсли материал олиш учун бошланғич техник соғ тупроқ 1450°C гача қиздирилади ва бунда γ - Al_2O_3 α - Al_2O_3 га айланади. Бу операция натижасида соғ тупроқ керакли технологик хусусиятларга ҳам эга бўлиб қолади. Масалан, нозик майдалашда унинг интенсивлиги ошади.

Оммавий ишлаб чиқаришда ҳосил қилинаётган α - Al_2O_3 корунд шарли тегирмонларида майдаланади.

Al_2O_3 нинг миқдори 96-98% ни ташкил қилган керамик материалларида ёпиб пиширишни интенсификациялаш учун минерализаторлар - SiO_2 асосидаги шишалардан фойдаланилади. Бу минерализаторларнинг бошқа компонентлари бўлиб, металлларнинг оксидлари MgO , CaO , BaO , MnO , Cr_2O_3 ҳисобланади. 22ХС керамикасини ҳосил қилишда 5-6 % массавий миқдордаги шиша тизимли — MnO - SiO_2 - Cr_2O_3 минерализатордан фойдаланилади.

Al_2O_3 нинг миқдори 99 %дан кўп бўлган алюмоксидли керамикада, масалан, поликорда, шиша ҳосил қилувчилар бўлмаган минерализаторлар ишлатилади. Энг кўп тарқалган бундай қўшимчага MgO (мас. 0,3 % гача) мисол бўлади. У ёпиб пиширилган керамиканинг диэлектрик ва вакуум хоссаларига таъсир ўтказмайди.

Заготовка массасининг қуюқлигига, шаклига ва ўлчамларига боғлиқ ҳолда уларни шакллантириш учун қуйидаги усуллардан фойдаланилади: ярим куруқ, қайноқ ёки изостатик пресслаш, қуйиш ва экструзия. Органик боғловчи сифатида олеин кислота ва воск қўшилган парафин, глицеринли поливинил спирти, метилцеллюлозанинг глицерин билан аралашмаси ишлатилади.

Бериллий керамика — брокерит ($98\% \text{-BeO}$) юқори қувватли микросхемаларнинг тагликларини тайёрлашда ишлатилади, чунки BeO нинг иссиқлик ўтказувчанлиги Al_2O_3 га қараганда олти марта юқоридир. BeO ҳосил қилиш учун асосий хом ашё бериш минерали ($3\text{BeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) ҳисобланади. Тоza минералда 15% гача BeO бўлади. BeO олиш учун берилл бериллий гидроксидига айлантирилади ва у $900\text{--}1800^\circ\text{C}$ температурада қуйдирилади. BeO асосидаги буюмлар керамика технологиясининг ҳамма усуллари ёрдамида тайёрланиши мумкин.

Бериллий ва унинг бирикмалари заҳарли бўлганлиги уларнинг электрон техникада кенгроқ қўлланилишига тўсиқ бўлмоқда. Шу сабабли кейинги йилларда карбид кремний асосидаги керамика (SiC га $1\text{--}3\%$ миқдорда пиширувчи қўшилмалар — BeO , B_2C , C ва бошқалар қўшилган) ишлаб чиқилди. SiC асосидаги керамиканинг асосий характеристикалари: иссиқлик ўтказувчанлик жиҳатдан [$293 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$] металл алюминий, алюминий ва бериллий оксидлари асосидаги керамикалардан устун бўлиб, мисга нисбатан салгина камдир; иссиқликдан кенгайиш коэффициентини кремний монокристаллиникига яқин; солиштирма ҳажмий қаршилиги юқори $\rho \approx 10^{13} \text{ Ом} \cdot \text{см}$; паст ва юқори температураларда юқори механик мустаҳкамликка эга.

Конденсатор керамикаси. Конденсатор керамикасига қўйиладиган талаблар умумий ҳолда қуйидагича:

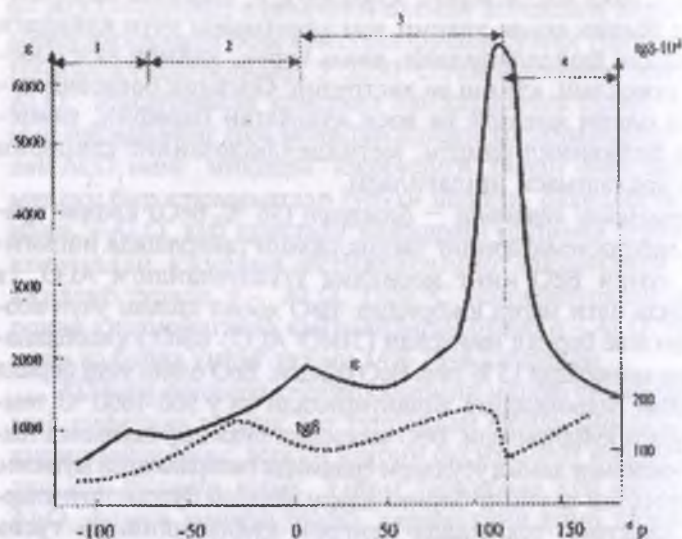
— температура, частота, электр майдони ва шу кабилар ўзгарганда берилган қийматда стабиллигини сақлаган ҳолдаги энг катта диэлектрик киритувчанлик;

— диэлектрик йўқотишларнинг минималлиги;

— электр мустаҳкамлик ва солиштирма ҳажмий қаршиликнинг максималлиги;

— электрокиёмвий эскилишга юқори чидамлилиги;

— материалнинг бир жинслилиги ва хоссаларининг қайтариловчанлиги;



2.14-расм. BaTiO₃ асосидаги керамикада диэлектрик киритувчанлик ϵ ва диэлектрик йўқотишларнинг тангенс бурчаги $\text{tg}\delta$ ларнинг температуравий боғланишлари: 1-ромбоздрик фаза; 2-ромбли фаза; 3-тетрагонал фаза; 4-куб фаза.

— таннархининг камлиги ва бошланғич хомашёнинг бемалоллиги.

Конденсатор диэлектриги сифатида ишлатиладиган керамик материаллар олиш технологиясининг хусусиятларини сегнетокерамика мисолида кўриб чиқамиз.

Конденсаторлар учун ишлатиладиган сегнетокерамик материаллар учта гуруҳга бўлиниши мумкин: максимал диэлектрик киритувчанликли материаллар (Н-90 гуруҳи), температуравий турғунлиги юқори бўлган диэлектрик киритувчанликли материаллар (Н-50, Н-30 ва бошқалар) ва диэлектрик йўқотишлари кичик бўлган материаллар (Т-900 материали).

Бу гуруҳлардаги сегнетоэлектрикли конденсатор керамикасининг асосини асосан BaTiO₃ ва унинг асосидаги қаттиқ қоришмалар ҳосил қилади. Баъзи ҳолларда SrTiO₃ ва PbNb₂O₆ асосидаги қаттиқ қоришмалар ҳам қўлланилади. Тоза титанат барий асосидаги керамика фазавий ўтишларнинг учта нуқтаси: -80; 0; 120 °С температуралар билан характерланади. Кристаллар -80 °С дан паст температурада ромбоздрик

структурага эга бўлади; температуранинг -80 дан 0°C гача бўлган оралигида ромбли структура; 0 дан 120°C гача - тетрагонал, Кюри нуқтасидан (120°C) юқори температураларда BaTiO_3 да куб структура ҳосил бўлади ва спонтан қутбланиш йўқолади. Бунда кристалл сегнетоэлектрикдан параэлектрикка айланади. Қайд қилинган ҳамма фазавий ўзгаришлар қутбланиш жараёнидаги ўзгаришлар билан характерланади. Бу ўзгаришлар ϵ ва $\text{tg}\delta$ нинг температурага боғланишларида ўз аксини топган (2.14-расм).

2.14-расмдан кўриниб турибдики, ϵ хона температурасида тахминан 1500 га тенг бўлиб, Кюри температураси яқинида эса ўткир максимумга эга бўлиб, унинг қиймати $6000-10000$ га етади. ϵ нинг температурага боғланишининг бундай характери BaTiO_3 асосидаги керамикадан -55 дан $+85^{\circ}\text{C}$ гача бўлган температура оралигида $\epsilon \approx 1500$ қиймат билан фойдаланиш имкониятини беради. ϵ нинг ишчи қиймати ва температура ўзгаришида унинг стабиллигини ошириш учун қуйидагича иш қилинади: титанат барий асосидаги керамикага Кюри температурасини камайтирадиган ва фазавий ўтишлардаги диэлектрик киритувчанликнинг максимумини текислайдиган қўшимчалар қўшиш (бундан бир фазали қаттиқ қоришма асосидаги керамика ҳосил қилишда фойдаланилади); керамикада ϵ нинг температуравий боғланишини текислайдиган, хоссалари бири-биридан фарқланадиган икки ва ундан ортиқ фаза ҳосил қилинади. 2.6 - жадвалда BaTiO_3 асосида биринчи усул ёрдамида ҳосил қилинган материалларнинг хоссалари келтирилган.

2.6-жадвал

Материалнинг маркази	ϵ нинг 20°C гаги қиймати	Ишчи температура интервали, $^{\circ}\text{C}$	Реверсия с ният ўзгариши ($E \approx 0,5 \text{ кВ/см}$ гача), %	Электр муқоимлиги, кВ/см	Асосий кристалл фазаси	Кюри температураси, $^{\circ}\text{C}$
Г-8000	8000-10000	$-60 \dots +85$	± 30	4-5	Қаттиқ қоришма BaTiO_3 - BaZrO_3	20-40
ВС-1	12000-14000	$-60 \dots +85$	± 30	4-5	Қаттиқ қоришма BaTiO_3 - CaZrO_3	10-20
ОКС	10000-11000	$-60 \dots +85$	± 50	5-6	Қаттиқ қоришма BaTiO_3 - CaSnO_3	0-10
Г-10000	12000-15000	$-60 \dots +85$	± 50	5-6	Қаттиқ қоришма BaTiO_3 - CaSnO_3	20-30

Бу материаллар юқори ҳажмий қаршилик (10^{11} Ом-см дан кам эмас) ва тангенс йўқотиш бурчагининг 1 КГц частотадаги қиймати $\text{tg}\delta \approx 0,01-0,02$ эканлиги билан характерланади. Лекин бу усул билан диэлектрик киритувчанликнинг

температура ўзгариши билан кам ўзгарадиган сегнетокерамик материаллар ҳосил қилиш мумкин эмас экан.

Шу сабабли диэлектрик киритувчанликнинг температуравий стабиллиги юқори бўлган керамикали материаллар ҳосил қилиш учун иккинчи усулдан — керамикада хоссалари билан фарқ қиладиган иккита ва ундан ортиқ фаза яратишдан фойдаланилади. Бундай усул билан яратилган материалларнинг хоссалари 2.7-жадвалда келтирилган.

2.7-жадвал

Материалнинг маркази	ϵ нинг 20°C даги қиймати	ϵ нинг -60 дан +125°C гача бўлган температура интервалидаги нисбий ўзгариши	Реверсив ϵ нинг ўзгариши ($E=0.5$ кВ/мм. гача). %	Электр мустаҳкамлик. кВ/мм	Асосий кристалл фазаси
T-1000	1600-1800	± 20	± 10	6	BaTiO ₃ +қаттиқ қоришма (Ba, Bi, TiO ₂)
T-2000	2000-2200	± 30	± 10	6	BaTiO ₃ +қаттиқ қоришма (Ba, Bi, TiO ₂)
TNC-2500	2500-2700	± 30	± 10	5	BaTiO ₃ +қаттиқ қоришма BaTiO ₃ -Sm ₂ O ₃ -Nb ₂ O ₅)

Бу материалларда $\text{tg}\delta \approx 0,01-0,2$ ва ҳажмий солиштирма қаршилик юқори бўлиб, 10^{11} Ом·см дан кам эмас.

2.9. СИТАЛЛАР ТЕХНОЛОГИЯСИ

Ситаллар шиша кристалл маҳсулотлар бўлиб, махсус таркибли шишани мажбурий кристаллаш йўли билан олинади. Ситаллар структура жиҳатидан шиша ва керамика оралиғида жойлашган. Унинг шишадан фарқи — кристалл тузилишга эгаллиги бўлса, керамика ва бошқа кристалл материаллардан фарқи — жуда кичик бир жинсли. микрокристалл структурага эгаллигидир. Шу сабабли улар юқори физик-кимёвий хоссаларга эга: механик мустаҳкамлиги катта (тахминан прокатли шишага нисбатан 10 марта

мустаҳкамрок), юқори қаттиқлик ва ишқаланиб емирилишга турғунлик. юмшаш температурасининг юқорилиги (1350°C гача), иссиқликка чидамлилиги ($300 - 700^{\circ}\text{C}$), зичлигининг кичиклиги $2,3-2,8 \text{ мг/мм}^3$ ва электр изоляцияловчи характеристикаларининг яхшилиги кабилар.

Оддий шишаларни кристаллаш билан ситаллар ҳосил қилиш қийин жараёндир. Шу сабабли бу жараёни осонлаштириш учун махсус таркибли шиша масса тайёрланади ва уни ҳамма ҳажми бўйича бирданига кристаллаш керак бўлади Бунинг учун шиша массада жуда кўп сонли кристалланиш марказлари ҳосил қилинади. Бунинг учун шихтага кристалланиш катализаторлари вазифасини бажарувчи моддалар қўшилади ва махсус режимда термик қайта ишлов берилиб, шаклланган маҳсулот олинади.

Кристаллаш катализаторлари вазифасини бажарувчи бирикмалар ёки элементлар қуйидаги талабларга жавоб бера билишлари керак:

- катализатор шишада юқори температураларда (пишириш температураси атрофи) чексиз эрувчанликка ва паст температураларда (юмшаш температураси ва ундан пастроқ) чекланган эрувчанликка эга бўлиши керак;

- катализатор паст температура соҳаларида шишада кристаллаш марказлари ҳосил қилиш активлаш энергиясини камайтириши керак;

- катализатор ион ва атомларининг диффузия тезлигининг қиймати паст температураларда шишанинг асосий компонентларига қараганда юқори бўлиши керак;

- кристаллнинг шиша билан ҳўлланишини таъминлаш учун кристалл муртак-шиша чегараси кичик сирт энергиясига эга бўлиши керак;

- катализаторнинг кристалл панжараси ва ажралаётган кристалл фаза параметрлари бир-бирига яқин бўлиб, $10-15\%$ дан кўпга фарқ қилмаслиги керак.

Кристалланиш марказларини ҳосил қилишда икки хил усулдан фойдаланилади. Биринчи усулда уларнинг таркибига ёруғлик сезувчи металл катионлари Cu^+ , Ag^+ , Au^+ бўлган бирикмалар қўшилади. Маълум бир тўлқин узунлиқдаги нурлар билан нурлантирилгандан сўнг улар кристалланиш марказлари бўлиб қолади. Бундай ситаллар фотоситаллар дейилади. Иккинчи усулда кристалланиш марказлари нурлантирилмасдан қайта термик ишлов бериш билан ҳосил қилинади. Бундай усул билан ҳосил қилинган ситаллар термоситаллар дейилади.

Ситаллар ҳосил қилишнинг технологик босқичлари. Ситаллар ҳосил қилиш технологик босқичлари ўзгартирилган ва тўлдирилган шиша технологияси ва керамика технологияси асосида олиб борилади.

Ситалл олишда шишали буюмлар ишлаб чиқариш технологиясидан фойдаланилганда (шихта ҳосил қилиш → шиша қайнатиш → буюмларни шаклантириш → маҳсулотни қиздириш) у яна битта технологик босқич: буюмларни кристаллаш билан тўлдирилади. Бу босқич қиздиришсиз ёки ундан кейин амалга оширилади.

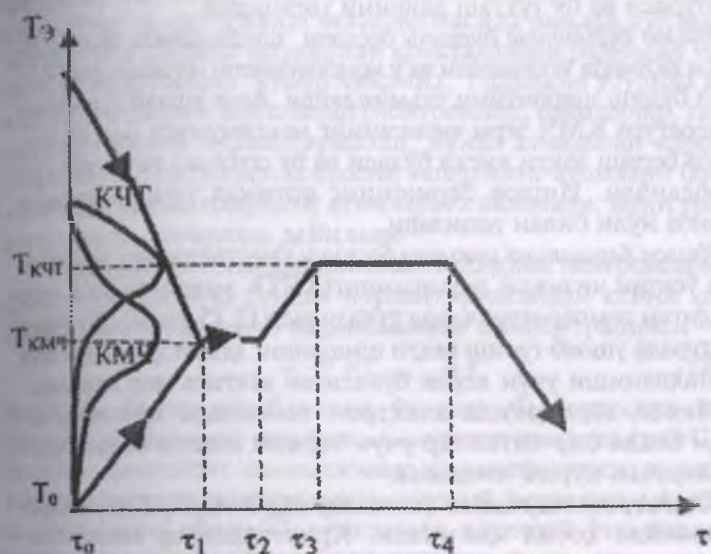
Баъзи бир ҳолларда, масалан, мураккаб конфигурацияли деталларни ишлаб чиқаришда, ситаллар ҳосил қилишда керамикали технология қуйидаги схема бўйича қўлланилади: шихта олиш → шиша қайнатиш → гранулалаш → шишани кукун ҳолигача майдалаш → шликер ҳосил қилиш → буюмларни шаклантириш → ёпиб пишириш (спекание) → кристаллаш.

Ситалл шихтаси шиша шихтадан кристаллаш катализаторлари борлиги билан фарқланади. Шу билан бирга қўлланилаётган хомашё компонентларининг тозалигига бўлган талаб ўта юқорилигича қолади.

Шиша масса таркибига боғлиқ ҳолда 1300 дан 1700 °C гача бўлган оралиқда қайнатиб пиширилади. Бунда осон учувчан катализаторлардан фойдаланилган бўлса, унда уларнинг учиб чиқиб кетмасликлари учун махсус чоралар қўлланилади.

Ситалли шишаларга шакл беришда асосан қуйиш ва пресслаш усулларидан фойдаланилади, чунки ситалли шишаларнинг кўп таркиблари қисқа температура оралиғида шаклланади. Шу сабабли шаклланишнинг бошқа усулларидан фойдаланиш мақсадга мувофиқ эмас.

Шаклантириш натижасида ҳосил бўладиган ички механик кучланишларни олиб ташлаш учун буюмлар қиздирилади (отжиг). Бу жараён қовушқоқликнинг $1 \cdot 10^{12} - 4 \cdot 10^{13}$ Па·с қийматларига мос келадиган температураларда ўтказилади. Бундан сўнгги технологик босқич шишани кристаллашдир. Баъзи бир буюмлар тайёрлашда кристаллаш шаклантиришдан кейин ўтказилади. Бунда шаклланган буюм кристалланиш марказлари максимал ажралиб ҳосил бўладиган температурагача қиздирилади.



2.15-рasm. Шишани ситаллга айлантириш учун
қайта термик ишлов бериш режими схемаси

Шишани кристаллаш босқичи буюмларга махсус термик ишлов бериш жараёни давомида амалга оширилади.

2.15 - расмда шишани ситаллга айлантиришда термик қайта ишлов бериш режимининг схемаси келтирилган.

Келтирилган термик ишлов бериш режимининг асосий хусусиятларидан бири бунда иккита ўзига хос температура-нинг борлигидир. Бу температуранинг биринчиси кристалланиш марказларининг максимал ҳосил бўлишини, иккинчиси уларнинг чизикли ўсиши максималлигини таъминлаши керак. 2.15-расмда кристалланиш марказлари ҳосил бўлиши ва ўсишининг кинетик боғланишлари температура-вақт боғланишлари билан биргаликда келтирилган. Бу эса кристалланиш марказлари ҳосил бўлиш частотаси (КМЧ) ва кристаллашнинг чизикли тезликлари (КЧТ) билан термик ишлов бериш режими орасидаги боғланишни яққол кўрсатиш имконини беради. Бу боғланишлардан кўриниб турибдики, кристаллаш жараёнини эритмани совутиш ёки қотиб қолган шишани қиздириш билан амалга ошириш мумкин экан. Бунда асосийси термик ишлов бе-

ришдаги биринчи ва иккинчи тўхташларнинг оптимал температураси ва бу тўхташ даврини топишдир.

Ишлов беришнинг биринчи босқичи шишаланмиш температураси яқинида ўтказилади ва у кристалланиш марказларининг ҳосил бўлиш шароитини таъминлайди. Агар ушлаб турилган температура КМЧ эгри чизигининг максимумига мос келса, ишлов бериш вақти қисқа бўлади ва бу оптимал температура ҳисобланади. Ишлов беришнинг оптимал температураси тажриба йўли билан топилади.

Ишлов беришнинг иккинчи босқичи кристалланиш марказлари ўсиши чизиқли тезлигининг (КЧТ) максимумига мос келадиган температураларда ўтказилади (2.15-расм). Бу температурада ушлаб туриш вақти шишанинг ҳамма ҳажм бўйича кристалланиши учун керак бўладиган вақтига мос келади.

Мисол тариқасида электрон техникада қўлланиладиган баъзи бир ситаллар учун термик ишлов бериш режимларини кўриб чиқамиз.

Кордиерит таркибли ситаллар $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ тизими асосида ҳосил қилинади. Кристалланиш катализаторлари сифатида 9-11% TiO_2 қўшилмаси хизмат қилади. Ишлов бериш режими бир босқичли бўлиб, 1250-1300 °C температурада 1-16 соат давомида ушлаб турилади.

Кўргошинли ситаллар $PbO-ZnO-B_2O_3-SiO_2$ тизимда ҳосил қилинади. Катализаторлар сифатида P_2O_5 , WO_3 , MoO_3 ва бошқа бирикмалар қўлланилади. Кристалланишдаги термик ишлов бериш режимлари таркибга боғлиқ бўлиб, мисол тариқасида қуйидагича бўлиши мумкин: биринчи босқич 500 °C температурада 2 соат давомида, иккинчи босқич — 700 °C температурада 1 соат вақт давомида амалга оширилади.

2.10. ЯРИМУТКАЗГИЧЛИ ВА ДИЭЛЕКТРИК МАТЕРИАЛЛАР МОНОКРИСТАЛЛАРИНИ ЛЕГИРЛАШНИНГ ФИЗИК-КИМЁВИЙ АСОСЛАРИ

2.10.1. КРИСТАЛЛАРНИ ҚАТТИҚ ФАЗАДА ЛЕГИРЛАШ

Ўстирилган яримўтказгичли ва диэлектрик кристалларни қаттиқ фазада легирлаш учун киришмаларни газсимон, суюқ ва қаттиқ ташқи фазалардан диффузиялаш усули ҳамда радиацияли легирлаш усулларида фойдаланилади. Диф-

фузияли легирлаш асбоблар технологияси усули бўлиб, материаллар ҳосил қилиш технологиясида амалда қўлланилмайди. Шу сабабли ўстирилган кристалларни радиация усули билан легирлашни кўриб чиқамиз. Радиация усулида кристаллар ядровий заррачалар (нейтронлар, протонлар, гамма нурлар) билан нурлантирилади. Бунда кечадиган ядровий реакциялар натижасида асосий модданинг атомлари бошқа кимёвий элементларнинг атомларига айланади. Буни трансмутацияли легирлаш дейилади.

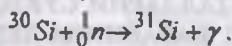
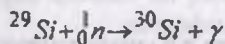
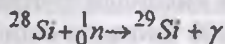
Радиацияли легирлашда асосан иссиқлик нейтронларидан фойдаланилади ва бундай нурлантирилгандан кейин ҳосил бўладиган легирловчи киришманинг концентрацияси

$$C_{\text{кир}} = \Phi \sigma C_{\text{ас.к}} a t \quad (2.10)$$

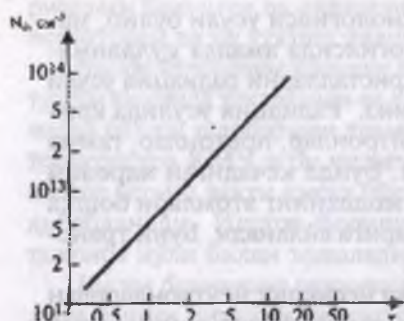
формула билан ҳисобланади, бу ерда, Φ —иссиқлик нейтронлар оқимининг зичлиги, t —нурлантириш вақти, $C_{\text{ас.к}}$ —асосий компонент атомларининг концентрацияси; a —асосий компонентнинг кенг тарқалган ядровий ўзгарадиган изотопи; σ —берилган ядровий реакцияда ядровий ўзгаришнинг изотопли самарадорли қирқим юзаси.

Мисол тариқасида кремнийни иссиқлик нейтронлари билан нурлантириб радиацияли легирлашда кечадиган ядровий реакцияларни кўриб чиқамиз.

Табиий кремний учта ўзининг стабил изотопларининг аралашмасидан ташкил топган: ^{28}Si (92,28%), ^{29}Si (4,67%), ^{30}Si (3,05%). Бу изотоплар секин нейтронлар билан нурлантирилганда уларнинг ядролари нейтронларни ютиб, γ -квантларини чиқариб бошқа изотопларга айланади:



^{31}Si изотопи барқарор эмас ва ярим парчаланиш даври 2,6 соат давомида бўлиб, фосфорнинг ^{31}P барқарор изотопига айланади. Бундай усул билан киритилган фосфорнинг концентрацияси юқоридаги (2.10) формула билан ҳисобланади. Бу формуладаги σ , $C_{\text{ас.к}}$ ва a — бошланғич материалнинг физик характеристикалари бўлганлиги учун ва легирлаш жараёнининг ҳар бир сериясида секин нейтронлар оқимининг зичлигини ўзгармас деб ҳисоблаш мумкинлиги сабабли



2.16-расм. Кремнийга киритилаётган фосфор атомлари концентрациясининг кристаллни иссиқлик нейтронлари билан нурлантириш вақтига боғлиқлик графиги.

киритилаётган фосфорнинг концентрацияси фақат юқори даражадаги аниқлик билан (~1% ва ундан ҳам яхшироқ) назорат қилиш мумкин бўлган нурлантириш вақтига боғлиқ бўлади (2.16-расм).

Радияцияли легирлаш усулининг биринчи камчилиги нурлантирилаётган кристаллда кристалл панжара радияцияли бузилишларининг рўй беришидир. Шу сабабли бундай кристалларга нурлангандан сўнг термик ишлов бер

рилади, яъни ҳосил бўлган радияцияли нуқсонларни йўқ қилиб юбориш учун 800 °C температурада 1 соат давомида қиздирилади.

Бу усулнинг иккинчи камчилиги нурлантириш таннархининг юқорилиги ва радияция хавфсизлигини таъминлаш зарурлигидир.

Нейтрон трансмутация усули билан легирланган кремний саноатда 1975 йилдан бошлаб кенг ишлаб чиқарилмоқда. Бу материал куч асбоблари ишлаб чиқаришда асосий материал бўлиб қолди, чунки бундай асбоблар ишлаб чиқаришда кристаллдаги киришмалар тақсимотининг юқори даражадаги бир жинслиги талаб қилинади. Бундай кремнийнинг бир йиллик ишлатилиши 100 тоннадан ошиб кетади.

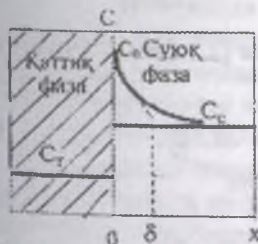
2.10.2. КРИСТАЛЛАРНИ СУЮҚ ФАЗАДАН ЎСТИРИШ ЖАРАЁНИДА ЛЕГИРЛАШ

Таркибида легирловчи киришма бўлган эритманинг кристалланиши. Кристалларни суюқ фазадан ўстиришда унга маълум миқдорда легирловчи киришмалар қўшилади. Легирланган эритмалардан кристалларни ўстириш шароити ва кристалл ўсишини кузатиб борадиган кристалланиш фронтидаги жараёнларнинг характери тоза эритмаларнинг кристалланишидан фарқ қилади. Эритмага қўшилган киришма кристалланишда сирт жараёнлари кинетикасига таъсир қилишдан

ташқари тоза модданинг эриш температурасини ўзгартиради. Бунда модда ва киришма атомларининг ўзаро таъсир характери боғлиқ ҳолда эриш температураси ё камайиши мумкин, ё кўпайиши мумкин.

Кўпинча кремнийга қўшилган киришмалар унинг эриш температурасини камайтиради. Бу жараён фазали диаграммалар асосида тушунтирилади.

Энди таркибида легировчи киришма бўлган эритмалардан кристаллар ўсиш шароитининг суяқ ва қаттиқ фазалар орасида киришмаларнинг қайта тақсимланиш характериға таъсирини кўриб чиқамиз. Амалда кўп учрайдиган киришманинг мувозанатли тақсимланиш коэффициенти $K_0 < 1$ бўлган ҳолни кўрамиз. Кристаллнинг v тезлик билан ўсиши мобайнида ҳосил бўладиган қаттиқ фазада киришманинг микдори бошланғич эритмага қараганда кам бўлади ва шу сабабли бўлиниш чегараси яқинида эритмадаги киришма концентрацияси ошиб боради. Шундай қилиб, ҳаракатланаётган кристалланиш фронтида ажралаётган ортқча киришмаларнинг йиғилиши натижасида унинг олдида δ диффузияли қатлам ҳосил бўлади (2.17-расм). Бу қатламдан киришма диффузия йўли билан эритманинг ҳажмиға ўтади. Диффузияли қатлам δ нинг қалинлиги эритмани аралаштириш интенсивлигига, унинг қовушқоқчилигига, киришманинг эритмадаги диффузия коэффициенти D га ва шу каби омилларға боғлиқ бўлади. Шу сабабли кристалланиш фронти чекли v тезлик билан ҳаракатланаётган кристалл ўсишидаги реал тақсимот коэффициенти ҳолат диаграммасидан аниқланадиган мувозанатли тақсимот коэффициенти K_0 дан фарқ қилади ва уни эффектив тақсимот



2.17-расм. Эритма билан ўсаётган кристалл оралтигда киришманинг тақсимоғи

коэффициенти K дейилади. Киришманинг эффектив (K) ва мувозанатли (K_0) тақсимот коэффициентлари орасидаги боғланишни топамиз. Бунинг учун эритмадаги ҳаракатланаётган кристалланиш фронти олдидаги киришма тақсимоғини ифодалайдиган боғланиш-ни топиш керак (2.17-расм).

Икки фазали кристалл—эритма тизимида киришманинг тақсимоги ҳаракатланаётган муҳитдаги масса алмашишнинг дифференциал тенгламаси билан ифодаланади:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = -v \operatorname{grad} C + D \nabla^2 C, \quad (2.11)$$

бу ерда, C — киришма концентрацияси, v — суюқликнинг ҳаракат тезлиги, D — диффузия коэффиценти.

Бир ўлчамли ҳол учун (2.11) қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = -v_x \frac{dC}{dx} + D \frac{d^2 C}{dx^2}. \quad (2.12)$$

(2.12) тенглама қуйидаги қабул қилинган тахминлар асосида ечилади. Диффузияли қатламдаги киришманинг диффузия коэффиценти ўзгармас: $D = \text{const}$; кристалл ўсишининг режими ўзгармас ҳолатга келган, яъни

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = 0, \text{ унда } -v_x \frac{dC}{dx} + D \frac{d^2 C}{dx^2} = 0. \quad (2.13)$$

Яна δ қатлам чегарасида эритма ҳаракатининг тезлиги v_x кристаллнинг ўсиш тезлиги v га тенг ($x < \delta$ да $v_x = v$); қаттиқ фазадаги киришма концентрацияси C_x га тенг, суюқ фазанинг $x > \delta$ чуқурлигида $C = C_c$ — эритмадаги киришманинг ўртача концентрацияси (2.17-расм). Суюқ фазада масса узатиш жараёнидан келиб чиқиб, (2.13) тенгламани ечиш учун чегаравий шартлар фазаларнинг бўлиниш чегарасига қаттиқ фазадаги масса ўтказувчанлик натижасида келган киришма оқими билан ундан масса узатиш натижасида олиб кетилаётган киришма оқимининг тенглигидан аниқланади. Шундай қилиб,

$$\left. \begin{aligned} v(C_c - C_r) + D \frac{dC}{dx} &= 0 \\ C &= C_c \end{aligned} \right\} \begin{aligned} x &= 0 \text{ да} \\ x &= \delta \text{ да} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Мана шу чегаравий шартларда (2.13)нинг ечими қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$\frac{dC}{dx} = \frac{v}{D} (C_r - C_c) - \frac{v_r}{D}, \quad (2.15)$$

бундан қуйидагини ҳосил қиламиз:

$$\frac{C - C_r}{C_c - C_r} = \exp\left(\frac{v\delta}{D} - \frac{v_r}{D}x\right). \quad (2.16)$$

Қуйидагича белгилаш киритамиз:

$$\nu\delta / D = \Delta \quad (2.17)$$

ҳамда эритмадаги киришма концентрацияси бўлиниш чегарасининг ўзида ($x=0$ да) C_0 га тенглигини эътиборга олиб қуйидагига эга бўламиз:

$$\frac{C - C_T}{C_s - C_T} = e^{\Delta}. \quad (2.18)$$

(2.18) ифода тажрибада кузатиладиган ҳодисаларни тўлиқ тавсифлаши шундоқ қўриниб турибди. Ҳақиқатан ҳам кристаллнинг ўсиш тезлиги жуда кичик бўлганда, яъни $\nu \rightarrow 0$ да эритмадаги киришма концентрацияси текисланиб, $C_0 = C_s$ бўлиб қолади. Ўсиш тезлиги катталашганда бўлиниш чегарасида ($x=0$) киришма концентрацияси C_0 кўпаяди. Бу кристаллдаги киришма концентрациясининг кўпайишига олиб келади ва бунда C_s/C_0 нисбат ўсиш тезлигига боғлиқ бўлмайди деб ҳисобланади. Шу сабабли бу нисбатдан кристалл—киришма тизимининг характеристикаси сифатида фойдаланиш мумкин. Бундан ташқари C_s/C_0 нисбат ишчи параметр бўлиб, C_0 га таъсир қиладиган ҳамма омиллар, хусусий ҳолда ўсиш тезлиги ва аралаштириш интенсивлиги ўзгарганда у ҳам ўзгаради. (2.18) тенгликка мувозанатли ($K_0 = C_s / C_0$) ва эффектив ($K = C_s / C_T$) тақсимлаш коэффициентларини киритиб, уларни бир-бири билан боғлайдиган тенгламани ҳосил қиламиз:

$$K = \frac{C_T}{C_s} = \frac{K_0}{K_0 + (1 - K_0)e^{-\Delta}}. \quad (2.19)$$

Ҳар хил турлардаги кристалл — киришма тизими учун эффектив тақсимлаш коэффициентининг Δ га боғланишлари 1.15-расмда келтирилган.

Тажриба асосида қурилган $K = f(\Delta)$ боғланишлар ўстирилаётган кристаллда C_s нинг керакли қийматини таъминлаш ва легирлашнинг аниқ шароитлари учун берилган эритма массасига қўшиладиган киришманинг (маълум ва ўзгармас K_0 қиймат билан характерланадиган) миқдорини аниқлаш имкониятини беради. Шунини таъкидлаш керакки, (2.19) га биноан K кристалл ўсишининг тезлигигагина боғлиқ бўлиб қолмасдан, балки δ га ва эритмадаги киришма диффузияси коэффициенти га ҳам боғлиқ бўлиб, қиймати кўпчилик эритма—киришма тизимлари учун 10^{-4} – 10^{-3} см²/с оралиқда бўлади. δ нинг қиймати эса асосан эритмада кечадиган гидродинамик жараён-

ларга боғлиқ бўлиб, улар кристаллнинг ўсиш тезлиги, кристалл диаметрининг тигель диаметрига бўлган нисбати, эритмада температуранинг тақсимланиши кабилар билан аниқланади. δ нинг қиймати 1 дан 10^{-2} см гача ўзгариши мумкин. Шундай қилиб, легирланган кристаллни ўстириш учун оптимал шароитларни танлаб олиб (тигель ва кристаллнинг геометрик ўлчамлари, қиздиргич, тигель ва кристаллнинг ўзаро жойлашиши, тигель ва кристаллнинг айланиш тезликлари, иссиқлик шароити кабилар) δ нинг қийматини ўзгармас ҳолда ушлаб туриш мумкин. Мана шу ҳолатда қурилган $K = f(\Delta)$ боғланишлар берилган легирловчи киришма тизими учун эффектив тақсимлаш коэффициентининг кристаллнинг ўсиш тезлиги v га боғланиш графигини беради.

Баъзи бир ҳолларда, агар эритмани аралаштириш характери берилган бўлса, унда δ нинг катталигини аналитик усул билан аниқлаш мумкин. Масалан, Чохральский усули билан легирланган кристаллар олишда эритма кристалл ва тигелни ўз ўқлари атрофида қарама - қарши томонларга айлантириш билан аралаштирилаётган бўлса ва бунда уларнинг бурчак тезликлари мос равишда ω_x ва ω_m бўлса, унда ўсиш тезлигининг унча катта бўлмаган қийматлари учун δ Бартон, Прим ва Сликхтерлар таклиф қилган ифода билан аниқланади:

$$\delta = AD^{1/3} v^{1/6} \omega^{-1/2}, \quad (2.20)$$

бу ерда, A — 1,3 дан 1,6 гача қийматга эга бўлган ўзгармас сон, v — эритманинг кинематик қовушқоқлиги; $\omega = \omega_x + \omega_m$. (2.19) формулани келтириб чиқаришда кристаллдаги легирловчи киришманинг концентрацияси эритманинг сиртига яқин қатламидаги концентрация билан мувозанатда деб қабул қилинди. Бундай кристаллга киришманинг мувозанатли кириб бориши учун қуйидаги шарт бажарилиши керак:

$$v \ll D_K / a^* = v_D, \quad (2.21)$$

яъни кристаллнинг ўсиш тезлиги ундаги киришманинг диффузия тезлиги v_D дан кўп марта кичик бўлиши керак. Бу ерда D_K — киришманинг қаттиқ фазадаги диффузия коэффициенти, a^* — ўсишнинг элементар поғона баландлиги.

Ўсишнинг катта тезликларида (2.21) тенгсизлик ва унга мос равишда бўлиниш чегараси сиртидаги мувозанат шarti ўринли бўлмас экан. Бундай шароитда легирланган кристаллар ўстиришда ёқларнинг таъсири (ёқлар эффекти) юз беради (2.18-расм). Бундай ҳолда эффектив тақсимлаш коэффициенти нинг тезликка боғланиши ва унинг мувозанат-

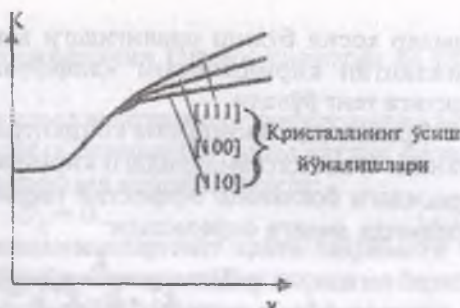
ли тақсимлаш коэффициентига боғлиқлиги киришмаларни қамраб олишнинг адсорбцияли механизмидан келиб чиқиб ҳосил қилинади.

Адсорбция тўғрисидаги қарашлардан сирт қатламдаги киришма концентрацияси

фазалардаги (кристаллда ва эритмада) мос концентрациялардан юқори бўлиши мумкинлиги келиб чиқади. Бунда сирт қатламининг қалинлиги бир неча атом текислигига эга бўлади деб ҳисобланади. Кристаллнинг ўсиши мобайнида бу текисликлар қаттиқ фазанинг ичкарисига ўтиб боради ва улардаги киришма концентрацияси номувозанатли бўлиб қолади. Бунинг натижасида киришманинг ошиқча ёки камчил атомларининг эритма ичкарисига ёки ундан ташқарига диффузияли релаксация жараёни бошланади. Шу сабабли, агар янги қатламларнинг ҳосил бўлиш тезлиги катта бўлса, унда адсорбцияланган киришманинг ошиқча атомлари кристаллнинг ички қисмида қолиб кетади. Мана шунга биноан, ундаги концентрация мувозанатли ҳолдагидан фарқ қилади. Сирт қатламга нисбатан аниқланадиган тақсимлаш коэффициенти K_0 дан катта бўлади. Бу тақсимлаш коэффициенти ҳақиқий тақсимлаш коэффициенти дейилади ва K^* билан белгиланади. Ҳақиқий тақсимлаш коэффициентининг формуласи куйидаги кўринишга эга бўлади:

$$K^* = K_0 + (K_s - K_0)e^{-V_0/V}, \quad (2.22)$$

бу ерда, K_s — адсорбцияланган киришма атомлари концентрациясининг уларнинг эритмадаги яқин жойлашган қатламлардаги концентрациясига нисбати, V_0 — бирлик вақт ичида киришма концентрацияси e марта ўзгарадиган ҳолдаги ўсиш тезлиги. Бу шундай тезликки, бунда қўшни қат-



2.18-расм. Ҳар хил ориентацияли ўсаётган кристалл учун тақсимлаш коэффициентининг ўсиш тезлигига боғлиқлиги графиклари.

ламлар ҳосил бўлиш оралиғидаги вақт интервали адсорбцияланган киришманинг «диффузияли релаксацияси» вақтига тенг бўлади.

Кристаллдаги киришма концентрацияси C_k билан эритманинг ички қатламларидаги киришма концентрацияси C_e орасидаги боғланиш эффектив тақсимлаш коэффициенти ёрдамида амалга оширилади:

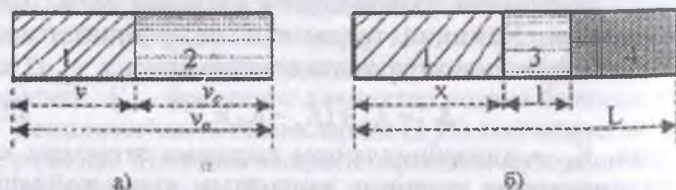
$$K = \frac{K^*}{K^* + (1 - K^*)e^{-\lambda}}, \quad (2.23)$$

бу ерда, K^* (2.22) бўйича аниқланади.

(2.23) формула тажриба йўли билан аниқланадиган бир нечта: d , K_e , K_s ва v_p параметрларни ўз ичига олади. Ўсиш тезлиги нисбатан катта бўлмаган соҳаларда ишланганда бу параметрларнинг сонини қисқартириш мумкин. Бунда K^* ни v га боғлиқ эмас, фақат кристаллографик ориентацияга боғлиқ ҳолда ўзгаради деб ҳисобланади.

Ўстириляётган кристаллларда киришманинг тақсимоти. Эритмадан легирланган кристаллларни ўстиришнинг мумкин бўлган ҳамма усулларини иккита идеallasган схемага келтириш мумкин. Биринчи схема нормал йўналишли кристаллаш ёки нормал совутиш дейилади. Бу ҳолатда материалнинг ҳамма қисми эритилгандан кейин эритмани битта йўналишда секин-аста кристаллаш бошланади (2.19-расм, а). Иккинчи схема зонали эритиш дейилади. Бунда материалнинг ҳамма қисми эритилмасдан фақат бир қисми — зонаси эритилади (2.19-расм, б).

Бинар тизимларни йўналишли кристаллаш ва зонали эритиш металлургия жараёнларида компонентларнинг тақсимотини фақат баъзи бир тахминлар қабул қилингандagina аниқ ва ишончли математик тасвирлаш мумкин.



2.19-расм. Адсорбция кристалланиш жараёнининг схемаси:
а — нормал йўналишли кристалланиш; б — зонали эритиш
(1 — кристалланган қисм; 2 — эритма; 3 — суяқ фаза зонаси; 4 —
бошланғич ҳом ашё (затрузка))

Бу тахминларнинг асосийларини Пфанн киритган ва улар куйидагича:

1. Қаттиқ фазадаги компонентларнинг диффузияли қайта тақсимот жараёни ҳисобга олинмайди, яъни қаттиқ фазада компонентларнинг диффузия коэффициенти:

$$D_K = 0. \quad (2.24)$$

2. Суюқ фазада компонентларнинг қайта тақсимо-ти ва таркибнинг бир хилда бўлиб текисланиши бир лаҳзада юз беради, яъни суюқ фазада диффузиянинг эффектив коэффициенти:

$$D_C = \infty, \quad (2.25)$$

бу шарт одатда суюқ фазанинг тўла аралашуви ҳам дейилади.

3. Тақсимотнинг эффектив коэффициентининг катта-лиги ўзгармас деб қабул қилинади, яъни

$$K = \text{const}. \quad (2.26)$$

Бу тахмин киришма концентрациясининг кичик соҳа-лари учун тўғри бўлиб, ундан ташқари жараён давомида ўсиш тезлигининг ҳам ўзгармас эканлигини назарда тутати:

$$v = \text{const}.$$

4. Эриш ва қотиш жараёнларида кристалланаётган ма-териалнинг ҳажми ўзгармайди, яъни суюқ ва қаттиқ фаза-ларнинг зичликлари бир бирига тенг:

$$\rho_K = \rho_C = \rho. \quad (2.27)$$

5. Конденсирланган (суюқ ёки қаттиқ) ва газ фазалари орасида материаллар алмашуви йўқ, тизимда учувчан ва диссоцияли компонентлар йўқ.

Пфанн киритган тахминлар асосида икки хил идеал-лашган схема бўйича ўстирилаётган кристаллда киришма-ларнинг тақсимо-тини кўриб чиқамиз.

Нормал йўналишли кристаллашда киришманинг тақсимо-ти. Бу схема билан амалиётда энг кўп қўлланиладиган Бриж-мен, Чохральский, Киропулос каби усулларда ўсиш жара-ёнида кристалларни легирлаш тавсифланади.

Нормал йўналишли кристаллаш жараёнида кристаллдаги киришма тақсимо-тини ифодалайдиган тенгламани кирита-миз. Маълум бир вақтда эритманинг миқдори V бўлсин (2.19-рasm, а). Мана шу лаҳзадаги эритма ва кристаллдаги кириш-ма компонентининг концентрацияларини мос ҳолда C_K ва C_C билан белгилаймиз. Аниқлик учун киришма компонен-тининг эриш температурасини асосий компонентга қара-

ганда кичик деб қабул қиламиз, яъни $K \ll 1$ бўлган ҳолни кўриб чиқамиз. Кристалланиш фронти температураси камайтирилганда эритманинг dV_c қисми кристалланган бўлсин. Бунда эритмадан кристаллга ўтган киришма компонентининг миқдори $C_c dV_c$ га тенг бўлади. Суюқ фазада эса киришма компонентининг бошланғич миқдорига нисбатан ортиқча $(C_c - C_c^0) dV_c$ қисми қолади. Бу эритмадаги киришма концентрациясининг ўзгаришига олиб келади:

$$dC_c = - \frac{C_c - C_c^0}{V_c} dV_c \quad (2.28)$$

ёки (2.26) ни ҳисобга олсак:

$$dC_c = - \frac{C_c - C_c^0 K}{V_c} dV_c = - \frac{(1-K)C_c^0}{V_c} dV_c \quad (2.29)$$

Каср олдидagi минус эритманинг ҳажми камайганда ундаги киришма концентрациясининг ошишини белгилайди. (2.29) ни интеграллаш куйидаги бошланғич шартлар асосида ўтказилади:

$$C_{c, V_c=V_0} = KC_{c, V_c=V_0} = KC^0 \quad (2.30)$$

бу ерда, V_0 — материалнинг умумий ҳажми, C^0 — суюқ фазадаги киришманинг бошланғич концентрацияси.

Интеграллаш натижасида куйидаги ифодани ҳосил қиламиз:

$$C_c = KC^0 (V_c / V_0)^{K-1} \quad (2.31)$$

(2.31) ифодадаги $C_c(V_c)$ таркибли қатлам кристалланган лаҳзада суюқ ҳолатда қоладиган эритма ҳиссасидан таҳлил учун қулай бўлган мана шу лаҳзада кристалланган модда ҳиссаси g га ўтамиз. 2.19-расм, а га биноан,

$$g = 1 - \left(\frac{V_c}{V_0} \right). \quad (2.32)$$

(2.32) ифодани (2.31) га қўйиб, куйидагини ҳосил қиламиз:

$$C_c(g) / C^0 = K(1-g)^{K-1}. \quad (2.33)$$

Пфани тахминлари асосида ҳосил қилинган (2.33) ифодадан қаттиқ фазадаги киришма концентрациясининг унинг эритмадаги бошланғич концентрациясига нисбати киришманинг тақсимланиш коэффициентини ва кристаллнинг мос қисмида қотаётган лаҳзадаги кристалланидиган эритманинг ҳиссасига боғлиқ бўлишлигини келиб чиқади.

Зонали эритишда киришманинг тақсимоги. Зонали эритиш схемаси бўйича ўстирилаётган кристалларни легирлаш жараёнини ҳам Пфанн тахминлари асосида кўриб чиқамиз. Жараён давомида эритилган зона ҳажми ўзгармас бўлиб қолади, деган қўшимча тахмин киритамиз. Бунда тигел ва кўндаланг кесими ўзгармас бўлган бошланғич заготовкадан фойдаланишимизни ҳисобга олсак, унда эриган зонанинг ҳажми ўзгармас деган тахминдан зонанинг узунлиги l жараён давомида ўзгармас деган тахминга келамиз:

$$l = \text{const} \quad (2.34)$$

Узунлиги L ва кўндаланг кесим юзаси ўзгармас s бўлган, C^0 концентрация билан бир хил легирланган қуймадан эриган зона бир марта ўтиб бўлгандан сўнг кристаллдаги киришма тақсимогини кўриб чиқамиз. Қуйманинг бошидан x масофада узунлиги l бўлган эриган зона жойлашган бўлсин (2.19-рasm, б). Эриган зонадаги киришма концентрациясини $C_c(x)$ билан белгилаймиз. Зонадаги киришма балансини унинг ҳаракати жараёнида кўриб чиқамиз.

Агар зона dx масофага силжиса, унда кристаллнинг ўсиш фронтидан эритмага қуйидаги миқдордаги киришма сиқиб чиқарилади:

$$dM_c = (1 - K)C_c s dx \quad (2.35)$$

Зонанинг иккинчи чеккасида, бошланғич қуйманинг қатлами эриган жойда, зонага қуйидаги миқдордаги киришма кириб боради:

$$dM'_c = C^0 s dx \quad (2.36)$$

Кристалланиш фронтида эритмага фақат киришма сиқиб чиқарилади, шу вақтнинг ўзида эса эриш фронтидан эритмага киришма билан бир қаторда $s dx$ ҳажмли тоза материал ҳам кириб келади. Зонадаги киришма миқдорининг умумий ўзгариши қуйидагига тенг бўлади:

$$dM_c^* = [C^0 - C_c(x)] s dx \quad (2.37)$$

Эриган зонада киришма концентрациясининг зона dx масофага силжигандаги ўзгариши қуйидагича бўлади:

$$dC_s = \frac{dM_s + dM'_s}{l_s} = \frac{(1-K)C_s + (C^0 - C_s)dx}{l_s} = -\frac{KC_s + C^0}{l} dx. \quad (2.38)$$

(2.38) ни ечиш учун бошлангич шартни аниқлаймиз. Бошлангич қуймада киришманинг бир хил тақсимланганлигидан ва тўлиқ аралашув шартидан (2.25) келиб чиқиб, бошлангич зонадаги киришма концентрацияси қуйидагига тенг бўлади:

$$C_s = (0) = \frac{1}{l} \int_0^l C^0(x) dx = C^0 \quad (2.39)$$

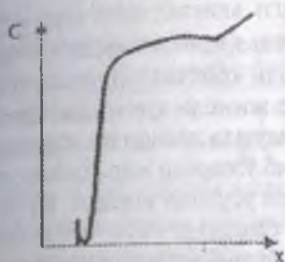
(2.39)ни ҳисобга олган ҳолда (2.38) ни интеграллаймиз:

$$C_s(x) = C^0 [1 - (1-K)e^{-Kx/l}] \quad (2.40)$$

(2.40) формула кристаллнинг $x=0$ дан $x=L-l$ қисмигача тўғридир. Ҳақиқатан ҳам, зонанинг кристалланиш чегараси $x=L-l$ нуқтага етиб келгандан сўнг эриш чегарасидан ҳар қандай материалнинг кириб келиши тўхтади ва зонанинг бундан кейинги ҳаракати натижасида эритманинг ҳажми қамайиб боради. Шундай қилиб, $x=L-l$ нуқтадан бошлаб эритманинг кристалланиши нормал йўналишли кристаллаш схемаси бўйича бўлади ва охириги участкада киришманинг тақсимланиши (2.33) ифода билан аниқланади. Бу ерда C^0 сифатида (2.40) дан аниқланадиган $C_s(L-l)$ катталиқ олинади.

Бир жинсли легирланган монокристаллар олиш усуллари. Маълумки, ярим ўтказгичли ва диэлектрик материаллар кристалларининг электрофизик хоссалари улар таркибидаги киришмаларнинг концентрациялари билан аниқланади. Айниқса, легирланган монокристаллар асосида тайёрланадиган асбобларнинг параметрлари стабил ва қайтарилиувчан бўлиши учун улардаги легирловчи киришмаларнинг тақсимоли бир жинсли бўлиши катта аҳамиятга эга.

Ўсаётган кристалларда киришмаларнинг узунлик ва қўндаланг кесим бўйича нотекис тақсимланишининг ҳосил бўлишига кўп омиллар сабаб бўлади. Нотекис тақсимолилар уларнинг ҳосил бўлиш сабабларига кўра иккига бўлинади: фундаментал ва технологик. Фундаментал нотекис тақсимолилар кўп компонентли тизимларда фаза ўзгаришларининг асосий қонуналаридан келиб чиққан ҳолда ўсаётган кристалл таркибининг



2.20-расм. Ўстирилган кристаллдаги киришма концентрациясининг узунлик бўйича макронотекисларнинг микроно-текислар билан биргаликдаги йиғинди тақсимо-ти.

қонуний ўзгаришлари билан боғлиқдир. Бундай қонуний нотекис тақси-мот ўстирилган кристаллнинг ҳамма ҳаж-мини эгаллайди ва кўпинча уни ўзгармас таркибнинг сегрегаци-яли бузилиши ҳам дейилади. Кристаллнинг ўсиши жараёнида таркиб тақсимотининг бундай қонуний бузилишига но-қонуний характерга эга

бўлган технологик нотекис тақсимо-т ҳам қўшилади (2.20-расм).

Бундай нотекис тақсимо-тлар амалда қўлланилаётган тех-нологик жараён ва аппаратураларнинг мукамал эмаслиги ва кристалл ўсиш шароити барқарорлигининг бузилиши на-тижасида юз беради. Бундай ножинслиликлар кристаллнинг унча катта бўлмаган ҳажмини эгаллайди ва шу сабабли улар-ни локал ножинслиликлар ҳам дейишади. Ярим ўтказгич ва диэлектрикларнинг монокристалларини ўстириш учун тех-нологик аппаратларнинг конструкцияси ва ишлаб чиқарили-шининг замонавий босқичи кристаллар таркибида технологик сабаблар натижасида ҳосил бўладиган ножинслиликларни ми-нимумга келтириш имкониятини беради. Лекин кристалларнинг ўсиш жараёнида фундаментал сабаблар натижасида ножинслиликлар жуда кўп ҳосил бўлади. Шунинг учун таркиби ва ҳоссалари бир жинсли бўлган кристаллар олишда асосий ва-зифа фундаментал ножинслиликларга қарши кураш усулларини яратишдир, чунки технологик ножинслиликларга қарши ўлароқ уларни аппарат ва жараёнларни мукамаллашти-риш йўллари билан камайтириб бўлмайди, шу сабабли улар билан курашиш учун махсус усуллар ишлаб чиқишга тўғри келади. Энди мана шу усулларнинг асосийлари билан танишамиз.

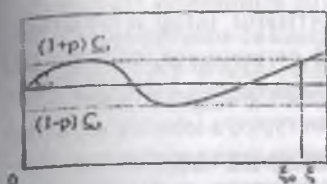
Кристаллар таркибини текислашнинг сегрегацияли усул-лари. Ҳосил қилинаётган кристаллар таркибини текислаш-нинг сегрегацияли усуллари иккига: пассив ва актив усул-ларга бўлинади. Пассив усулда киришмалар тақсимотининг

берилган бир жинслиги асосидаги монокристаллар кристаллаш жараёнига бирорта ўзгариш киритилмасдан олинди, яъни эритмадан олдий йўналишли кристаллаш усули билан ўстирилган монокристаллнинг бир жинсли қисмидан фойдаланилади. Актив усулларга ўсиш вақтида легирлаш жараёнига актив таъсир кўрсатадиган ва таркиб ўзгариш жараёнини прогаммалаш имкониятини берадиган усуллар киради. Бу усулларнинг эффективлигини қиёсий баҳолаш учун ўлчов (критерий) киритилади. Бундай ўлчов бўлиб жараён чиқиши ёки яроқли материалнинг чиқиши деб аталадиган катталиқ ҳисобланади. Бунда чиқиш деб, хоссалари кейинчалик фойдаланиш имкониятини берадиган модда миқдори қисмининг технологик қайта ишлов берилган умумий қисмига нисбати тушунилади. Жараён чиқиши миқдорий жиҳатдан ҳажмий ёки массали бирликларда ифодаланади. Жараён чиқишининг катталиги кристаллдан фойдаланиш шартлари белгилайдиган талабларга боғлиқ бўлади. Талаблар кристаллдаги легирловчи киришманинг концентрацияси C_x талаб қилинган C_x қийматдан таркибнинг мумкин бўлган оғиши деб аталадиган ва нисбий бирликда ифодаланадиган p катталиққа фарқ қилиниши билан белгиланади. Кристалланишнинг бирор бир жараёни натижасида олинган кристаллдаги таркиб тақсимотини $C_x = f(\xi)$ кўринишдаги боғланиш билан ифодалаш мумкин. Бунда ξ жараёнини характерлайдиган умумлашган координатани белгилайди. Бериладиган катталиқ p кристалл бўйлаб $C_x = f(\xi)$ нинг мумкин бўлган тебранишининг чегараларини аниқлайди ва бу чегараларда $C_x = f(\xi)$ C_x дан катта ҳам, кичик ҳам бўлиши мумкин (2.21-расм).

ξ_0 нуқтада кристаллнинг фойдаланишга яроқли бўлиши учун унинг бу нуқтадаги таркиби қуйидаги тенгсизликни қаноатлантириши зарур:

$$\left| \frac{C_x(\xi_0) - C_x}{C_x} \right| \leq p \quad (2.41)$$

Концентрация графигида (2.21-расм) (2.41) тенгсизликни қаноатлантирувчи $C_x(\xi_0)$ нинг катталиги мумкин бўлган четланиш соҳасини чегараловчи чизиқлар оралигида ётади, яъни фойдаланишга яроқли монокристаллдаги киришма концентрацияси



2.21-расм. Мумкин бўлган четланиш қиймати бўйича яроқли кристаллнинг чиқишини аниқлаш.

сталлнинг қанча қисми яроқли эканлигини ёки берилган мумкин бўлган четланиш p учун жараён чиқишининг катталигини топамиз:

$$r_p = V_p / V \quad (2.43)$$

Таркибни текислашнинг пассив усуллари. Яримўтказгич ва диэлектрикларнинг бир жинсли кристалларини олишнинг осон усули бу ҳеч қандай ўзгаришсиз оддий кристаллаш жараёнлари: нормал йўналишли совутиш (Брижмен, Чохральский ва бошқа усуллар) ва зонали эритишлардан фойдаланишдир. Бунда юқорида айтилгандек кристаллнинг киришмалар тахминан бир текис тақсимланган қисмидан фойдаланилади. Бу жараёнлардаги киришмалар тақсимот эгри чизикларининг таҳлили шуни кўрсатдики, бундай бир текис қисм ўстирилган кристаллнинг ё бош қисмида, ё охириги қисмида ҳосил бўлар экан. Шу сабабли мана шу қисмлардан фойдаланиш мақсадга мувофиқдир.

Кристалл таркибини текислашнинг актив усуллари. Бу усуллар киришмалар тақсимотининг бир хиллигини узунлик бўйича ошириш учун хизмат қилади ва пассив усуллардан фарқли ўлароқ кристалланиш жараёнининг давомида маълум дастур асосида унга ўзгаришлар киритилиб турилади. Таркиб текислашнинг актив усуллари икки асосий гуруҳга бўлиш мумкин.

Биринчи гуруҳга монокристалл ўстириш жараёни давомида эритмадаги киришма концентрациясини бир

$$(1+p)C_x \geq (1-p)C_x \quad (2.42)$$

интервалда жойлашади.

Агар (2.41) тенгсизлик бажариладиган кристаллнинг ҳажми V_p ни жараёнда қатнашаётган материалнинг барча ҳажми V га бўлсак, яроқли монокри-

хил ушлаб туриш мақсадида эритмани (агар $K < 1$ бўлса) тоза ҳолдаги, ёки (агар $K > 1$ бўлса) легирловчи киришмали ҳолдаги қаттиқ, суюқ ёки бугли фаза билан озиқлантириб турадиган усуллар киради. Иккинчи гуруҳга монокристаллар ўсиш шароитини ўзгартириб турадиган усуллар киради. Бунда кристалланиш жараёнини ўзгартириш дастури, монокристаллар ўстириш жараёни давомида киришмаларни эгаллаб олиш тезлигининг ўзгармаслигини таъминлайди.

Кристаллар таркибининг технологик ножинслиликлари ва уларни камаййтириш усуллари. Ўстирилаётган кристаллар таркибининг бу турдаги ножинслиликларининг ҳосил бўлишига фойдаланаётган технологик жараёнларнинг ва қурилмаларнинг мукамал эмаслиги сабаб бўлади. Буларга вақт бўйича печь температурасининг назоратсиз тебранишлари, эритма аралашishi шароитининг бир хил бўлмаслигини юзага келтирувчи қурилма механик қисмларининг ҳаракат тезлигининг нобарқарорлиги ва бошқалар киради.

Жараён ва қурилмаларнинг бу номукамалликлари кристаллнинг узунлиги ва қўндаланг кесими бўйича таркибининг хаотик локал тебранишларини ҳосил қилади. Қуйида кристаллардаги ножинслиликларга сабаб бўладиган асосий омилларни кўриб чиқамиз.

Бу омилларнинг асосийларидан биттаси кристалланиш фронтига тегиб турадиган эритмадаги суюқлик оқимининг нотекис тақсимланишидир. Бунинг натижасида эритмадаги диффузион δ қатламнинг қалинлиги кристалланиш фронти сиртининг ҳар хил нуқталарида ҳар хил бўлиб қолади. Бу эса ўсаётган кристаллнинг кесим юзасида киришманин нотекис тақсимланишига олиб келади.

Амалда δ - қатлам қалинлигининг нотекислигини камайтириш мақсадида бир вақтнинг ўзида тигел ва кристаллни қарама-қарши томонларга айлантирилади. Тажрибаларнинг кўрсатишича, кристаллнинг бир жинслигини ошириш учун кристалл максимал, тигел минимал тезлик билан айлантирилиши керак экан.

Электр ўтказувчан эритмада суюқлик оқимини кучсизлантириш ва мос ҳолда ўсаётган кристаллдаги киришманинг ножинсли тақсимотини йўқотиш мақсадида эритмати

тигел магнит майдонига жойлаштирилади. Бу эса ўтказувчан эритма ҳаракатини секинлаштиради.

2.10.3. ГАЗ ФАЗАСИДАН ЎСТИРИШ ЖАРАЁНИ ДАВОМИДА КРИСТАЛЛАРНИ ЛЕГИРЛАШ

Кристалларни легирлашда қўлланиладиган усул уларни газ фазасидан қандай усул билан ўстириляётганлиги билан аниқланади. Газ фазасидан кимёвий ўтқазуш билан кристаллар ўстиришда берилган таркибли легирловчи бугли газ аралашмасини ҳосил қилиш усулига мос ҳолда легирлашнинг қуйидаги асосий усуллари фарқ қилинади:

1. Суюқ легирлаш усули (ёки суюқ лигатур).
2. Индивидуал легирловчи бирикмалар усули.
3. Газразрядли усул.

Суюқ легирлаш усулида легирловчи киришманинг манбаи бўлиб ўтқазилаётган асосий элементнинг суюқ манбаидаги шу киришманинг суюқ бирикмасининг суялтирилган эритмаси ҳисобланади. Масалан, кремнийни SiCl_4 бугларидан ўтқазушда кристаллни фосфор билан легирлашда тоза суюқ SiCl_4 га аниқ нисбатда ишчи ҳолатда суюқ бўлган фосфор галогениди PCl_3 қўшилади. Бу усулда асосан 25°C да бугларининг эластиклиги $600\text{--}27000$ Па бўлган суюқ лигатурлардан фойдаланилади. Одатда кристаллардаги талаб қилинган киришмаларнинг концентрациялари нисбатан катта бўлмаганлиги сабабли кўп марта суялтирилган ва киришмаларнинг нисбий миқдори 10^{-4} дан 10^{-2} гача бўлган эритмалардан фойдаланилади. Булар легирлаш сатҳини 10^{20} дан 10^{25} $\text{ат}/\text{м}^3$ гача бўлишини таъминлайди. Суюқ фаздаги киришма компонентининг концентрациясини аниқ ҳисоблаш қийинлиги сабабли берилган солиштирма қаршиликли кристалл олиш учун амалда тажриба йўли билан топилган қуйидаги нисбатдан фойдаланилади:

$$C_k = A P_{\text{кир}} / P_{\text{асос}}, \quad (2.44)$$

бу ерда, C_k — кристаллдаги берилган киришма концентрацияси; A — ўзгармас сон; $P_{\text{кир}} / P_{\text{асос}}$ — киришма ($P_{\text{кир}}$) ва асос ($P_{\text{асос}}$) компоненти бугларининг парциал босимлари нисбати. Фосфор билан легирланган кремнийнинг эпитаксиал қатламларини ўстиришда бу нисбат қуйидаги кўринишга эга бўлади (м^3):

$$C_k = 2,6 \cdot 10^4 (P_{\text{PCl}} / P_{\text{SiCl}}). \quad (2.45)$$

Киришма бирикмаси ва унинг асослари учувчанлигининг ҳар хиллиги туфайли вақт ўтиши билан уларнинг нисбати ўзгариши мумкин. Шу сабабли газ фазали киришма таркибини сақлаш мақсадида уни асосий компонент билан қўшимча таъминлаб туриш учун асосий буғлантиргич олдиға суюқ лигатурали буғлантиргич ўрнатилади. Агар асосий компонентнинг учувчанлиги киришманинг учувчанлигидан катта бўлса, унда компенсацияловчи буғлантиргичнинг температураси асосий буғлантиргичнинг температурасидан паст бўлиши керак. Мана шундай шароитда асосий легирловчи компонентнинг сарфланиши билан кристаллнинг солиштирма қаршилиги ўзгармайди.

Суюқ легирлаш усули кремнийнинг фосфор, мышьяк ёки борнинг концентрациялари $10^{20} - 10^{25}$ ат/м³ бўлган бир жинсли эпитаксиал қатламларини; сурьма билан легирлаганда эса легирлаш сатҳи $5 \cdot 10^{24}$ ат/м³ дан ошмайдиган эпитаксиал қатламларини олиш имкониятини беради.

Бу усулга қараганда индивидуал учувчи бирикмалар усулида легирлаш жараёнини анча яхшироқ бошқариш мумкин. Бунда киришмали бирикма оқими алоҳида олиниб, у кристалл ўсадиган зона олдида таъсирланувчи газларнинг асосий оқими билан аралашади. Берилган концентрацияли киришма бирикмаси суюқ киришмали бирикма ёки газсимон бирикмалар (ишчи шароитда) фосфин PH_3 , арсин AsH_3 , диборан B_2H_6 , учлоридли бор BCl_3 , стибин SbH_3 кабилар бўлган алоҳида буғлантиргич орқали транспортловчи газ ўтказиш билан шакллантирилади. Кўпинча кристалларни легирлаш учун газсимон киришмали бирикма сифатида киришмаларнинг гидридларидан фойдаланилади. Бу бирикмалар аппаратураларни камроқ ифлослантиради. Легирлаш қулайроқ бўлиши ва заҳарланиш ҳавфини камайтириш учун амалда бу бирикмаларнинг водород ёки инерт газлари билан кучли суюлтирилган, 10^{-4} - 10^{-3} % гидридли тайёр аралашмасидан фойдаланилади.

Бу усулнинг камчилиги шундаки, бунда жуда кичик миқдордаги газсимон моддаларни аниқ ўлчаш кераклигидадир. Масалан, кичик концентрацияли кристалларни олиш учун кўпинча икки ва уч боқичли суюлтириш талаб қилинади. Бундан ташқари пўлат баллонларда сақланган киришмаларнинг гидридлари вақт ўтиши билан секин аста парчаланadi. Бу эса легирлаш жараёнини бошқаришни қийинлаштиради. Бундай камчиликни кристалл ўстирилади-

ган курилма олдидаги легирловчи газли аралашма ҳосил қиладиган камераси бўлган легирлаш усулларида йўқотиш мумкин. Ярим ўтказгичлар технологиясида қўлланилаётган бундай усуллардан бири газоразрядли легирлаш усулидир. Бу усулнинг моҳиятини кремнийнинг легирланган эпитаксиал қатламларини ҳосил қилиш мисолида кўриб чиқамиз.

Кремнийнинг эпитаксиал қатламлари ўстириладиган реакторга газ магистралларининг биттасидан водород ва тетрагидрид кремний берилади, бошқасидан эса газоразрядли камерадан ўтган водород берилади. Камерага III ва V гуруҳ элементлари материалларидан тайёрланган электродлар жойлаштирилган бўлади. Электрод материаллари электр ўтказувчан, юқори даражада бир жинсли ҳамда ишчи температурада юқори бўлмаган буг босимида эга бўлиши керак. Кремнийнинг ковалент электр ўтказувчанликка эга булган эпитаксиал қатламларини ҳосил қилиш учун LaB_6 , B_4C , AlB_2 бирикмаларидан тайёрланган электродлардан фойдаланилади; электронли эпитаксиал қатламларни ҳосил қилиш учун эса сурма, 0,1% фосфорли кремний қотишмаси ёки 1%ли мишьякли сурма қотишмаси каби электродлардан фойдаланилади. Электродлар оралиғига юқори кучланиш берилганда газли разряд ҳосил бўлади. Натижада электродлардаги бирикма асосида учувчан легирловчи бирикма ҳосил бўлади. Легирлаш жарасени қуйидаги параметрлар ёрдамида бошқарилади: 1) разряд камерасидан оқиб ўтаётган газнинг тезлиги; 2) разрядни қўллаб турувчи кучланиш катталигини аниқлайдиган электродлар оралиғи масофаси; 3) разряд турини (биқсима, учқунли, ёй) белгиловчи электродларга бериладиган қувват; 4) импульсли кучланишдан фойдаланилганда импульслар кетма кетлиги частотаси; 5) электродлар материали.

Одатда электродлар оралиғи L 10 мм. гача танлаб олинади; бунда газ разрядини уйғотиш учун керак бўладиган кучланиш 2-15 кВ ни ташкил қилади; кучланиш генераторининг қуввати бир неча ваттгача бўлади.

III БОБ

ЭЛЕКТРОН АСБОБЛАР ВА ҚУРИЛМАЛАР ИШЛАБ ЧИҚАРИШ ТЕХНОЛОГИЯСИ

3.1. ЭЛЕКТРОН АСБОБЛАР ВА ҚУРИЛМАЛАР ИШЛАБ ЧИҚАРИШДА ТЕХНОЛОГИЯНИНГ РОЛИ

Электрон асбоблар ва қурилмалар ишлаб чиқариш технологиясининг вазифаси замонавий микроэлектрон аппаратуралар яратиш учун керак бўладиган асосий базавий элементлар ишлаб чиқариш ҳисобланади.

Электроника - фан ва техниканинг электрон ва бошқа зарядли заррачаларнинг электромагнит майдон билан вакуумда, газли муҳитда, қаттиқ жисмда ҳамда кристалл панжа-радаги атом ва молекула ичидаги ўзаро таъсирлашув ходиса-ларини ўрганадиган соҳасидир. Электрониканинг амалий ва-зифаси қуйидаги усулларни ишлаб чиқиш ҳисобланади:

- электромагнит энергиясини ўзгартириш учун шу ўзаро таъсирлашувдан фойдаланадиган электрон асбобларни яра-тиш усуллари;

- электрон асбоб ва қурилмаларни ишлаб чиқариш тех-нологиясининг илмий асослари.

Электроника ривожланишнинг бир нечта босқичларини босиб ўтди, бу вақт ичида элементлар базасининг бир нечта авлодлари бир-бирини алмаштирди:

1. Электрон вакуумли асбобларнинг дискрет (узлукли) электроникаси.

2. Яримўтказгичли асбобларнинг дискрет электроникаси.

3. Микросхемаларнинг интеграл электроникаси (мик-роэлектроника).

4. Функционал микроэлектрон қурилмаларнинг интег-рал электроникаси (функционал микроэлектроника).

Биринчи авлоднинг элемент базаси (электрон вакуумли ас-бобларнинг дискрет электроникаси) биринчи жаҳон уруши арафасида бирламчи электрон вакуумли асбоблар — аввалига икки, кейинчалик уч электродли электрон лампаларнинг яра-тилиши билан пайдо бўлди. Биринчи жаҳон урушидан кейин лампали электрон техника катта суръатлар билан ривожланди.

Биринчи авлод қурилмаларида актив ва passив электрра-диоэлементлар (резисторлар, конденсаторлар, индуктивлик ғалтаклари, трансформаторлар, улагичлар ва ҳоказолар) па-

нелга механик бириктирилар ва симли ўтказгичлар ёрдамида ўзаро электр улаш учун кавшарланар ёки пайвандланар эди. Кейинчалик ишлаб чиқилган босма ўтказгичли платалар қурилмалар ишончлилигининг кескин ошишини ва параметрларнинг қайтарилувчанлигини таъминлади, ҳамда ишлаб чиқаришни автоматлаштиришни нисбатан осонлаштирди. Шунга қарамасдан, электрон вакуумли асбоблар технологиясининг мураккаблиги, хизмат қилиш муддатининг камлиги, ташқи ўлчам ва массасининг катталиги, электр энергияни қўп талаб қилиши электроника иккинчи авлодининг пайдо бўлишига сабаб бўлди.

Ярим ўтказгичларни физикавий тадқиқ қилиш XIX асрда бошланган бўлсада, иккинчи авлодининг элемент базаси (ярим ўтказгичли асбобларнинг дискрет электроникаси), шу билан бир қаторда ярим ўтказгичлар технологияси транзистор (инглизча *transresistance* сўзидан олинган бўлиб - *ўтиш қаршилиги* маъносини беради) пайдо бўлгандан кейингина яратилди. Биринчи нуқтали ўтишли транзистор германий асосида америкалик олимлар Д. Бардин, У. Браттейн, У. Шокли томонидан 1947 йил 23 декабрда кашф қилинган эди. Биринчи ясси p-n-p структурали транзистор 1950 йилда германий қуймасини эритмадан тортиш усули билан тайёрланди. 1953 йилда эритиб қотириш усули ёрдамида нисбатан юпқа базали (5 мкм атрофида) қотишмали транзисторлар тайёрланди. Ярим ўтказгичли асбобсозлик ривожланишининг биринчи босқичида асосан германийдан фойдаланилди, чунки унинг монокристалларини олиш кремний монокристалларини олишга қараганда анча содда эди ва бунда юқори температурали қурилмалар ва ўта чуқур тозалаш талаб қилинмасди. Биринчи ўстирилган p-n ўтишли кремнийли транзисторлар 1954 йилда пайдо бўлди. Бундан кейинги йилларда диффузия усули ёрдамида структуралар ҳосил қилиш интенсив равишда ишлаб чиқиля бошланди ва 1958 йилда мезаструктурали диффузион транзисторлар яратилди. Мега деб аталишига сабаб мезаструктуранинг кўндаланг кесими текис қирни (испанча *mesa* - плато) эслатади. 1959 йилда планар (инглизча *planar* - текис) жараённинг пайдо бўлиши кейинги қадам бўлди. Кремний пластина сиртида изоляцияловчи кремний диоксидининг ўстирилиши ва унда фотолиитографик жараёндан фойдаланиб берилган конфигу-

рацияли топологик расмнинг ҳосил қилиниши асбоблардаги элементлар структурасининг ўлчамларини ўта аниқлик билан назорат қилиш имкониятини берди. Планар технология кўп йиллар давомига ярим ўтказгичли асбоблар (ЯЎА) ва интеграл микросхемалар (ИМС) ишлаб чиқаришда прогрессни таъминлади. Бу билан бир қаторда технологияда асосий усуллардан бири бўлган монокристалл тагликда керакли қалинликдаги ва электрофизик хоссага эга ярим ўтказгичли қатламни эпитаксиал ўстириш жараёни 1960 йилда ишлаб чиқилди. Эпитаксиал технология юпқа базали ва кичик қаршиликли коллекторли, частотаси юқори ва сочилиш қуввати катта бўлган транзисторлар яратиш имкониятини берди.

Майдон транзисторларининг ишлаш принциплари 30-йилларда маълум эди. Сифатли монокристаллларнинг олинishi 1958 йилда p-n ўтишли бошқариладиган майдон транзисторларини тайёрлаш имкониятини берди.

Таркибида ўн ва юз минглаб компонентлари - диодлар, транзисторлар, резисторлар ва бошқалар бўлган электрон қурилмаларни йиғиш муаммолари учинчи авлоднинг элемент базасининг (микросхемаларнинг интеграл электроникаси ёки микроэлектроника), ҳамда ярим ўтказгичли ишлаб чиқаришда янги технологиянинг яратилишига сабаб бўлди. Бу кўплаб дискрет компонентларни бир бири билан улашдан қутулиш имконини берди.

1959 йили германий кристалида мезадиффузион технология ёрдамида биринчи марта триггернинг микросхемаси тайёрланди. 1960 йилда планар технология билан яратилган кремнийли микросхемалар пайдо бўлди.

Кремнийни қайта ишлаш технологиясининг яхшиланиши нарижасида 1962 йилда затвори изоляцияланган майдон транзисторлари яратилди. 1963 йилда эса биринчи марта майдон транзисторли микросхемалар ишлаб чиқилди. МОП транзисторлари (металл - оксид - полупроводник) технологиясининг мукамал эмаслиги уларни 70 - йилларгача кенг қўллаш имкониятини бермади. 60 - йилларнинг ўрталарида саноатда *ион имплантация* усули пайдо бўлди. Бу усул легирлашнинг концентрацияси ва чуқурлигини бошқариш аниқлигини анчага оширди.

70 - йилларнинг бошида ион-плазмали чанглатиш усулидан интенсив фойдалана бошланди, электрон литография

усули ишлаб чиқилди, структураларни суяқ емирғич ва эрит-
гичларни қўлланмасдан қуруқ қайта ишлаш технологияси
пайдо бўлди. Мана шу даврдан бошлаб биполяр асбоблар ва
МОП - транзисторлар базасида яратилган микросхемалар тезлик
билан ривожлана бошлади. Шу вақтнинг ўзида топологик
чизмалар ва фотошаблонларни назорат қилиш учун ЭХМлардан
фойдаланила бошланди. Бу уларнинг сифатли бўлишига сабаб
бўлди, ҳамда микросхемаларни машинали лойиҳалаш
тизимининг яратилишига олиб келди. 70 - йилларнинг охирида
микро-ЭХМлар ёрдамида бошқариладиган автоматлашган
технологик жараёнлар ва қурулмалар пайдо бўлди.

Микросхемалар бажариши керак бўлган вазифаларнинг
мураккаблашуви уларнинг интеграция даражасининг оши-
шига олиб келди. Ҳозирги вақтда интеграциянинг ўта юқори
даражасига эришилдики, энди унинг бундан ҳам ошишига
физик ва технологик чеклашлар йўл қўймайди.

Тўртинчи авлоднинг элемент базаси (функционал мик-
роэлектрон қурилмаларнинг интеграл микроэлектроникаси
ёки функционал микроэлектроника) функционал янада
мураккаб базавий элементларни яратиш йўлларини қиди-
риш натижасида пайдо бўлди. Агар схемотехник электрони-
када баъзи бир схемотехник ячейкаларнинг электр ҳолати
ахборот ташувчи бўлса, функционал микроэлектроникада
эса ахборот ташувчи бўлиб динамик nobиржинслик ҳисоб-
ланади. Бундай локал nobиржинслилик баъзи бир чўзиқ бир
жинсли муҳитдаги номувозанатли ҳолатдан иборат бўлади.
Функционал микроэлектроника маҳсулотларида динамик
nobиржинсликларнинг ўзаро акустик, иссиқлик, электр ва
магнит майдонлари билан биргаликдаги таъсирлардан ахбо-
ротларни қайта ишлаш, яратиш ва сақлаш учун фойдала-
нилади. Функционал микроэлектроника маҳсулотларида дис-
крет электрорадиоэлементларга эквивалент бўлган элемент-
ларни ажратиб олиш қийин ёки мумкин эмас.

Электрониканинг элемент базаси узлуксиз ўсиб боровчи
одимлар билан ривожланмоқда. Юқорида келтирилган ҳар
бир авлод маълум бир даврда пайдо бўлиб, ўзини оқлайди-
ган йўналишларда мукаммаллашиб бормоқда. Электроника
маҳсулотларининг авлоддан авлодга ривожланиши уларнинг
функционал мураккаблашуви, ишончлик ва хизмат қилиш
муддатини ошириш, ташқи ўлчамлари, массаси, таннархи

ва сарфлайдиган энергияни камайтириш, технологияни сод-далаштириш ва электрон қурилманинг параметрларини ях-шилаш йўналишлари бўйича олиб борилмоқда.

XX асрнинг 90-йилларидан бошлаб наноэлектроника ривожланмоқда ва микроэлектрониканинг ўрнини эгалланмоқда.

3.2. ЯРИМ ЎТКАЗГИЧЛИ АСБОБЛАР ВА ИНТЕГРАЛ МИКРОСХЕМАЛАР ИШЛАБ ЧИҚАРИШНИНГ УМУМИЙ ТЕХНОЛОГИК СХЕМАСИ

3.2.1. ЭЛЕКТРОН АСБОБЛАР, ҚУРИЛМАЛАР ВА ИНТЕГРАЛ МИКРОСХЕМАЛАР ИШЛАБ ЧИҚАРИШДА АСОСИЙ ТЕХНОЛОГИК ОПЕРАЦИЯЛАРНИНГ ҚИСҚАЧА ТАВСИФИ

«Технология» атамаси - санъат, усталик, қўлидан иш ке-лишлик тўғрисидаги фан эканлигини билдиради.

Ишлаб чиқариш жараёни корхона ходимлари ҳаракати-нинг мажмуаси бўлиб, бунинг натижасида бошланғич мате-риал ва яримфабрикатлар тайёр маҳсулотларга айланади. У қуйидагиларни ўз ичига олади: ишлаб чиқаришни тайёр-лаш, материал ва яримфабрикатларни сақлаш ва назорат қилиш, энергетик хўжаликнинг хизмати, технологик ва на-зорат-ўлчов аслахалари, маҳсулотларни тайёрлашнинг тех-нологик жараёнлари ва жиҳозлари, якуний назорат ва тайёр маҳсулотларни сотиш.

Технологик жараён ишлаб чиқариш жараёнининг бир қисми бўлиб, у бошланғич материал ва яримфабрикатларни қайта ишлаш билан боғлиқдир. Технологик жараён ўта мурак-каб тизим бўлиб, унинг элементларига технологик ускуналар ва асбоблар ишлаб чиқариш объектлари, бажарувчи ва назорат қилувчи воситалар ҳамда технологик ва конструкторлик хужжатлари киради. Технологик жараённинг боришига қараб, у узлуксиз, дискрет (узлукли), узлуксиз - дискрет бўлади.

Бундан ташқари яқка технологик жараёнлар ҳам бўлиб, буларда кам миқдордаги буюмлар (масалан: уникал микро-схемалар) тайёрланади.

Умумий технологик жараёнда ўзгармас чизмалар бўйича партиялаб буюм тайёрланади. Бу буюмлар маълум қисқа вақт ичида тайёрланса, ишлаб чиқариш *серияли* дейилади. Агар узоқ вақт давомида ишлаб чиқарилса, ишлаб чиқариш *ом-мавий* дейилади.

Операцияли технологик жараён битта технологик операциядан иборат бўлади.

Маршрутли технологик жараёнларда кетма-кетлиги келтирилган бир қанча технологик операциялар натижасида аввал яримфабрикат, охириги босқичда эса тайёр маҳсулот ҳосил бўлади.

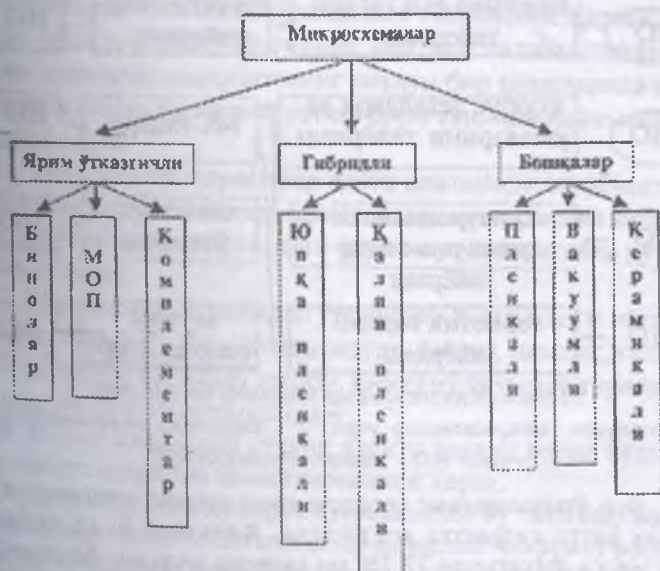
Ҳар қандай интеграл микросхема структурадан, ташқи корпусдан ва йиғиш воситаларидан, ташқи чиқишлар билан бириктирадиган деталлардан ташкил топади.

1. Структура - микросхеманинг функционал асоси ҳисобланади. У ҳамма элементлар, компонент кристаллар, элементларaro боғланишлар ва контакт юзачалардан ташкил топади.

2. Корпус - структурани механик таъсирлардан ҳимоя қилади.

3. Йиғиш воситалари - унга қавшарлагичли қўймалар, чиқиш симлари, чиқиш рамкалари ва бошқалар хиради.

Структураларининг конструктив-технологик тайёрланишига қараб интеграл микросхемалар уч гуруҳга бўлинади (3.1-расм): ярим ўтказгичли, гибридли, бошқа (пленкали, вакуумли, керамикали ва шу бошқалар).



3.1-расм. Микросхемаларнинг таснифи.

Яримўтказгичли микросхемаларда актив ва пассив элементлар ҳамда ҳамма элементлараро боғланишлар яримўтказгичнинг ички ҳажмида ва сиртида тайёрланади.

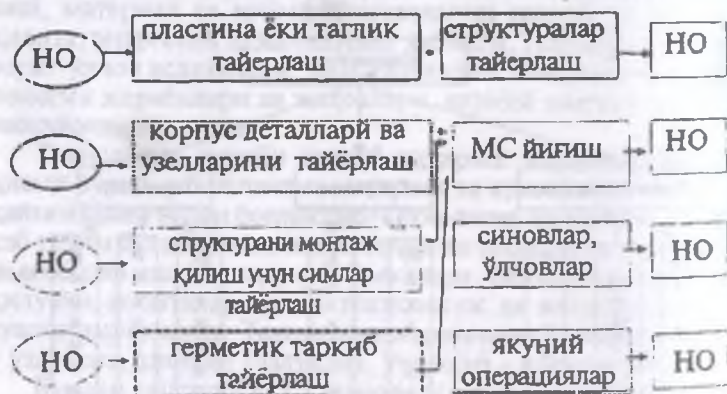
Гибрид микросхемаларда диэлектрик тагликда пассив элементлар плёнка кўринишида тайёрланиб, унга актив элементлар бириктирилади ва умумий корпусга жойлаштирилади.

Бошқазар — пленкали, вакуумли, керамикали. Пленкали микросхемаларда ҳамма элементлар ва элементлараро бирикмалар плёнка кўринишида тайёрланади.

Ҳар қандай микросхемаларни тайёрлаш технологиясида ҳамма микросхемалар учун умумий бўлган қуйидаги асосий босқичларни ажратиб кўрсатиш мумкин (3.2-расм):

Пластина ёки тагликни тайёрлаш ва тозалаш; микросхема структурасини ҳосил қилиш; йиғиш; синаш ва ўлчаш; якуний операциялар.

Пластина ёки тагликлар яримўтказгич ёки диэлектрик материаллардан тайёрланиб, уларда структуралар ҳосил қилинади. ИМС тайёрлашда асосий материал кремний Si ҳисобланади, чунки кремнийнинг таққиданган зонаси германий Ge га қараганда катта бўлиб, ишчи температура интервали



3.2-расм. Микросхемалар тайёрлаш босқичлари:

- корпусли микросхемалар учун. корпуссиз микросхемалар учун. НО - назорат операциялари

кенг, p-n ўтишларнинг тескари токи кичик, тешувчи кучланиш катта қийматга эга бўлади. Кремний Si ер қобиғининг масса жихатидан 27,7% ни ташкил қилади. Микросхемалар тайёрлашда кремнийдан ташқари арсенид галлий

AsGa ва бошқа яримўтказгичли бирикмалар ҳам қўлланилмоқда. Гибрид ва плёнкали микросхемаларда таглик сифатида ситал, фотоситал, керамика, сапфир каби материаллар ишлатилади.

Пластина ва таглик тайёрлаш учун яримўтказгичли ва диэлектрик материаллар механик қайта ишланади ва уларнинг сирти тозланади.

3.2.2. МИКРОСХЕМАЛАР ИШЛАБ ЧИҚАРИШ ЖАРАЁНИГА ҚЎЙИЛАДИГАН ТАЛАБЛАР

Микросхемалар ишлаб чиқариш жараёнига қўйиладиган талаблар *умумий* ва *хусусий* талабларга бўлинади. *Умумий* талабларни қисқача қуйидаги учта ҳолат билан баён қилиш мумкин.

1. Технологик жараён ишончли бўлиши керак.
2. Технологик жараён тежамли бўлиши керак.
3. Технологик жараён ишчилар ва атроф муҳит учун ҳавфсиз бўлиши керак.

Хусусий талаблар микросхемаларнинг конструкциясида асосий ва ёрдамчи материалларнинг технологик ҳолатларидан келиб чиқали.

1. Микросхемалар тайёрлашнинг технологик жараёнлари қайта ишланаётган объектлар микрон силжишларининг юқори даражада аниқлигининг маълум бир ҳолатларида қайл қилишни ҳамда бирининг устига бири тупишини таъминлаб туриши керак.

2. Технологик жараёнлар қайта ишланадиган объектлар (пластиналар, тагликлар, кристаллар, платалар ва бошқалар) манипуляция қилиниши учун махсус воситалар қўлланилиши керак.

3. Технологик жараёнлар ўта юқори тозаликдаги материаллар ва параметрлари (температура, босим, намлик, газларнинг миқдори кабилар) юқори аниқликда ушлаб туриладиган шароитда ўтказилиши шарт.

4. Ишчи хоналарда статик электр заряди ҳосил бўлиши имконияти ниҳоятда камайтирилиши керак.

Технологик жараёнларга қўйиладиган бу талаблар бажарилиши учун комплекс тадбирлар ва ишлаб чиқариш воситаларидан фойдаланилади. Буларнинг асосийлари қуйидагилар:

1. Корхонанинг ишлаб чиқариш фаолиятини қаттиқ регламентация қилиш.

2. Микросхемага норматив техник ҳужжат. Бунга конструкторлик ва технологик ҳужжатлар киради.

Ишлаб чиқаришнинг босқичига боғлиқ ҳолда технологик ҳужжатлар қуйидаги тоифаларга бўлинади:

1. ИМСни тажрибавий ишлаб чиқаришга технологик ҳужжат, бунга О литери берилади.

2. ИМСни серияли ишлаб чиқаришга технологик ҳужжат, бунга А литери берилади.

3. ИМСни оммавий ишлаб чиқаришга технологик ҳужжат, бунга В литери берилади.

Серияли ИМСларда технологик ҳужжатлар комплекти асосий ва ёрдамчи ҳужжатлардан ташкил топади. Асосий ҳужжатларга :

1. Технологик жараённинг маршрут картаси.

2. Технологик жараённинг операцион картаси ва ундаги технологик назорат ва технологик кўрсатмалар киради.

Ёрдамчи ҳужжатларга маршрутли -назорат картаси, стандарт ва ностандарт қурилмалар рўйхати, нормаллашган ва махсус инструментлар рўйхати, таъминланганлик ҳамда тушунтирувчи хабарномалар киради. Технологик жараённинг маршрут картасида тамомланадиган операциялар комплексининг кетма-кетлиги келтирилади. Операция картасида ҳар бир операциянинг қандай бориши келтирилади. Технологик кўрсатмага иш ва технологик жараёнлар баён қилинади.

Маршрут-назорат картаси иш жойида буюмнинг назоратини қайд қилиш учун керак бўладиган асосий ҳужжат ҳисобланади.

Технологик жараёнларнинг ишончлилигини ва микросхемалар сифатини таъминлайдиган асосий ҳолат электрон гигиенасига риоя қилишдир. Электрон гигиенаси микросхема тайёрлаш босқичида ифлосланишни камайтирадиган ёки йўқотадиган усуллар, воситалар ва шарт-шароитлар тизимидир. Ҳаво муҳитининг тозаллиги чангнинг, намлик ва бегона газларнинг борлиги билан тавсифланади. Ишчи хоналарнинг тозаллик синфи 1-8 гача бўлади. 1-синф тозаллигида 1 литр ҳавода чанг умуман бўлмайди. Ҳаво муҳитининг температура ва намлиги технологик жараённинг сифатига ва қайтарилаувчанлигига таъсир қилади.

3.3. ПЛАСТИНА ВА ТАГЛИКЛАРНИ ТАЙЁРЛАШ

3.3.1. ПЛАСТИНА ВА ТАГЛИКЛАРГА ҚЎЙИЛАДИГАН ТАЛАБЛАР

Замонавий микросхемалар тайёрлаш технологияси микросхемалар структураси тайёрланадиган яримўтказгичли пластиналар ва тагликларга ўта юқори талаблар қўяди. Бу талаблар яримўтказгичнинг *электрофизик характеристикаларига, пластинанинг геометрик ўлчамларига ва пластина сиртларининг сифатига* тааллуқлидир.

Пластинанинг *электрофизик характеристикалари* ва унинг *кристаллографик йўналишлари* берилган хоссали микросхема ҳосил бўлишини таъминлаши керак. Бундан келиб чиққан ҳолда лойиҳалаш босқичида керакли кристаллографик йўналиш ва ярим ўтказгичли материалнинг русуми танланади, ҳамда пластина тайёрлаш жараёнида унинг электр физика параметрлари ва кристаллографик йўналиши назорат қилинади.

Пластинанинг *геометрик ўлчамлари* ёки *параметрларига*: диаметри, қалинлиги, асосий ва қўшимча русумловчи кесилишларнинг узунлиги ва жойлашиши, томонларнинг нопараллеллиги (понасимонлик), нотекислик, эгилганлик кабилар кирази.

Пластинанинг *диаметри* ярим ўтказгичли қўйманинг ўлчамлари билан аниқланади. Энг кўп тарқалган ярим ўтказгичларнинг стандарт диаметрлари 60, 76, 100 мм ли бўлади. Катта диаметрли пластиналарда микросхемаларнинг катта миқдордаги кристалларини тайёрлаш мумкин (3.1-жадвал).

3.1-жадвал

Кристаллар миқдорининг кремний пластинаси диаметрига боғлиқлиги

Кристаллнинг ўлчами, мм	Кристаллнинг юзаси, мм ²	Диаметри 76 ёки 100 мм бўлган пластинадаги кристаллар миқдори: (қалинлиги, мкм)	
		76 (450)	100 (600)
1 × 1	1	4214	7598
2 × 2	4	1018	1846
4 × 4	16	236	434
6 × 6	36	95	184

Текислигининг кристаллографик йўналтирилганлиги (ориентацияси) (111) бўлган кремний пластиналарида асосий кесилиш $[110]$, $[011]$, $[101]$ йўналишларда, ориентацияси (100) бўлган пластиналарда $[011]$ йўналишда бажарилади. Диаметри 100 мм бўлган кремний пластиналарида асосий кесилиш узунлиги 30 — 35 мм ни ташкил қилади. Кесилишлар литографик ишлов беришда қурилмага пластинани ориентирланган ҳолатда ўрнатишда керак бўлади. Пластиналарда микросхема структуралари шундай шакллантириладики, бунда кристаллнинг бир томони асосий кесилишга параллел бўлиши керак.

Қўшимча кесилишлар русумловчи ҳам дейилиб, улар ёрдамида ярим ўтказгичли материалнинг маркасини ва кристаллографик ориентациясини аниқлаш мумкин (3.3-расм).



КЭФ-4,5(100)



КДБ-10(111)



ёки



КЭФ-4,5(111)

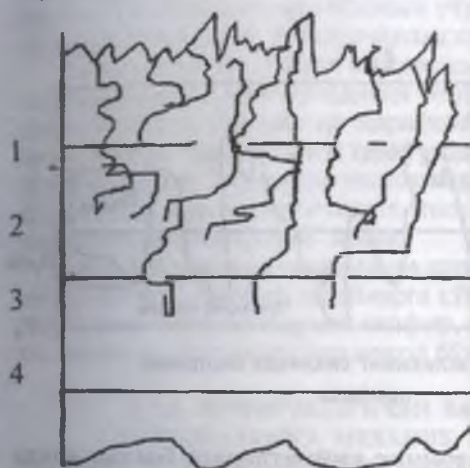


КДБ-10(100)

3.3-расм. Ҳар хил русумли ва кристаллографик ориентирланган кремний пластинасидаги асосий ва қўшимча кесилишлар

Пластина сиртининг сифати: 1) механик бузилган қатламнинг чуқурлиги, 2) ғадир-будурлик ва 3) ифлосликлардан тозаланганлик сифати билан характерланади.

1). Механик бузилган қатлам уч қисмдан ташкил топади (3.4 - расм):



3.4 - расм. Пластина сиртининг механик бузилган қатлами:

- 1 — рельеф қатлам; 2 — ёриқли қатлам;
3 — деформацияланган қатлам;
4 — пластинанинг бузилмаган қатлами.

1 — ташқи рельефли қатлам бўлиб, бу қатлам хаотик жойлашган учликлар, чуқурликлар, ёриқлардан иборат;

2 — ёриқли қатлам бўлиб, бу қатлам яқка ҳолдаги дарзликлар ва ички томонга кетган ёриқлардан иборат;

3 — деформацияланган қатлам бўлиб, дислокацияларнинг тўплами, микро-ёриқларнинг давоми ва улар атрофида жойлашган механик кучланишлардан иборат.

Бузилган қатлам қалинлиги абразив донасининг ўлчамларига пропорционал бўлади ва қуйидаги формула ёрдамида аниқланиши мумкин:

$$F = k\delta \quad (3.1)$$

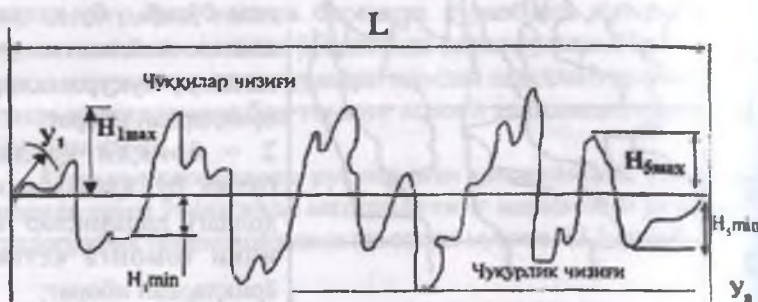
бу ерда, кремний учун $k = 1,7$; германий учун $k = 2,2$; δ - абразив донининг ўлчами.

2). Ғадир-будурлик (3.5 - расм) профиль R_n нинг ўртача арифметик оғиши, яъни L асос узунлиги чегарасидаги профиль оғишлари абсолют қийматларининг ўртача арифметиғи билан

$$R_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (3.2)$$

ёки R_z профил нотекислигининг тахминан ўн нуқтадаги ўртача баландлиги билан баҳоланиши мумкин:

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 H_{i,max} - \sum_{i=1}^5 H_{i,min} \right). \quad (3.3)$$



3.5 - расм. Тагликнинг силлиқли сиртининг профили.

R_z ва R_z параметрларнинг қийматларига боғлиқ ҳолда ишлов берилган сиртнинг сифати мос ҳолда ғадир-будурлик синфи билан баҳоланади. Пластиналар сиртининг силлиқлиги 13-14 синфлардан паст бўлиши керак эмас. Бу баландликлари мос ҳолда 0,1 дан 0,025 мкм гача бўлган микронотекисликларга тўғри келади.

3). Пластиналарни тозалаш сифати қуйидагича баҳоланади: сирт билан механик ва кимёвий боғланган ифлосликларнинг борлиги билан; пластина сиртининг бирлик юзасига тўғри келадиган адсорбцияланган киришма атомлари ва ионлари миқдори билан ёки адсорбцияланган киришма молекулалари моноқатламларининг сони билан. Пластиналарни киришмалар адсорбциясидан тўлиқ ҳимоя қилишнинг иложи йўқлиги сабабли идеал тоза сиртлар олиб бўлмайди. Тоза сирт деганда шундай технологик тоза сирт тушуниладики, унда қолган киришмаларнинг концентрацияси микросхемалар параметрларининг берилган қийматлари такрорланиб ҳосил қилинишига ва уларнинг стабиллигига таъсир қилмаслиги керак.

Гибрид ва плёнкали микросхемаларнинг тагликлари асоснинг плёнкали ва осма элементларини ушлаб турувчи конструкция вазифасини бажарибгина қолмасдан, балки элементлар ва элементлараро бирикмаларда электр изоляцияси

сифатида ҳам ҳизмат қилади. Улар биринчи навбатда яхши изоляция ва механик ҳоссаларга эга бўлишлари керак.

Тагликлар юқори солиштирма қаршиликли, диэлектрик киритувчанлиги ва диэлектрик йўқотишнинг тангенс бурчаги кичик, электр ва механик мустаҳкамлиги юқори бўлган диэлектрик материаллардан тайёрланади. Элементлардан иссиқлик узатиш самарали бўлиши учун тагликнинг материали юқори иссиқлик ўтказувчанликка эга бўлиши керак.

Тагликнинг материали микросхемаларнинг структурасини тайёрлашда керак бўладиган технологик ишловларга чидамли бўлиши, технологик жараённинг ўтказилиш сифатига ёмон таъсир қилмаслиги (вакуумда плёнка ўтказишда газ чиқармаслиги, структура топологиясини шакллантиришда қўлланиладиган емиргичларга инерт бўлиши, иссиқликка чидамлик ва бошқалар) керак.

Бу талабларнинг ҳаммасини қаноатлантирадиган идеал материал йўқ. Асосий талабларга кўпроқ жавоб бера оладиган таглик материалларига сапфир, шиша, ситалл, керамика, поликор, полиимидлар мисол бўлади.

3.3.2. ЯРИМЎТКАЗГИЧЛИ ВА ДИЭЛЕКТРИК МАТЕРИАЛЛАРГА МЕХАНИК ИШЛОВ БЕРИШ

Ярим ўтказгичли материаллар ва монокристалл диэлектрик сапфир механик ишлов берилувчи участкага қуйма кўринишида келади; аморф ва бошқа диэлектрик материаллар (шиша, ситалл, поликор, керамика) — лист ҳолида келади.

Пластина ва тагликларни тайёрлашда механик ишлов бериш абразивлар ёрдамида бажарилади.

Микросхемалар ишлаб чиқаришда фойдаланиладиган *синтетик абразив материалларга*: олмос, кремний карбири, электрокорунд, кремний, хром, цирконий, цеолит оксидлари мисол бўлади.

Абразив материаллар кукун ҳолатда ишлатилади. Абразив кукунлар доналарининг ўлчамларига боғлиқ ҳолда тўртта гуруҳга бўлинади: шлифдонали, шлифкукунли, микрокукунли ва ўта майда кукунли. ИМС ишлаб чиқаришда охириги утасидан фойдаланилади.

Абразив ёки олмосли кукунларни белгилашда материалнинг русуми ва дондорлигининг тартиб рақами ҳисобга олинади. Масалан, ЭБМ14 белгиси — электрокорунд оқ, асосий фракциядаги доналарининг ўлчами 14 мкм дан 10 мкм гача бўлган микрокукун эканлигини, АСМ10/7 белгиси — олмос синтетик, асосий фракциядаги доналарининг ўлчамлари 10 мкм дан 7 мкм гача эканлигини билдиради.

Абразив ишлов беришнинг моҳияти кўпроқ қаттиқ ва камроқ мўрт абразивнинг камроқ қаттиқ ва кўпроқ мўрт материалга механик таъсиридир. Абразив кукунлар эркин ва боғланган ҳолатларда ишлатилади.

Эркин абразивлар ёрламида ишлов беришда абразив кукунларнинг суспензияси ёки пастасидан фойдаланилади.

Боғланган абразивлар билан ишлов беришда диск, доира кўринишдаги, ишчи қисми асосан олмос доналари билан махсус бириктирилган ускуналардан фойдаланилади.

3.3.3. ПЛАСТИНА ВА ТАГЛИКЛАРНИ ТАЙЁРЛАШ МАРШРУТЛАРИ

Кремний пластинасини тайёрлаш маршрути. Ярим ўтказгичли пластиналарни тайёрлашнинг технологик маршрутлари тайёрланадиган микросхемаларнинг, қўлланилаётган ярим ўтказгич ҳоссаларининг ҳар хиллиги туфайли бир биридан фарқ қилиши мумкин. 3.6-расмда кремний пластинасини тайёрлашнинг умумий маршрути келтирилган.



3.6- расм Кремний пластиналарини тайёрлаш умумий маршрутининг схемаси.

Келтирилган маршрутдаги операцияларни санаб, бир неч-
тасининг вазифасини кўрсатиб ўтамиз:

Қўймани емириш унинг сиртини тозалаш ва нуқсонлар-
ни аниқлаш учун ўтказилади.

Калибровка қўймага стандарт пластина диаметрига тенг
булган цилиндр шаклини бериш учун бажарилади.

Ундан кейинги қўймани емириш калибровка жараёнида
кристалл структурасининг бузилган қатламини олиб ташлаш
учун ўтказилади.

Қўйма қиррасини ориентациялаш қўйма қирра текисли-
гининг бош кристаллографик текисликдан ориентация бу-
зилишини (оғиш бурчагини) аниқлаш учун ўтказилади. Мана
шунга асосан қўймани пластиналарга кесишдан олдин у ке-
сувчи асбобга нисбатан оғиш бурчагини ҳисобга олган ҳолда
станокка маҳкамланади.

Асосий қирқим йўналишини ориентациялаш. Асосий
қирқим технологик қурилмаларда пластиналарни бир хил
ориентациялаш учун керак бўлади.

Қўшимча қирқимлар пластиналарнинг аралашиб кетга-
нида бир-биридан ажратиш (сортировка қилиш) учун ке-
рак бўлади.

Кесиш учун станокка қўймани елимлаб маҳкамлаш.

Қўймани пластиналар қилиб кесиш.

Олдинги операцияларда ҳосил бўлган ифлосликларни
йуқотиш учун пластиналарни тозалаш.

Пластиналарни жилвирлаш унинг қалинлигини бир хил
қилиш, пластина томонларининг текислигини ва параллел-
лигини яхшилаш, сиртдаги ғадир-будурликларни камайти-
риш учун ўтказилади.

Пластина ифлосликлардан тозаланади.

Пластина сиртининг чеккасидаги фаскалар (қирралар) олиб
ташланади. Бу структураларни шакллантиришнинг юқори темпе-
ратурали жараёнларида дислокация ва механик кучланишлар-
нинг ҳосил бўлиш эҳтимоллигини камайтиради, яъни нуқсон-
лар зичлиги камайиб яроқли пластиналар чиқиш фойизи ошади.

Механик бузилган сирт қатламини олиб ташлаш учун
пластиналарни емириш ва уларни тозалаш.

Пластиналарни жилолаш. Бу жилвирлаш ва фаскани олиб
ташлашдан кейин сиртга ишлов беришнинг сифатини ва аниқ-

лигини яхшилаш, ойнасимон текис, силлиқлик синфи 14 ва
ундан юқори бўлган сирт ҳосил қилиш учун ўтказилади.

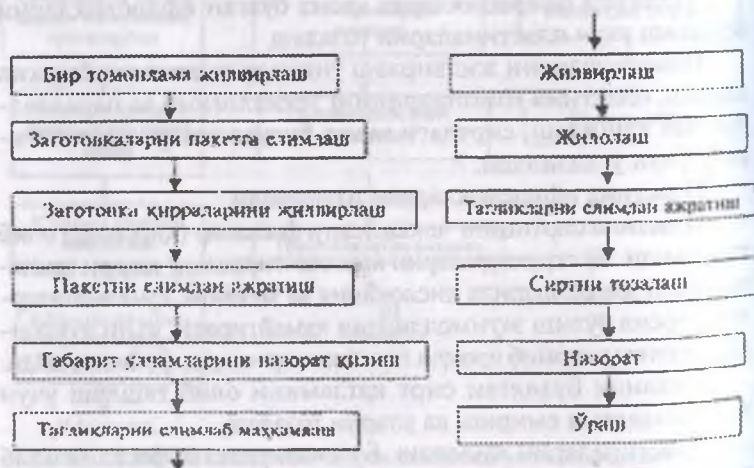
Пластина сиртини тозалащ ва куритиш.

Пластиналарнинг геометрик, электрофизик параметрлари ва сирт сифатининг белгиланган нормаларга мос келишини назорат қилиш.

Пластиналарни сақлаш ва микросхемалар структурасини тайёрлайдиган цехларга ташиш учун ўраш.

3.6-расмдан кўриниб турибдики, кремнийли пластиналарни тайёрлашнинг ҳамма маршрути учта босқичдан ташкил топар экан: биринчи босқич — қўймани механик ишловга тайёрлаш ва уни пластиналарга кесиш; иккинчи босқич — пластиналарга бошланғич ишлов бериш (жилвирлаш ва фаскаларни олиб ташлаш); учинчи босқич — пластиналарга охириги ишлов бериш (жилолаш). Босқичларнинг ҳар бири пластиналарнинг назорати билан якунланади.

Шиша, ситал ва керамикали тагликларни тайёрлаш маршрутлари. Бу материалларнинг ҳаммаси ҳаммаси структуравий тузилишига биноан кристаллографик ориентация талаб қилмайди. Бундан ташқари улар асосан лист ҳолатда тайёрланадиганлиги сабабли улардан таглик тайёрлаш жараёнлари анча соддалашади.



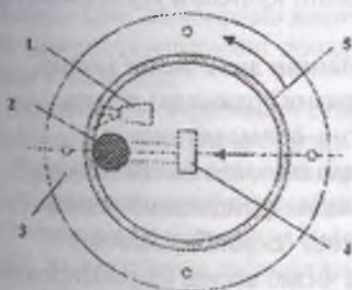
Мисол тариқасида 3.7-расмда ситаллдан тагликлар тайёрлаш маршрути схемаси келтирилган.

3.3.4. ПЛАСТИНА ВА ТАГЛИКЛАРГА МЕХАНИК ИШЛОВ БЕРИШ

Яримўтказгичли материалларга механик қайта ишлов беришда уларнинг ўта мўртлиги сабабли токарлик, фрезерлик, йўнувчи ёки бурғулаб тешувчи станоклардан фойдаланиб бўлмайди. Шу сабабли механик қайта ишлов беришда боғланган ҳолатдаги (олмосли диск ва жилвирлагичлар) ва эркин ҳолатдаги (абразивли суспензия ва олмосли пасталар) абразивлардан фойдаланилади.

Яримўтказгичли қуймаларни пластина қилиб кесиш. Механик қайта ишлов беришнинг биринчи босқичи бўлган бу жараёнда монокристалл қуйма қалинлиги 250-600 мкм, томонлари параллел бўлган пластиналарга бўлинади. Монокристалл қуймаларни пластиналарга кесиш учун асосан икки усулдан фойдаланилади:

1. Ички қирраси олмосли кесувчи диск билан кесиш.
2. Абразивдан фойдаланиб металл сим қирқгич билан кесиш.



3.8-расм. Ички олмосли кесувчи диск билан кесиш жараёни схемаси:
1- совитувчи суюқтик бериб турувчи қурилма; 2- қуйма; 3- дискнинг асоси;
4- қуйма маҳкамланган ушлагич;
5- дискнинг кесувчи олмосли қирраси.

Биринчи усулдан ишлаб чиқариш корхоналарида кенг фойдаланилади. Иккинчи усул билан эса лаборатория шароитида фойдаланилади.

Ички қирраси олмосли кесувчи диск билан кесишнинг моҳияти қуйидагича (3.8-расм). Станокнинг шпинделига олмосли диск махсус болтлар ёрдамида маҳкамланади. Шпиндел ковагининг ичига яримўтказгичли

қуйма елимланган ушлагич жойлаштирилади. Станок ишга туширилганда олмос диск маҳкамланган шпиндел айлана бошлайди. Қуймали ушлагич горизонтал ёки вертикал йуналишда олмосли дискка томон ҳаракатлантирилади ва унга секин аста теккизилади. Теккизилган жойга совитувчи суюқлик узлуксиз равишда бериб турилади ва шу билан кесиш жараёни бошланади.

Кремний қуймасини кесишда қуйидаги тартиб (режим) таклиф қилинади: дискнинг айланиш частотаси 4000 — 5000 айл/мин, қуймани узатиб туриш тезлиги — 30 — 60 мм/мин, совитувчи суюқлик 3 л/мин атрофида бериб турилади.

Бу усулнинг устуңлиги қуйидагича: кесиш тезлиги юқори (40 мм/мин гача), яхши сифатли ишлов берилган сирт (силлиқликнинг 8-синфи), пластинанинг қалинлиги бўйича кам фарқланиши (± 20 мкм), чиқиндининг камлиги.

Пластиналар назоратдан сўнг жиявирлашга берилади.

Ярим ўтказгичли пластиналарни элементларга (кристаллчаларга) ажратиб кесиш. Пластинани майда кристалларга, яъни элементларга ажратиш технологик циклнинг охирида, йиғиш операциясидан олдин амалга оширилади. Кристаллчаларга ажратиш учун кесишнинг қуйидаги усулларидан фойдаланилади.

1. Ташқи қирраси олмосланган диск билан кесиш.
2. Металл сим билан (абразив ёрдамида) кесиш.
3. Олмосли металл полотно ёрдамида кесиш.
4. Абразив ёрдамида металл полотно билан кесиш.
5. Ультратовушли қурилмадан фойдаланиб кесиш.
6. Олмос билан чизиб кесиш (скрайбирование).
7. Электрон нур ёрдамида чизиб кесиш (скрайбирование).
8. Лазер нур ёрдамида чизиб кесиш (скрайбирование).

Бу усуллардан энг кўп қўлланиладигани олмос билан чизиб кесиш бўлиб, унинг ёрдамида пластина квадрат ва тўғри тўртбурчак шаклдаги кристаллчаларга бўлинади.

Доира ёки мураккаб геометрик шаклли элементларни ҳосил қилишда пластина ультратовушли қурилмадан фойдаланиб кесилади.

Яримўтказгичли пластиналарни жилвирлаш. Кесиш жараёнидан кейин пластинанинг сиртида 100 мкм атрофида механик бузилган қатлам ҳосил бўлади (3.4-расм). Бузилган қатлам жилвирлаш жараёнида олиб ташланади. Бунда чуян, шиша, пўлат, мис ёки латундан қилинган жилвирловчи дисклардан фойдаланилади. Жилвирлаш учун доналари М14 дан М5 гача бўлган абразив микрокукундан фойдаланилади.

Жилвирлаш натижасида 9 - 12 синфдаги тоза сирт ҳосил қилинади. Технологиянинг турига қараб жилвирлаш бошланғич ва якуний, конструктив белги бўйича бир томонлама ва икки томонлама жилвирлашга бўлинади. Бошланғич жилвирлашда М14 - М10, якуний жилвирлашда М7-М5 микрокукундан фойдаланилади.

Саноат ишлаб чиқаришида кўпинча кремний пластиналарига унумдорлиги юқори бўлган эркин абразив билан икки томонлама жилвирлаш усули қўлланилади. Эркин абразив ёрдамида икки томонлама жилвирлаш жараёни махсус станокларда, масалан СДШ-150 да бажарилади.

Икки томонлама жилвирлашда дондорлиги М14 дан М5 гача бўлган яшил кремний карбиди ёки оқ электрокорунди микрокукунларининг сувли ва глицеринли суспензиясидан фойдаланилади. Бунда қаттиқ ва суюқ компоненталарнинг нисбати $Q:C=1:3$ га тенг бўлиши керак. Юқорида айтиб ўтганимиздек, жилвирлаш жараёни бир неча босқичда, секин-аста микрокукунларнинг дондорлигини камайтириб бориш билан ўтказилади.

Жилвирлаш жараёнидан сўнг пластиналар ифлосликлардан тозаланади ва назорат қилинади.

Яримўтказгичли пластиналарни жиололаш. Жиололаш жараёни жилвирлаш жараёнидан абразивнинг тури ва ўлчами, ҳамда жиололагичнинг материали билан фарқ қилади. Бунда қаттиқ текис жилвирловчи дисклар юмшоқ материаллар: замш, батист, жун, шойи каби материаллар билан қопланади. Жиололаш жараёни бир неча босқичда ўтказилади. Бунда секин-аста билан дона ўлчами ва абразив қаттиқлиги камайтириб борилади ва охириги босқичда умуман абразивдан фойдаланилмайди.

Бошланғич ва оралиқ механик жиололашда абразив сифатида ўлчами 3 мкм дан 1 мкм гача бўлган микрокукунлар: синтетик олмос, алюминий ва хром оксиди суспензияси ва пасталаридан фойдаланилади.

Механик жилолаш уч босқичда амалга оширилади:

1. Бошланғич жилолаш. Бунда пластиналар батист материалларга суркалган АСМЗ олмос кукунни ва бир неча томчи ёғ ёрдамида жилоланади.

2. Оралиқ жилолаш. Бунда материал алмаштирилади ва АСМ1 кукунидан фойдаланилади.

3. Якуний нозик жилолаш. Бунда асосан батист материали ва доналарининг ўлчами 1 мкм дан кичик бўлган хром, алюминий, кремний, цирконий оксидларидан фойдаланилади.

Жилолашдан сўнг сирт тозалиги 13 -14 синфга мос келиши керак.

Жилолашнинг янги замонавий усулига кимёвий-механик жилолаш усули мисол бўлади. Бунда, одатдаги абразивли механик таъсирдан ташқари ишлов берилаётган сиртга кимёвий таъсир ўтказилади. Жилоловчи таркиб — суспензия, курум, кремний, цирконий, алюминий оксидларининг субмикронли кукунлари ишқор асосида тайёрланади. Жараён давомида кремний ишқор билан кимёвий таъсирлашади. Шундан сўнг ҳосил бўлган бирикма абразив заррачалар ёрдамида парчаланади. Бундай жилолашдан сўнг пластинанг сиртида тирналган излар ҳосил бўлмайди ва механик бузилган қатламнинг чуқурлиги 1 мкм дан ошмайди. Агар кимёвий-механик жилолаш абразив таъсирисиз ўтказилса, бундай жилолаш кимёвий-динамик жилолаш ҳам дейилади.

Шундан сўнг пластиналар суспензиядан глицеринли дистирланган сув ёрдамида ювиб тозаланади ва сиртни тозалаш, сифат назорати ва ўраш операцияларига узатилади.

3.3.5. ТАГЛИКЛАР ВА ПЛАСТИНАЛАР СИРТИДАГИ ИФЛОСЛИКЛАР, УЛАРДАН ТОЗАЛАШ УСУЛЛАРИ

Пластина (таглик) сиртидаги атомлар ҳажмдаги атомларга нисбатан кимёвий боғланишлари тўйинмаган бўлади. Шу сабабли ифлосланишга олиб келадиган сиртнинг адсорбцияли қобиляти юқори бўлади. Ифлослантирувчи модда билан сиртнинг боғланиш турига биноан физик ва кимёвий адсорбциялар фарқланади.

Физик адсорбцияланган ифлосликлар бир нечта қатлам ҳолатда сиртда жойлашади ва тоза эритгич, вакуумда куйдириш (буғлантириш) ёрдамида осонгина кетказилади.

Кимёвий адсорбцияда ифлосликлар билан сирт орасида кимёвий боғланишлар ҳосил бўлади. Бу ифлосликлар битта қатлам ҳолатда жойлашади ва уларни кетказиш анча мураккаб бўлади.

Пластина ва таглик сиртида бир вақтнинг ўзида куп турдаги ифлосликлар мавжуд бўлади. Буларни йўқотиш учун ҳар хил турдаги тозалаш ва емириш усулларидан фойдаланилади. Бу усулларнинг таснифи 3.9 - расмда келтирилган.

Қўлланиладиган воситаларга мос ҳолда тозалаш суяқ ва қуруқ тозалашга бўлинади.

Суяқ тозалаш органик эритувчилардан ҳамда ишқорли, кислотали, пероксидли ва бошқа реактивли сувдан фойдаланиб ўтказилади. Таглик (пластина) сиртини бир хил тозалаш учун сиртни гидрофил ҳолатга, яъни сув билан яхши ҳўлланидиган ҳолатга ўтказиш керак. Ёғли ифлосликларни кетказиш, яъни сиртни гидрофоб ҳолатдан (сув билан ёмон ҳўлланидиган ҳолат) гидрофил ҳолатга ўтказиш операцияси ёғсизлантириш дейилади. Ёғсизлантириш суяқ тозалашда биринчи операция ҳисобланади.

Умуман ярим ўтказгичли тагликларни ювиб тозалаш икки босқичдан ташкил топади:

- 1) Органик эритгичларда ёғсизлантириш (толуол, спирт).
- 2) Ўта тоза сувда ювиш.



3.9-расм. Пластина ва тагликларни тозалаш ва емириш усулларининг таснифи.

Тагликларни ёғсизлантиришда ифлосликлар қутбсиз табиатга эга бўлса, унда толуол, тўрт хлорли углерод, фреондан фойдаланилади. Агар ифлосликлар қутбли бўлса, унда ацетон, спирт, уч хлор этиленлардан фойдаланилади.

Куруқ тозалаш микросхемаларнинг элементлари ва элементлараро боғланишларни шакллантириш босқичида қўлланилади ва одатда энг масъулиятли технологик жараёнлар (юпқа қатламни чанглангириб ҳосил қилиш, литография, термик оксидли қатлам, эпитаксиал қатлам кабилар) ўтказиш олдилан бажарилади. Куруқ тозалаш усуллари қимматбаҳо, ҳавфли ва экологияга салбий таъсир қиладиган суюқ реактивларсиз амалга оширилади. Бундан ташқари куруқ тозалаш жараёнлари осон бошқарилади ва уларни автоматлаштириш мумкин.

Тозалаш жараёнларининг механизми нуқтаи назари бўйича ҳамма усуллар шартли равишда физик ва кимёвий усулларга бўлинади. Физик усулларда ифлосликлар оддий эритиш, куйдириш, сиртга катта энергияли инерт газларининг ионлари билан ишлов бериш билан йўқотилади. Агар бу усуллар ёрдам бермаса, унда кимёвий усуллардан фойдаланилади.

Емириш жараёни микросхемалар технологиясида алоҳида ўрин тутати. Бу жараён фақат тозалаш учунгина ўтказилмасдан, балки тагликларга ўлчамли ишлов беришда, бузилган қатламни олиб ташлашда, микросхемалар топологиясини шакллантириш учун ҳар қил материаллар қатламларини локал олиб ташлашда қўлланилади. Шу сабабли кимёвий емириш жараёнини мукаммал кўриб чиқамиз.

Интеграл микросхема тагликларига кимёвий ишлов бериш. Кимёвий ишлов бериш қуйидаги мақсадлар учун ўтказилади:

1. Пластинада тоза сирт ҳосил қилиш.
2. Пластинадаги механик бузилган қатламни олиб ташлаш.
3. Пластинадан маълум қалинликдаги бошлангич материални олиб ташлаш.

4. Таглик сиртида керакли жойлардан бошлангич материални олиб ташлаш.

5. Таглик сиртига керакли электро-физик хоссаларни бериш.

6. Тагликнинг кристалл панжарасидаги структуравий нуқсонларни аниқлаш.

7. Мезоструктуралар олиш.

8. Галваник қопламалар ўтқазиш.

Тагликларда тоза сирт олиш мураккаб ва қийин жараён бўлиб қуйидагиларни ўз ичига олади:

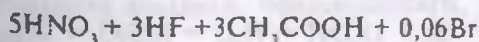
а) дистилланган сувда ва эритгичларда ювиш;

б) эритгичларда ультратовуш ёрдамида ювиш;

в) кимёвий ёки газли емириш.

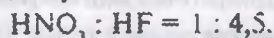
Кимёвий ишлов беришнинг моҳияти таглик сиртини кислотали ёки ишқорли эритгичларда эритишдан иборат. Агар эритгич мўл бўлиб унинг температураси ўзгармас бўлса, қатлам бир хил тезликда олиб ташланади. Бунинг натижасида олиб ташланаётган қатлам қалинлигини аниқ ҳисоблаш мумкин. Ярим ўтказгичнинг материалига қараб, ҳар хил эритгичлар қўлланилади.

Германийга кимёвий қайта ишлов беришда асосий эритгич сифатида азот ва фтор кислотасининг аралашмаси ҳамда водород перексидан фойдаланилади. Азот кислотаси германий учун кучли оксидловчи ҳисобланади. Фтор кислотаси бу оксидни эритади. Водород перексидида емириш 70-80°C температурада олиб борилади. Емургичларнинг емириш тезлигини, яъни кимёвий реакциянинг боришини бошқариш мумкин. Агар тезлатиш керак бўлса, бром, секинлатиш керак бўлса, сирка кислотаси маълум миқдорда емургичга қўшилади. Германий (Ge) учун энг кўп ишлатиладиган емургичнинг таркиби қуйидагича:

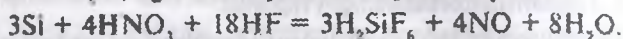


Кремний (*Si*) учун икки турдаги емиргичдан фойдаланилади: кислотали ва ишқорли.

Кислотали емиргич сифатида азот ва фтор кислоталарнинг ҳар хил таркибидаги аралашмасидан фойдаланилади. Бунда энг катта емириш тезлиги емиргич таркибининг қуйидаги моляр нисбатида кузатилади:



Кремний (*Si*) қуйидаги реакция бўйича эрийди:



Энг яхши жилоловчи хусусиятларга эга емиргичларда азот кислотасининг миқдори кўпроқ бўлади ($\text{HNO}_3 : \text{HF} = 2:1$ ёки 3:1). Емириш тезлигини камайтириш учун асосий кислоталарга сирка кислотаси CH_3COOH (3.2-жадвал) қўшилади.

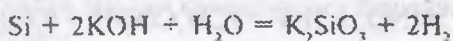
3.2-жадвал

Кремний учун ишлатиладиган асосий
кислотали емиргичлар

Емиргич тури	Ҳажмий таркиб	Қўлланилиши	Емириш вақти
С-8	$\text{HNO}_3 : \text{HF} = 2:1$	Кимёвий жилолаш	1...2 мин
С-4А	$\text{HNO}_3 : \text{HF} : \text{NI}_2\text{NIH} = 5:3:5$	Кимёвий жилолаш ва р-и ўтишининг чегарасини аниқлаш	2...3 мин
Уйит емиргичи	$\text{HNO}_3 : \text{HF} = 3:1$	{111} текислигини кимёвий жилолаш	15 сек
Деш емиргичи	$\text{HNO}_3 : \text{HF} : \text{NI}_2\text{NIH} = 3:1:8$	Ихтиёрий текислигини секин кимёвий жилолаш	1...16 соат

Ишқорли емиргич сифатида 10 - 20% KOH ва NaOH нинг сувли эритмасидан фойдаланилади. Оксидловчи вазифасини сув , оксидни эритувчи вазифасини (комплекс ҳосил қилувчи) гидрооксид бажаради. Бу жараён 90 -100 °C да олиб борилади.

Кремнийни ишқорли емиришдаги йиғинди реакциянинг кўриниши қуйидагича бўлади:



Емиришнинг тезлиги температура ва емиргич концентрациясининг ошиб бориши билан ортиб боради. Емириш тезлиги ўзгармас бўлиши учун емиргич аралаштириб турилади. Емиришнинг максимал тезлиги емиргичнинг 30% ли концентрациясида кузатилади.

Ишқорли емиргичлар анизатроп емиришли характерга эга бўлади. Ундан дислокациялар ва бошқа нуқсонларнинг борлигини аниқлашда қўлланилади.

Агар кимёвий ишловлар бериш жараёнида таглик статик (қўзғалмас) ҳолатда бўлса тагликнинг сиртлари ҳар хил емирилади. Бу ҳолатни йўқотиш учун кимёвий-динамик қайта ишловдан фойдаланилади.

Бунда таглик айлантириб, емиргич актив аралаштириб турилади.

3.3.6. ПЛАСТИНА ВА ТАГЛИКЛАРНИНГ СИФАТИНИ НАЗОРАТ ҚИЛИШ

Пластина ва тагликларни тайёрлаш технологик жараёнларида ишлов берилаётган объектларнинг назорати ҳамма механик операцияларда ўтказилади.

Жилвирлаш операциясидан кейин пластина қалинлигининг аниқлиги $\pm(2-5)$ мкм дан ошмаслиги керак. Қалинлик ФИП-2 қурилмаси, индуктив датчиклар ёрдамида аниқланади. Кейинги вақтларда геометрик параметрлар контактсиз усуллар ёрдамида назорат қилинмоқда. Бунда пластина ва тагликларга механик таъсирлар ўтказилмайди. Маҳсулотларнинг геометрик параметрлари УКТП-1, СПТ-1, СТ-100 каби қурилмалар ёрдамида автоматик назорат қилинади.

Қўпинча маҳсулот сифати қуйидаги асосий мезонлар асосида баҳоланади.

1. Пластинанинг геометрик ўлчамлари ва шакли.

2. Пластина сиртининг қайта ишлов тозаллиги.

3. Механик бузилган қатлам чуқурлиги.

1). Пластинани геометрик ўлчамлари ва шакли бўйича баҳолаш учун унинг қалинлиги бир неча нуқталарда ўлчанади, пластинанинг эгрилиги, понасимонлиги, текислиги текширилади.

2). Пластина сирти қайта ишлов тозалигини текширишда, силлиқлйқни баҳолашда эталон сирт билан солиштирилади ёки микро нотекисликларнинг баландлиги микроинтерферометрлар МИИ-4, МИИ-11 каби асбоблар ёрдамида аниқланади.

3). Механик бузилган қатлам чуқурлиги илмий текширув ва тажрибавий конструкторлик ишлари ўтказилаётган босқичларда, технологик жараёнларни созлаш босқичларида назорат қилинади.

Тозалаш жараёни ўтказилгандан сўнг таглик ва пластиналар сиртидаги ифлосликларни миқдорий ва сифат жиҳатдан назорат қилиш қуйидаги усуллар ёрдамида амалга оширилади:

- 1) нурланувчи нуқталар усули;
- 2) томчи усули, ёки ҳўлланишнинг чегара бурчагини ўлчаш;
- 3) трибометрик усул;
- 4) юувчи эритмаларни назорат қилиш усули;
- 5) юувчи сувнинг солиштирама қаршилигини ўлчаш усули.

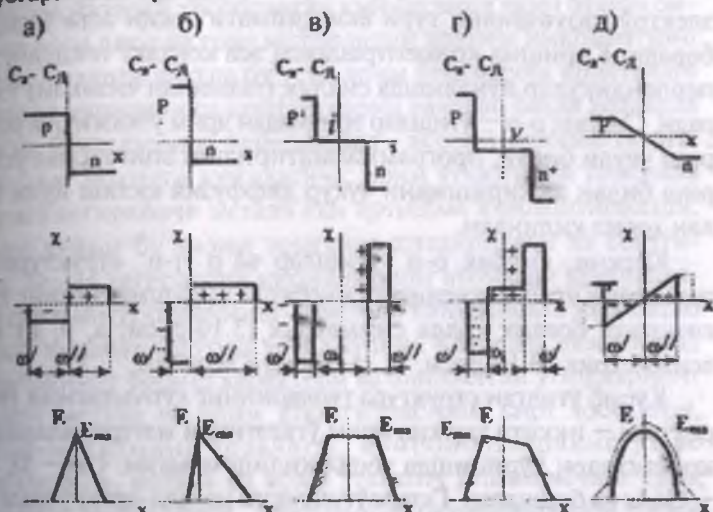
3.4. ЯРИМ ЎТКАЗГИЧЛИ ҚАТЛАМЛАР ВА ЎТИШЛАРНИ ҲОСИЛ ҚИЛИШ УСУЛЛАРИ

3.4.1. ЯРИМ ЎТКАЗГИЧЛИ СТРУКТУРАЛАРНИНГ ТУРЛАРИ, УЛАРНИ ҲОСИЛ ҚИЛИШ ФИЗИКАСИ ВА ТЕХНОЛОГИЯСИ

Ярим ўтказгичли асбоблар ва микросхемаларнинг асосини битта ва ундан ортиқ электрон—ковакли ўтишлар ёки бошқача тўғриловчи ва тўғриламайдиган (омик) контактлар мавжуд бўлган ярим ўтказгичли кристалл ташкил қилади. Тўғрилайдиган (p-n) ва тўғриламайдиган контактлар ўтказувчанлик тури, катталиги ўзгарадиган чегара соҳасида ҳосил бўлади. Бунда ўтиш соҳасида киришмалар концентрациясининг тақсимотига боғлиқ ҳолда бир неча турларини ажратиб кўрсатиш мумкин (3.10-расм).

Кескин p-n ўтишлар (3.10-расм, а, б). Бундай ўтишларда электрўтказувчанликнинг тури чегарада кескин равишда ўзга-

ради ва икки томонда контакт текислигидаги киришмаларнинг концентрациялари контакт соҳасигача бўлган масофада ўзгаришсиз қолади.



3.10-расм. Киришмалар концентрацияси C_p , C_n , ҳажмий заряд зичлиги ρ ва электр майдони E ларнинг тақсимоли.

Идеал кескин ўтишларга энг яқин структураларга қотишмалари ва эпитаксиал структуралар мисол бўлади. Солиштирма ўтказувчанлиги юқори бўлган соҳалар “+” белги билан белгиланади: p^+ - n —ўтиш, n^+ - p —ўтиш каби.

P - i - n турдаги структуралар (3.10-расм, в,г). Агар n - ва p -соҳалар оралиғида хусусий ўтказувчанликка эга бўлган i -қатлам (intrinsic - хусусий) жойлашган бўлса, бундай турдаги структуралар p - i - n , p^+ - i - n^+ каби белгиланади. Одатда хусусий ярим ўтказгич ҳосил қилиш қийин бўлганлиги сабабли p - ва n -соҳалар оралиғига солиштирма қаршилиги юқори бўлган i - p -турли ёки n -турли, мос ҳолда p ёки n ҳарфлари билан белгиланадиган материал жойлаштирилади, яъни: ppn , nnn каби.

P - i - n , ppn ва бошқа турдаги структураларни юқори қаршиликли ярим ўтказгич пластинасининг қарама-қарши томонига эритиб қотишма ҳосил қилиш ёки диффузия билан, ёки бу соҳаларни эпитаксиал ўстириш усуллари билан ҳосил қилиш мумкин. Шу сабабли ҳар бир ўтиш (p ёки n)

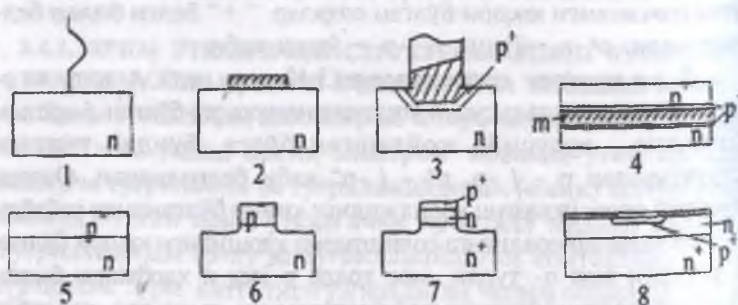
кескин (қотишма ҳосил қилиш ва эпитаксия усулида), ёки силлиқ (диффузия усулида) бўлиши мумкин.

Силлиқ p - n — ўтишлар (3.10-расм, д). Бундай ўтишларда электрўтказувчанлик тури ёки қиймати секин аста ўзгариб боради. Киришма концентрацияси эса контакт текислигига перпендикуляр йўналишда силлиқ (тахминан чизиқли) ўзгаради. Силлиқ p - n — ўтишлар эритмадан ярим ўтказгични ўстириш усули билан, программалаштирилган эпитаксиал ўстириш билан ва киришмани чуқур диффузия қилиш йўли билан ҳосил қилинади.

Кескин, силлиқ p - n ўтишлар ва p - i - n структуралар геометрик ўтиш текислигига нисбатан киришмаларнинг тақсимотиغا боғлиқ ҳолда симметрик (3.10-расм, а, в, д) ёки асимметрик (3.10-расм, б, г) бўлиши мумкин.

Кўриб ўтилган структура турларининг кўпчилигини гетероўтиш — иккита ҳар хил ярим ўтказгичли материалларнинг контактлари кўринишда ҳосил қилиш мумкин: $Ge - Si$, $Ge - GaAs$ ва бошқалар. Гетероўтишларга металл-ярим ўтказгич, МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) ёки МОП (металл-оксид-полупроводник) структуралар ҳам киради.

3.11-расмда ҳар хил усуллар билан тайёрланган энг содда структуралар кўрсатилган.



3.11-расм. Яримўтказгичли энг содда структуралар:

1-нуқтали контактли; 2-сирт-барьерли; 3-қотишмали локал; 4-қотишмали катта юзада; 5-диффузияли; 6-меза-диффузияли; 7-меза-эпитаксияли; 8-планар-эпитаксияли.

3.4.2. СТРУКТУРАЛАРНИ ҚОТИШМА ҲОСИЛ ҚИЛИШ УСУЛИ БИЛАН ОЛИШ

Қотишма ҳосил қилиш усули 50-йилларда электр параметрлари назарий ҳисобланган қийматларга яқин бўлган биринчи ясси диод ва транзисторларни яратиш имкониятини берди. Ҳозирги вақтда бу усул ярим ўтказгичли кристаллга электрод учларини ва контактларни улашда, баъзи ҳолларда электр ўтишларини тайёрлашда асосий аҳамиятга эга. Усулнинг моҳияти қуйидагича: ярим ўтказгичли пластина сиртига легирловчи металл ёки қотишма жойлаштирилади. Ундан кейин бу тизим эригунча қиздирилади ва совутилади. Бунда легирловчи киришманинг атомлари кристалла-наётган яримўтказгичнинг кристалл панжарасига жойлашиб қолади ва натижада ўтиш ҳосил бўлади. Қотишма ҳосил бўлиш жараёнининг бориш характери ва олинаётган ўтишларнинг сифати металл ва ярим ўтказгичларнинг сирт ҳоссалари, атроф-муҳитнинг тозалиги, компонентларнинг ўзаро эрувчанлиги, металл ва ярим ўтказгич атомларининг суяқ фазадаги диффузияси, эритманинг оқувчанликлари билан аниқланади. Қотишма ҳосил бўлишидаги физикавий жараён-ларни учта кетма-кет босқичга бўлиш мумкин: ярим ўтказгич сиртининг электрод материали билан ҳўлланиши; ҳолат диа-граммаси билан аниқланадиган электрод қотишмада маълум бир ҳажмдаги ярим ўтказгичнинг эриши; эритмани совутиш натижасида эриган ярим ўтказгич материалининг кристалла-ниши оқибатида $p-n$ — ёки омик ўтишлар ҳосил бўлиши.

Қотишмали $p-n$ -ўтишларни $n-Ge$ ва $n-Si$ асосида тайёр-лашда металл сифатида индий, алюминий, қалай, олтин иш-латилади.

Берилган компонентнинг қотишмада эрувчанлиги ҳолат диаграммасидаги ликвидус чизиги билан аниқланади. Эри-тилиш жараёни диффузия билан узвий боғлиқ бўлади. Эрит-мага ўтган ярим ўтказгичнинг атомлари диффузия натижа-сида текис тақсимланади.

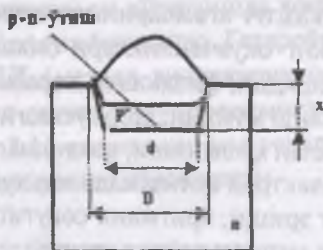
Ярим ўтказгич юзасида h қалинликда металл электрод эритилганда ярим ўтказгичнинг эриш чуқурлиги қуйидаги формула ёрдамида аниқланади:

$$x = \frac{S_y}{1 - S_y} \frac{d_m}{d_y} h$$

бу ерда, S_y — ярим ўтказгичнинг металлда масса улушлардаги эрувчанлиги; d_m ва d_y — металл ва ярим ўтказгичнинг зичлиги.

Мувозанат ҳолаги рўй берганда, яъни электродли қотишма ярим ўтказгични керакли чуқурликда эриттандан сўнг эритма совутилади. Қоришма ярим ўтказгич билан ўта тўйинганлиги натижасида ярим ўтказгич қаттиқ фаза кўринишида кристалланади. Ярим ўтказгичнинг эритмадан бундай кристалланиши қайтакристалланиш (рекристаллизация) дейилади. Совутиш бошлангунгача мавжуд бўлган қаттиқ ва суюқ фазаларнинг бўлиниш чегарасида ярим ўтказгичнинг ҳар хил легирланган соҳаларининг контакти ҳосил бўлади (3.12 -расм). Агар эритилаётган металл акцепторли киришма бўлса, ярим ўтказгичли бошлангич пластина эса п-турли бўлса, ёки металл

донорли киришма бўлса, ярим ўтказгич эса р-турли бўлса унда қотишмали кескин р-п ўтиш ҳосил бўлади.



3.12-расм. Қотишма ҳосил бўлишда п-ўтишнинг ҳосил бўлиши

Унда киришманинг тақсироти поронасимонга ўхшаш бўлади. Одатда ярим ўтказгичли бошлангич пластинада киришманинг концентрацияси нисбатан кичик бўлади (10^{14} – 10^{16} см⁻³ атрофида). Қайтакристалланган

қатламда эса легирловчи киришманинг концентрацияси бир неча тартибга юқори бўлиб 10^{18} – 10^{20} см⁻³ ни ташкил қилади.

3.4.3. ЮПҚ ҚАТЛАМНИ ВА СТРУКТУРАЛАРНИ ЭПИТАКСИАЛ ЎСТИРИШ УСУЛИ БИЛАН ҲОСИЛ ҚИЛИШ

ИМСнинг ярим ўтказгичли структураларини қуйидаги учта жараённинг ҳеч бўлмаганда битта ёки иккитасини қўлламасдан туриб тайёрлаб бўлмайди: ярим ўтказгичли қатламларни эпитаксиал ўстириш, диффузияли ва ионли легирлаш.

Эпитаксия усули 60-йилларнинг бошида ишлаб чиқилди ва мукаммал асбоблар ҳамда қурилмалар яратишда пайдо бўлган кўпгина қийинчиликларни енгиб ўтиш имкониятини яратди. Бу усул билан юпқа қатламлар ва структуралар ҳосил қилинади.

Эпитаксия — монокристалл тагликларда монокристалл қатламлар ўстириш жараёнидир. Монокристалл тагликлар эпитаксиал қатлам ўсиши жараёнида кристалланиш рўй бераётган ўстирма сифатида ориентирловчи бўлиб хизмат қиладди.

Эпитаксия жараёни вакуумда, газли ва суюқ фазаларда ўтказилиши мумкин. ИМС технологиясида кремний газли фазадан эпитаксия қилинади. Кремний эпитаксиясининг энг кўп тарқалган усули бу *хлорид* усули бўлиб, бунда кремний хлориди SiCl_4 водород H_2 ёрдамида қайтарилади. Ҳосил қилинаётган эпитаксиал қатлам хлор Cl билан ифлосланганлиги сабабли ва жараён температурасини пасайтириш мақсадида *гидрид* усули самарали ҳисобланади.

Эпитаксия усули кучли легирланган, ярим ўтказгичли пластина-тагликда шу ярим ўтказгичнинг кам киришмали юпқа қатламини ҳосил қилиш имкониятини беради. Бу қатлам диодларда база, транзисторларда коллектор ва бошқа соҳалар бўлиб хизмат қиладди.

ИМС тайёрлашда қуйидаги эпитаксиал структуралар — эпитаксиал қатламлар ўстирилган тагликлардан фойдаланилади: бир қатламли, кўп қатламли, яширин қатламли ва гетероэпитаксияли. Эпитаксияли структуралар қуйидагича белгиланади: *К* — кремний; *Д*, *Э* — ковак (дырочной) ва электрон турли ўтказувчанлик; *Б*, *С*, *М*, *Ф* — легирловчи элементлар: бор, сурма, мишьяк, фосфор.

Бир қатламли эпитаксиал структуралар ўтказувчанлиги *n*-тур бўлган кремнийли монокристалл пластиналарга *p*-турли қатламни автоэпитаксия қилиш жараёнида тайёрланади. Бир қатламли эпитаксиал структуралар сонли коэффициентли каср кўринишида белгиланади. Масалан,

$$76 \frac{8 \text{ КДБ} - 0,5}{400 \text{ КЭС} - 0,01}$$

Сонли коэффициент эпитаксияли структуранинг диаметрини кўрсатади (76 мм), суратдаги биринчи сон эпитаксия-

ли қатлам қалинлигини белгилайди (8 мкм), махраждаги — пластина қалинлигини кўрсатади (400 мкм). Суратдаги ва махраждаги иккинчи сон эпитаксияли қатлам (0.5 Ом·см) ва тагликнинг (0,01 Ом·см) солиштирма қаршилигига мос келади.

Кўп қатламли эпитаксияли структуралар р-турли кремний пластинасининг икки томонига ўтказувчанлик турлари ҳар хил бўлган қатламларни автоэпитаксия қилиш жараёнида тайёрланади. Кўп қатламли эпитаксияли структураларнинг белгиланиши бир қатламли структураларнинг белгиланишига ўхшаш бўлиб, уч сатҳли бўлади.

Яширин қатламли эпитаксияли структуралар р-турли кремний пластиналарида кичик қаршиликли p^+ -кремнийли локал участкаларда фосфор билан легирланган п-турли ўтказувчанликли қатламни ўстириш йўли билан тайёрланади. Структуранинг белгиланиши ёзилиш тартиби бўйича қуйидагича: суратда — эпитаксиал қатламнинг қалинлиги (мкм); материал; ўтказувчанлик тури ва эпитаксиал қатламни легирловчи элемент; унинг солиштирма қаршилиги (Ом·см); қалинлиги (мкм); яширин қатламнинг materiali; ўтказувчанлик тури ва легирловчи элемент; унинг сирт қаршилиги (Ом/см²); махражда — эпитаксиал қатламнинг умумий қалинлиги (мкм); материал; ўтказувчанлик тури; легирловчи элемент; тагликнинг солиштирма қаршилиги (Ом·см); тагликнинг ориентацияси ва ундан оғиш бурчаги (градусларда); асосли қирқимнинг ориентацияси ва оғиш бурчаги; структуранинг номинал диаметри (мм). Бундай белгилашга мисол:

$$\begin{array}{l} 12 \text{ КЭФ} - 0.8 / 3.5 \text{ КЭС} - 30 \\ 312 \text{ КДБ} - 10 (111) - 8, \left[\begin{array}{c} 11 \\ 2 \end{array} \right] - 45 \end{array}$$

Гетероэпитаксияли структуралар монокристалл тагликда ўтказувчанлиги п- ёки р-турли бўлган монокристалл қатламларни ўстириш билан тайёрланади.

Гетероэпитаксияли структураларни белгилашга мисол:

$$\begin{array}{l} 10 \text{ КДБ} - 0.5 \\ 60 \text{ С} 250 \end{array}$$

бу ерда, суратда қатламнинг параметри келтирилган — қалинлиги 10 мкм, материал — кремний р-турли, бор билан

легируланган, қатламнинг солиштирма қаршилиги 0,5 Ом-см; махражда биринчи сон структуранинг диаметрини белгилайди — 60 мм, С ҳарфи — таглик материални кўрсатади — сапфир, иккинчи сон — тагликнинг қалинлиги — 250 мкм.

Эпитаксиянинг турлари ва усуллари. “Эпитаксия” атамаси кристалл сиртида ориентирланган ҳолатдаги кристалл ўстириш жараёнини билдиради. Эпитаксияли қатлам кристалл тагликка ўтказилган монокристалл материал бўлиб, тагликнинг структураси (морфологияси) ни сақлаб қолади.

Эпитаксия жараёнининг 3та тури маълум:

1. Автоэпитаксия — тагликда унинг структураси билан бир хил бўлган модданинг ўстирилиши бўлиб, улар бир биридан киришмаларнинг концентрацияси билангина фарқ қилади.

2. Гетероэпитаксия - таглик юзасида унинг таркибидан бошқа бўлган модданинг ўстирилиши.

2 Хемоэпитаксия - таглик моддасидан фарқ қиладиган моддани ориентирланган ўстириш жараёни бўлиб, ҳосил бўлаётган янги фаза тагликнинг моддаси билан ташқаридан келаётган модданинг кимёвий таъсирланиши натижасида ҳосил бўлади. Бунинг натижасида ҳосил бўлган хемоэпитаксиал қатлам таркиби жиҳатдан таглик моддасидан ва ўтқазилаётган моддадан фарқ қилади.

Ўсаётган қатламнинг ҳосил бўлиш жараёнида кечадиган физик-кимёвий ходисаларнинг табиатига қараб эпитаксиянинг 3 та технологик усули мавжуд:

1. Вакуумда молекуляр оқимлар ёрдамида ўстириладиган молекуляр нурли эпитаксия.

2. Газ ёки бут-газ аралашмали моддаларнинг кимёвий таъсири ёрдамида олинадиган газ фазали эпитаксия.

3 Суюқ фазадаги ёки қоришма-эритмалардан рекристаллизация йўли билан олинадиган суюқ фазали эпитаксия.

Электрон асбоблар ва қурилмалар ишлаб чиқариш технологиясида асосан иккинчи усулдан фойдаланилади.

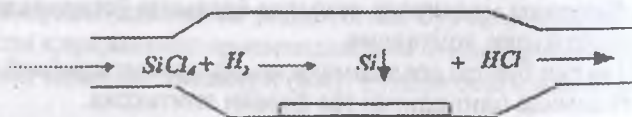
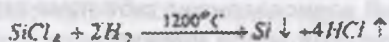
Кремний ва германий эпитаксиясининг технологик хусусиятлари Кремний ва германийнинг эпитаксияли қатламларини ўстиришда энг кўп қўлланиладиган усул бу буғ-газ фазасидан эпитаксия қилиш бўлиб, энг асосийлари уларнинг тетрахлоридларини водород билан тиклаш ва моносилан SiH_4 ва моногерман GeH_4 ларни термик ажратиш усуллари-дир. Бунда қиздирилган таглик устидан хлорид ёки гидрид ва легируловчи киришмаларнинг буғлари билан бирга тагликдаги водород

гази ўтказилиши натижасида қайтарилган кремний ёки германийнинг монокристалл қатламлари шу таглик устига ўтиради.

Эпитаксиал ўстиришнинг ўзига хос жараёнлари қуйидаги операциялардан ташкил топади:

1. Реакторга пластиналарни юклаш.
2. Реакторни инерт газлар ва водород билан пуфлаш.
3. Пластинани қиздириш ва уларни тозалаш мақсадида газсимон емирувчи реагентларни юбориш.
4. Емиришни тўхтатиш ва ўстириш учун керакли бўлган температурани ўрнатиш.
5. Эпитаксиал қатламларни ўтказиш ва легирлаш учун реагентларни (хлориднинг буғлари ёки гидридлар ва легирловчи киришмаларни водород билан биргаликда) бериш.
6. Реагентлар беришни тўхтатиш ва водород билан қисқа муддатли пуфлаш.
7. Қиздиришни тўхтатиш, водород ва инерт газлар билан пуфлаш.
8. Реактордан пластиналар олиш.

Кремний эпитаксиясининг хлоридли усули. Бу усул соддалиги ва бошланғич материалларнинг бемалоллиги туфайли кенг тарқалган. Бунда кремний тетрахлорид - SiCl_4 буғи ва водород H_2 реакторга берилади ва у ерда кремний тикланишининг асосий реакцияси юз беради:



Баъзан тетрахлорид SiCl_4 ўрнига учхлорсилан SiHCl_3 дан фойдаланилади. Бунда кремнийнинг тикланиш реакцияси қуйидагича бўлади:



Агар хлорли водород HCl ортиқча бўлса унда иккита реакция ҳам ўнгдан чапга боради. Бундай ҳолдан тагликларни газли емириш усули билан тозлаш сифатида фойдаланилади. SiCl_4 нинг кичик концентрацияларида ўсиш тезлиги концентрацияга қизиқли боғланган бўлади. SiCl_4 нинг катта концентрацияларида ўсиш тезлиги камаяди ва тагликни кимёвий емириш жараёни

бошланади. Одатда водородда $SiCl_4$ нинг концентрацияси 1% гача бўлгандагина ўсиш реакцияси юз беради.

Кремний қуйидаги шароитда ўтказилиши мумкин:

1. Температура интервали 1150-1250°C атрофида бўлиши керак.
2. Водородда $SiCl_4$ нинг концентрацияси 0,5-1% сатҳда ушлаб турилади.

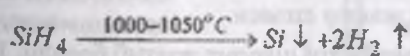
3. Газ оқимининг тезлиги 0,1-1 м/с ни ташкил қилиши керак.

Мана шу шартлар бажарилганда ўсиш тезлиги 1 мм/мин га яқин бўлади.

Кремний эпитаксиясининг гидрид усули. Эпитаксия жараёнини хлор усули ёрдамида ўтказилганда тагликнинг температураси 1200°C атрофида бўлади. Бундай температурада кучли легирланган тагликдан киришмалар кучсиз легирланган эпитаксиал қатламга сезиларли диффузияланади. Бу ҳодиса автолегирлаш дейилади ва у киришмалар тақсимотига салбий таъсир қилади. Бу таъсирни камайтириш мақсадида ё диффузия коэффициентини кичик бўлган киришмалардан фойдаланилади, масалан: фосфор Р ўрнига сурма Sb ёки мишьяк As, ё жараён температурасини камайтириш керак бўлади.

Кремний эпитаксияси жараёнида температурани 1000°C гача камайтириш имконияти гидрид усулидан фойдаланилганда амалга ошади. Гидрид усулининг моҳияти моносилан SiH_4 ни пиролиз қилишдир. Шу сабабли бу усул силан усули ҳам дейилади.

Гидрид усулида моносилан SiH_4 температура таъсирида парчаланади ва бу реакция



кўринишга эга бўлади ва эркин кремний температураси 1000°C гача камайтирилган тагликка ўтиради. Бу эса тагликдан киришмалар диффузиясини амалда йўқ қилади ва легирловчи киришмалари бир хил тақсимланган эпитаксияли қатлам ўсишини таъминлайди.

Гидрид усули қуйидаги шароитда ўтказилади:

1. Ўтказишнинг оптимал температураси 1050-1100°C.
2. Манба сифатида 4-5% SiH_4 ва 95-96% юқори тозаликдаги инерт газлари ёки водороддан ташкил топган манба қўлланилади.

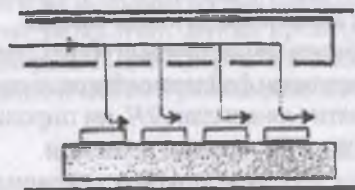
3. Ўтказиш вақтида водороддаги моносилан SiH_4 нинг концентрацияси 0,05-0,1%.

4. Газ оқимининг тезлиги 30-50 см/с.

Бу шартлар бажарилганда ўсиш тезлиги 0,2 дан 2 мкм/мин гача ўзгаради.

Эпитаксияли қатлам ўстириш қурилмалари (реакторлари). Эпитаксияли қатлам ўстириладиган қурилмалар - реакторлар конструкция жиҳатидан асосан 2 турли бўлади: *горизонтал* ва *вертикал*.

Горизонтал реакторлар энг оддий конструкцияга эга. Буг-газ аралашмасининг оқими таглик ушлагичга параллел ҳаракатланиб, пластина устидан оқиб ўтади ва бунда оқимнинг концентрацияси борган сари камайиб боради. Тагликларда ҳосил бўлган эпитаксияли қатламларнинг қалинлиги ва солиштирма қаршилиги вақтга боғлиқ ҳолда ўзгариб боради. Ҳамма тагликларда эпитаксияли қатламлар бир хил қалинликда ўсиши ва бир хил солиштирма қаршиликка эга бўлиши учун иккита усулдан фойдаланилади: таглик ушлагич газ оқими йўналишига маълум бир бурчак остида ўрнатилади, ёки таглик ушлагичнинг узунлиги бўйича газ тақсимлагичдан фойдаланилади (3.13-расм).



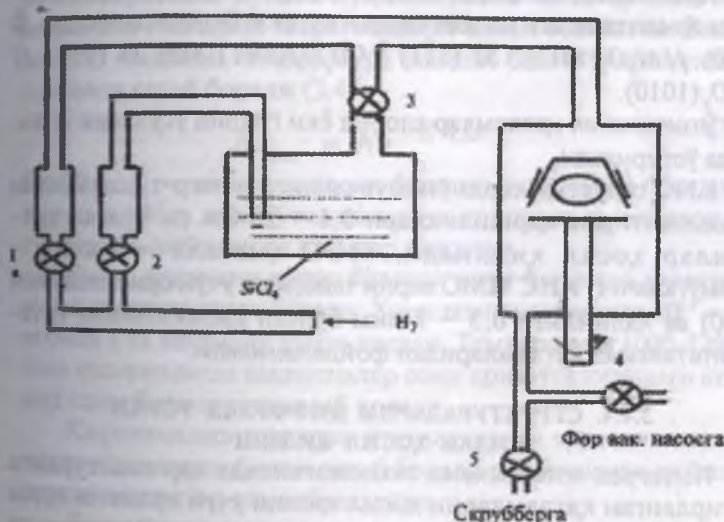
3.13-расм. Si эпитаксия ўтказишнинг горизонтал реактор схемаси.

Горизонтал реакторларда керакли шароитларни ҳосил қилиб параметрлари бир хил бўлган эпитаксиал қатлам ўстириш анча мураккаб. Вертикал реакторлар конструкцияси ўқ симметрияли бўлганлиги сабабли буг-газ аралашмасини қиздириш ва

оқими учун энг яхши шароит яратиб беради. Вертикал реакторларда тагликлар ўқ симметриясига асосан айлантириб турилади. Бу эса иссиқлик ва газдинамикали майдонларни бир хил ушлаб туришга ёрдам беради. 3.14-расмда мана шундай қурилманинг принципиал схемаси кўрсатилган. Тетрахлорид кремнийли ёки легирловчи қўшимчалар билан биргаликдаги — $\text{SiCl}_4 + \text{BBr}_3$ ёки $\text{SiCl}_4 + \text{PCl}_3$ аралашмали идиш SiCl_4 нинг температурасини ўта юқори аниқликда ушлаб турадиган термостатга жойлаштирилади. Одатда бу температура 0°C атрофида бўлади, чунки SiCl_4 — ўта учувчан суюқликдир. Кислород ва намликдан тозалаш мақсадида платина ёки палладий диафрагмалари орқали ўтказилган водород системага I кран ва унинг сарфини ўлчаб турувчи ротометр орқали берилади.

2, 3, 4 кранлар ёпиқ туради. Кремнийли тагликлар 1000 – 1200°С гача қиздирилади ва водород оқимида сиртлари тозаланади. 1 кран ёпилади ва 2, 3 кранлар очилади. Водород $SiCl_4$ идиши орқали ўтказилиб, $SiCl_4$ буғи билан тўйинтирилади ва у реакторда элементар кремнийгача тикланади. Реакция маҳсулотлари - $SiCl_4$, H_2 , HCl ва бошқалар очиқ 5 кран орқали скрубберга чиқариб юборилади. У ерда заҳарли газлар ажратиб олиниб водород алангасида ёқиб юборилади.

Замонавий саноат қурилмаларида, масалан УНЭС-2П-КА да эпитаксия жараёни асосан ЭХМ ёрдамида бошқарилади, оператор фақат пластиналарни юклаш ва олиш билангина шуғулланади.



3.14-расм. Кремнийни эпитаксия қилиш учун вертикал қурилма схемаси.

Сапфир ва шпинелга кремнийнинг гетероэпитаксияси.

Кремнийнинг сапфирдаги гетероэпитаксиал структураси (КНС) СБИС (ўта катта интеграл схема) ларда МДП (металл-диэлектрик-ярим ўтказгич) ларни тайёрлашда кенг қўлланилмоқда. КНС структуралари ёрдамида элементларни

жойлаштиришнинг жуда ҳам юқори зичлиги ва уларни схемада осон изоляциялаш таъминланади. Бунда аввал сапфирли тагликда кремнийнинг эпитаксиал қатлами ўстирилади ва унда ИМС элементлари ҳосил қилинади. Ундан кейин элементлар орасидаги участкалар изоляцияловчи тагликкача емириб ташланади. Энг кўп тарқалган кремнийнинг гетероэпитаксиал структураларига сапфирдаги $Si - Al_2O_3$ ва шпинелдаги $Si - MgO \cdot Al_2O_3$ қатламлари мисол бўлади.

Сапфир ва шпинелда кремнийнинг гетероэпитаксиал қатламларини муваффақиятли ўстириш қатлам — тагликнинг бўлиниш чегарасидаги кристаллографик нисбатларга ва таглик сиртининг ҳолатига кучли боғлиқ бўлади.

Кремнийни сапфирда гетероэпитаксиал ўстиришда қуйидаги ориентацияли нисбатлардан кўпроқ фойдаланилади: $Si(100) // Al_2O_3(1012)$, $Si(111) // Al_2O_3(0001)$ ёки $Si(111) // Al_2O_3(1010)$.

Эпитаксиал қатламлар хлорид ёки гидрид усуллари ёрдамида ўстирилади.

КНС структураларда ўтказувчанлиги n- ва p-турли бўлган ва солиштирма қаршиликлари 0,1 — 20 Ом см бўлган қатламлар ҳосил қилинади. МОП (металл — оксид — яримўтказгич) КНС ИМС ларни тайёрлаш учун ориентацияси (100) ва қалинлиги 0,5 — 1 мкм бўлган кремнийнинг гетероэпитаксиал қатламларидан фойдаланилади.

3.4.4. СТРУКТУРАЛАРНИ ДИФФУЗИЯ УСУЛИ БИЛАН ҲОСИЛ ҚИЛИШ

Интеграл микросхема технологиясида ҳар хил турдаги легирланган қатламларни ҳосил қилиш учун кўпинча ярим ўтказгичли пластинага киришмаларни юқори температурали диффузия орқали киритишдан фойдаланилади. Бунинг учун пластина юқори температурагача қиздириладиган кварцли қувурга жойлаштирилади. Қувур орқали легирловчи киришманинг буғлари ўтказилади. Улар пластина сиртига адсорбцияланади ва кристалл панжарага диффузияланади.

Диффузия уч хил амалга оширилади:

1. Алмашув механизми, бунда икки атом ўзаро жойларини алмаштиради ёки бир неча атомлар иштирокида ҳалқали алмашув рўй беради.

2. Вакансияли механизм, бунда вакант (буш) тугунларга киришма атомларининг кетма - кет сакраш йули билан ўтириши орқали диффузия амалга оширилади. Бундай киришмалар *асосий атом ўрнига ўтирувчи киришмалар* дейилади.

3. Тугунлараро механизм, бунда киришма атомлари кетма - кет битта тугунлар оралигидан бошқа тугунлар оралигига ўтиши билан диффузия амалга оширилади. Бундай киришмалар *киритилган киришмалар (примеси внедрения)* дейилади.

Кремний ва германийларни киришмалар билан легирлашда вакантли мезанизмнинг эҳтимоли кўп бўлиб, у кристаллдаги Шотки ва Френкель нуқсонларининг борлиги билан аниқланади. Бундай нуқсонларнинг ҳосил бўлиши панжаранинг иссиқлик тебранишлари билан боғланган. Вакансиялар миқдори температура ошиши билан экспоненциал равишда ошиб боради (3.4):

$$N_{\text{вак}} = N_0 e^{-E/(kT)} \quad (3.4)$$

бу ерда, E — вакансия ҳосил бўлиши учун керак бўладиган энергия, N — ярим ўтказгичнинг кристалл панжараси тугунларида жойлашган атомлар миқдори.

Битта вакансия ҳосил бўлиши учун бир неча электрон-вольт энергия керак бўлади. Хона температурасида 10^{15} - 10^{16} атомга 1 та вакансия тўғри келади. Температура 1000 - 1200°C гача оширилганда вакансиялар сони ярим ўтказгичдаги атомлар сони билан тенглашиб қолади.

Киришмаларнинг ярим ўтказгичларда эрувчанлиги температура ошиши билан ошиб боради ва максимал қийматга эришгандан сўнг камайбошлайди.

Ярим ўтказгичларда киришмаларнинг *чегаравий эрувчанлиги* деб, берилган температурада берилган ярим ўтказгичнинг бирлик ҳажмида бўлиши мумкин бўлган киришмаларнинг аниқ максимал миқдorigа айтилади.

Диффузия учун Фик қонулари. А.Фик томонидан таклиф қилинган бу икки қонун иссиқлик ўтказувчанликнинг тенгламаларига асосланган бўлиб, моддаларнинг диффузияли кўчиш жараёнларини тавсифлайди. Фикнинг қонулари диффузиянинг иккита тенгламаси кўринишида тасвирланади. Диффузиянинг биринчи тенгламаси киришма атомларининг юқори концентрацияли соҳадан паст концентрацияли соҳага

ярим ўтказгич пластинасига асосан нормал йўналиш бўйича оқимини аниқлайди:

$$F = -D \frac{dC}{dx}$$

бу ерда, D — диффузия коэффициентини бўлиб, сон жиҳатдан диффузия йўналишига нормал бўлган бирлик юздан бирлик вақтда киришма концентрациясининг градиенти $dC/dx=1$ га тенг бўлганда ўтаётган атомлар миқдорига тенг, тенгламанинг ўнг томонидаги минус ишораси атомларнинг диффузион силжиши концентрация камаяётган томонга эканлигини кўрсатади.

Диффузиянинг иккинчи тенгламаси диффузия коэффициентини концентрацияга боғлиқ эмас деб қабул қилиниб, биринчи тенгламадан чиқарилади:

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2 C}{dx^2}$$

Фикнинг иккинчи тенгламаси диффузиянинг асосий қонунини ифода қилади. У ихтиёрий вақт мобайнида ва ихтиёрий масофадан диффузиянинг берилган температурасида ярим ўтказгичга киритилаётган киришманинг концентрациясини аниқлайди. Бу ифодада температура диффузия коэффициентини орқали қатнашади:

$$D = D_0 e^{-\frac{\Delta E}{kT}}$$

бу ерда, D_0 — ўзгармас бўлиб, сон жиҳатдан чексиз катта темературадаги диффузия коэффициентига тенг; ΔE — берилган киришма учун диффузия жараёнининг активлаш энергияси, яъни киришма атомининг панжарадаги вакант тугунга сакраб ўтиши учун керак бўладиган энергия.

Яримўтказгичларда диффузия жараёни юқори температураларда ўтказилади. Масалан: германий учун — 800-900°C да, кремний учун — 1000-1200°C да.

Диффузияли легирлашни ўтказиш усуллари. Диффузия жараёни температуранинг нисбатан чекланган диапазонда ўтказилади.

Изоляцияланган, юқори вакуумли ҳажмга ярим ўтказгич пластиналари ва киришма элементи жойлаштирилади. Шундан кейин улар маълум температурага қиздирилади. Киришма элементининг сублимацияси ёки буғланиши натижасида ҳажмда унинг буғларининг маълум бир парциал

босими ҳосил бўлади. Бугнинг молекулалари пластинанинг ҳамма сиртларига адсорбцияланади ва ичкарига диффузияланади. Умумий ҳолда мувозанатли концентрациянинг катталиги бугнинг босимига пропорционал бўлади. Шунинг учун киришма сирт концентрациясининг катталиги буг босимини назорат қилиш йўли билан бошқарилади.

Диффузион жараёнлар очик ёки берк қувурларда ўтказилади. Очик қувурда диффузия қувурининг охири атмосферага чиқарилган бўлади. Берк қувур деганда герметик ампулада ўтказилган диффузия тушунилади.

Очик қувурда ўтказиладиган диффузия жараёни энг кўп тарқалган бўлиб, унда қаттиқ, суюқ, газсимон киришма манбаларидан фойдаланилади. Кремний учун асосий диффузانتларга фосфор ва бор киради. Одатда уларнинг газсимон, суюқ ёки қаттиқ кўринишдаги кимёвий бирикмаларидан фойдаланилади. Газсимон диффузانتларга бор ва фосфорнинг гидридлари, суюқ диффузانتларга галогенидлари, қаттиқ диффузانتларга эса оксидлари мисол бўлади.

Планар технология бўйича электрон асбоблар ва қурилмаларни тайёрлаш жараёнида киришма ярим ўтказгичли пластинанинг керакли тирқишига киритилади ва бу жараён икки босқичда бажарилади. Биринчи босқич - киритиш босқичида киришманинг керакли миқдори сирт қатламига киритилади ва кремний сиртида егис-функцияли тақсимотли киришманинг юпқа диффузион қатлами ҳосил қилинади. Ундан кейинги иккинчи босқич - тарқатиш босқичида эса диффузانت атомлари бўлмаган атмосферада ярим ўтказгич пластинаси қиздирилади, яъни киришманинг диффузияли қайта тақсимои юз беради ва киришма керакли чуқурликка керакли концентрацияда ҳайдалади.

Диффузияда киришманинг тақсимои. Киришма атомлари ё вакансияларга ёки тугун ораллиқларига диффузияланади. Асосий легирловчи киришмалар бор *B*, фосфор *P*, индий *In*, галлий *Ga*, сурма *Sb*, мышьяк *As* ҳисобланади. Бу асосий легирловчи киришмалар вакансияларга жойлашади, қолган ноасосийлари эса тугун (асосий атом) ораллиқларига

киради. ИМС технологиясида киришма атомлари концентрациясининг диффузиядан кейин чуқурлик бўйича тақсимланишини аниқлаш энг керакли вазифа ҳисобланади. Бунда киришма атомлари манбанинг турига қараб 2 хил тақсимланиши кузатилади.

1). Манбадаги киришма атомлари миқдори чекланган. Бундай ҳол учун юпқа сирт қатламда киришма атомлари концентрациясининг тақсимот профили қуйидаги қонунга бўйсинади.

$$C(x, t) = \frac{N}{\sqrt{\pi Dt}} \exp \left(-\frac{x^2}{4Dt} \right) \quad (3.5)$$

бу ерда, N —сиртнинг бирлик юзасидаги киришма атомларининг зичлиги бўлиб, диффузиянинг ихтиёрий вақтида ўзгармас, ат/см², x —шу концентрацияга тегишли бўлган чуқурлик, см, D —киришманинг диффузия коэффиценти, см²/с, t —диффузия вақти, с.

Диффузион р-п ўтишнинг жойлашган чуқурлиги қуйидаги формула ёрдамида топилади:

$$x_{p-n} = 2\sqrt{Dt} \sqrt{\ln \left(\frac{C_0}{C_E} \right)} \quad (3.6)$$

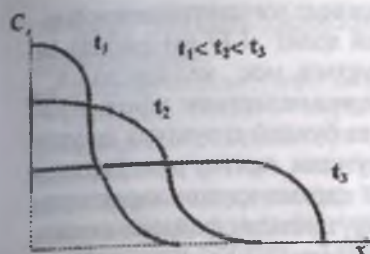
бу ерда, C_0 —бошлангич пластинадаги киришманинг концентрацияси. $x=0$ даги киришманинг сирт концентрацияси қуйидагича бўлади:

$$C_0 = \frac{N}{\sqrt{\pi Dt}} \quad (3.7)$$

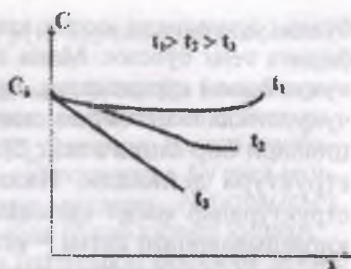
Амалда р-п ўтишнинг чуқурлиги қуйидаги формула билан ҳисобланади:

$$x_{p-n} \approx 6\sqrt{Dt} \quad (3.8)$$

Диффузантининг чекланган манбадан киришмаларнинг



3.15-расм Диффузиянинг ҳар хил вақтлари учун диффузантининг чекланган манбандан киришмалар тақсимооти.



3.16-расм Диффузиянинг ҳар хил вақтлари учун диффузантининг ўзгармас (чекланмаган қувватли) манбандан киришмалар тақсимооти.

тақсимооти 3.15-расмда кўрсатилган.

2) Манбадаги киришма атомлари миқдори чексиз бўлган, яъни киришма атомларининг сирт концентрацияси ўзгармас бўлган манбадан диффузия бўлмоқда, бунда киришма тақсимооти

$$C(x, t) = C_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (3.9)$$

формулага бўйсинади. Бунга тўғри келадиган киришмаларнинг тақсимооти 3.16-расмда кўрсатилган. Кўп ҳолларда соддалаштириш учун erfc -функциянинг ўрнига унинг аппроксимациясидан фойдаланилади:

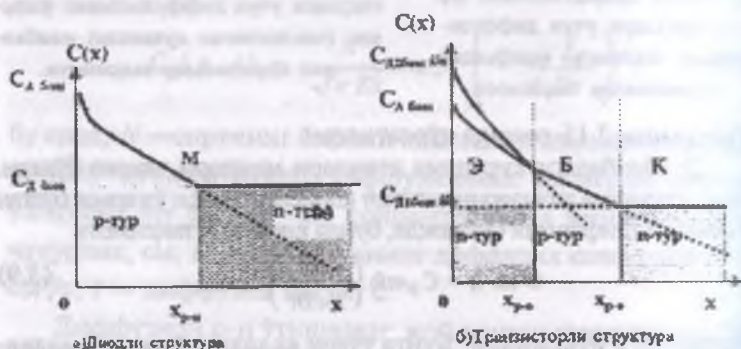
$$\operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \approx \exp\left[-\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} + 0.3\right)^2\right] \quad (3.10)$$

Бу ҳол учун p - n ўтишнинг чуқурлиги қуйидаги ифода билан аниқланади:

$$x_{p-n} = 2\sqrt{Dt} \left(\sqrt{\ln \frac{C_0}{C_B}} - 0.3 \right) \quad (3.11)$$

Диод ва транзисторли структураларда p - n ўтишнинг ҳосил бўлишида киришмаларнинг тақсимооти. Электрон асбоблар ва қурилмаларни лойиҳалашда p - n ўтишнинг қайси чуқурликда ҳосил бўлишини аниқ ҳисоблаш муҳим аҳамиятга эга. Бошланғич пластинадаги киришма концентрацияси маълум бўлса, унга тури қарама-қарши бўлган киришмани шундай режимда киритиш керакки, бунда p - n ўтиш ҳосил бўлиши керак

бўлган чуқурликда исқала киришманинг концентрацияси бир-бирига тенг бўлсин. Мана шундай ҳолат 3.17 (а)-расмда М нуқта билан кўрсатилган. Бу нуқтага мос келадиган x_{p-n} чуқурликда акцептор ва донор киришмаларнинг концентрациялари бир-бирига тенг бўлади ва бундай структура диодли структура дейилади. Икки ва ундан ортиқ р-п ўтишли структуралар ҳосил қилишда ҳам қарама-қарши характерли киришмаларнинг кетма — кет диффузиясидан фойдаланилади. Бунда ҳам р-п ўтишларнинг жойлашган



3.17-расм. Диодли (а) ва транзисторли (б) структураларда

р-п ўтишининг ҳосил бўлишида киришмаларнинг тақсимо-
чуқурликлари акцептор ва донор киришмалар концентраци-
яларининг бир-бирига тенглигидан топилади. 3.17(б)-расмда
транзисторли структуралар учун киришмалар тақсимо-
ти ва р-п ўтишларнинг жойлашган чуқурликлари кўрсатилган.
Одатда $C_{A\text{бoл}c}$ концентрациянинг қиймати $C_{D1\text{бoл}c}$ нинг
қийматидан бир неча даражага, $C_{D1\text{бoл}c}$ нинг қиймати эса C_A
нинг қийматидан бир неча даражага юқори бўлади.

Диффузия жараёнида ҳосил қилинадиган структураларни
ҳисоблаш усуллари. Диффузия ўтказиш жараёнида ҳосил қили-
надиган структураларни ҳисоблашда асосан икки турдаги ма-
сала ечилади:

1. *Тўғри масала*, бунда берилган технологик режим асосида
киришмалар концентрацияси тақсимо-ти профили аниқланади.

2. *Тесқари масала*, бунда киришма тақсимо-ти параметр-
лари асосида диффузия жараёнининг режимлари аниқланади.

Тўғри масалага тегишли бўлган мисолларни ечиш ҳолла-
ри билан танишамиз.

Икки босқичли диффузия ҳоли учун киришмалар тақсимо-
тини ҳисоблаш

Планар технологияда диффузия икки босқичда ўтказилади:

Биринчи босқич - киритиш (загонка) босқичи дейилади. Бу босқич сирт концентрацияси C_{01} ўзгармас бўлган манбадан нисбатан қисқа t_1 вақт давомида ўтказилади. Бу вақт ичида киритилган киришма атомлари миқдори N (атом/см²) кейинги босқичда диффузанти манбаи бўлиб хизмат қилади.

Иккинчи босқич - тарқатиш (разгонка) босқичи дейилади ва у t_2 вақт давомида ўтказилади ва бунда сирт концентрацияси вақтга боғлиқ ҳолда ўзгаради.

$$C_{02} = N / \sqrt{\pi D_2 t_2} \quad (3.12)$$

Икки босқичли диффузияда киришмалар тақсимо-
тидини қуриш учун киритиш ва тарқатиш босқичларининг температураси ва ўтказиш вақтини билиш керак. T_1 температура киришманинг диффузия коэффиценти D_1 ни ва шу киришманинг чегаравий эрувчанлигига тенг бўлган сирт концентрацияси C_{01} ни аниқлайди.

Киритиш босқичида киритилган киришма атомларининг сирт зичлиги киришма тақсимо-
тини интеграллаш билан аниқланади:

$$N = \int_0^{\infty} C(x) dx = \int_0^{\infty} C_{01} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1}} dx = 2C_{01} \sqrt{\frac{D_1 t_1}{\pi}} \quad (3.13)$$

Тарқатиш босқичидан сўнг киришмаларнинг тақсимо-
ти куйидаги ифода билан аниқланади.

$$C(x, t) = \frac{2C_{01}}{\pi} \sqrt{\frac{D_1 t_1}{D_2 t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_2 t_2}\right) = \frac{N}{\sqrt{\pi D_2 t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_2 t_2}\right) \quad (3.14)$$

1-мисол. Солиштирма қаршилиги $\rho=10$ Ом·см бўлган р-
турли кремнийга фосфор икки босқичли диффузия куйи-
даги режимлар асосида ўтказилмоқда:

$T_1=1050^\circ\text{C}$, $t_1=10$ минут, $T_2=1150^\circ\text{C}$, $t_2=2$ соат. Ҳосил бўлган киришма тақсимо-
ти профили қурилсин ва р-п ўтиш-
нинг чуқурлиги аниқлансин.

Ечиш:

1. $C = f(T)$ графигидан (4-илова) $T=1050^\circ\text{C}$ учун C_{01} аниқланади. Фосфорнинг кремнийдаги чегаравий эрувчанлиги $1,2 \cdot 10^{21}$ см⁻³ га тенг экан. $C_{01} = 1,2 \cdot 10^{21}$ см⁻³ деб қабул қиламиз.

2. $D = f(T)$ графигидан (6-илова) $T=1050^\circ\text{C}$ учун D_1 топилади: $D_1 = 2,5 \cdot 10^{-14}$ см²/с.

3. Киритилган киришма атомларининг сирт зичлиги N ҳисобланади:

$$N = 2C_{01} \sqrt{\frac{D_1 t_1}{\pi}} = 2 \cdot 1,2 \cdot 10^{21} \cdot \sqrt{\frac{2,5 \cdot 10^{-14} \cdot 10 \cdot 60}{3,14}} = 5,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$$

4. $D = f(T)$ графигидан (6-илова) $T = 1150^\circ \text{C}$ учун D_2 топилади:

$$D_2 = 4 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{с}.$$

5. Тарқатиш босқичидан кейинги тақсимот эгри чизигини кураимиз:

$$c(x,t) = \frac{N}{\sqrt{\pi D_2 t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_2 t_2}\right) = \frac{5,2 \cdot 10^{15}}{\sqrt{3,14 \cdot 4 \cdot 10^{-13} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 60}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot 4 \cdot 10^{-13} \cdot 7,2 \cdot 10^3}\right) = 5,5 \cdot 10^{19} \exp\left(-\frac{x^2}{1,5 \cdot 10^{-3}}\right)$$

Киритишдан кейинги тақсимот қуйидаги ифода ёрдамида курилади:

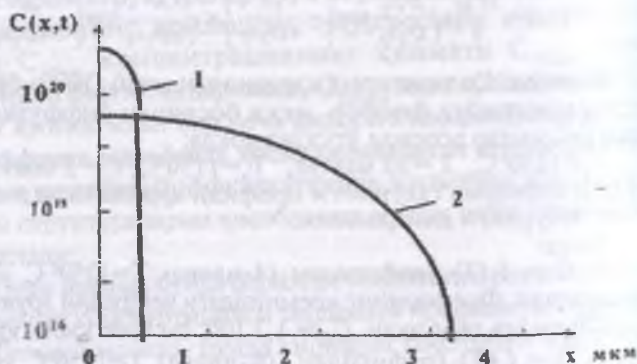
$$C(x,t) = C_{01} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1}} = 1,2 \cdot 10^{21} \operatorname{erfc} \frac{x}{7,75 \cdot 10^{-6}}$$

Бу тақсимотлар 3.18 -расмда келтирилган.

6. Р-п ўтишининг чуқурлиги қуйидаги ифода орқали ҳисобланади:

$$x_{p-n} = 2\sqrt{D_2 t_2} \sqrt{\ln \frac{C_{02}}{C_5}}$$

$$C_{02} = \frac{N}{\sqrt{\pi D_2 t_2}} = 5,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$$



3.18-расм Киритиш (1) ва тарқатиш (2) босқичларидан кейинги фосфорнинг ҳисобланган профил тақсимои.

Бошлангич пластинадаги киришма концентрациясининг қиймати $p = f(C)$ графигидан (5-илова) топилади: $C_n = 1,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Унда p - n ўтишининг чуқурлиги:

$$x_{p-n} = 2 \sqrt{4 \cdot 10^{-13} \cdot 7,2 \cdot 10^3} \sqrt{\ln \frac{5,5 \cdot 10^{19}}{1,2 \cdot 10^{15}}} = 3,5 \text{ мкм}$$

Тахминий усул билан ҳисобланган p - n ўтишининг чуқурлиги:

$$x_{p-n} \approx 6 \sqrt{D_A t_A} = 6 \sqrt{4 \cdot 10^{-13} \cdot 7,2 \cdot 10^3} = 3,2 \text{ мкм}$$

бу эса аниқ қийматга жуда яқин келади.

Иккиланган кетма - кетли диффузия ҳоли учун киришмалар тақсимотини ҳисоблаш

Диффузияли транзистор, тиристор, варикап ва қўпгина бошқа асбоблар ҳамда ИМСларни тайёрлашда уларнинг актив структураларини ҳосил қилиш учун ҳар хил турдаги электр ўтказувчанликли қатламлар кетма-кет диффузиядан фойдаланиб олинади. Концентрацияси C_n бўлган киришма билан бир текис легирилган n -турли ярим ўтказгичга иккиланган кетма-кет диффузия қилиниб, аввал параметрлари C_{on} , D_A , t_A бўлган акцептор киришмаси, кейин эса параметрлари C_{od} , D_d , t_d бўлган донор киришмаси киритилмоқда. Бунда натижавий концентрациянинг тақсимооти қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$C(x, t) = C_{on} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_A t_A}\right) - C_{od} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_d t_d}} + C_B \quad (3.15)$$

Биринчи диффузияда киришма, бизнинг мисолимизда акцептор киришмаси, чуқурроққа киритилади. Иккинчи диффузияда донор киришмаси эса юзароққа, лекин юқорироқ концентрацияда киритилади, натижада p - n - p структура ҳосил бўлади. Агар p -турли ярим ўтказгич олиниб, киришмаларнинг ўринлари алмаштирилса, p - n - p структура ҳосил қилинади.

Кичикроқ сирт концентрацияли ва каттароқ чуқурликка ўтказиладиган биринчи диффузия *базавий диффузия* дейилади ва у p -турлаги база соҳасини ҳосил қилиш учун хизмат қилади. Юқори сирт концентрацияли ва кичикроқ чуқурликка ўтказиладиган иккинчи диффузия *эмиттерли диффузия* дейилади ва у n -турдаги эмиттер соҳасини ҳосил қилиш учун хизмат қилади.

Базавий диффузия икки босқичда ўтказилади. Шу сабабли унинг натижавий (3.15) тақсимоотга қўшган улуши

Гаусс эгри чизиғи билан ифодаланади. Эмиттерли диффузия бир босқичда ўтказилади ва киришмаларнинг тақсимои егс- функция билан ифодаланади.

(3.15) ифодада эмиттерли диффузия ўтказилаётган вақтда акцепторли киришманинг силжиши ҳисобга олинмаган. Агар ҳисобга олинадиган бўлса, бу ифода куйидаги кўринишга эга бўлади:

$$C(x, t) = C_{0A} \exp\left(-\frac{x^2}{4(D_A t_A + D_A^* t_D)}\right) - C_{0D} \operatorname{erfc} \frac{x}{4\sqrt{D_D t_D}} - C_B \quad (3.16)$$

бу ерда

$$C_{0A} = \frac{N_A}{\sqrt{\pi(D_A t_A + D_A^* t_D)}} \quad (3.17)$$

D_A^* — донор диффузияси температурасига мос келадиған акцептор киришмасининг диффузия коэффициенти.

Эмиттер р-п ўтишининг чуқурлигини топиш учун (3.15) ифодадан фойдаланилади. Бу ифодадаги C_B концентрациянинг қиймати донор ҳамда акцептор киришмалар концентрацияларига нисбатан кўп марта кичик бўлганлиги учун ҳисобга олинмайди ва бу ифода нолга тенгланади. Унда (3.15) ифодадан куйидагини ҳосил қиламиз:

$$C_{0D} \operatorname{erfc} \frac{x_{p-n}}{2\sqrt{D_D t_D}} = C_{0A} \exp\left(-\frac{(x_{p-n})^2}{4D_A t_A}\right)$$

егс-функциянинг аппроксимациясидан фойдаланиб, куйидагини топамиз:

$$C_{0D} \exp\left[-\left(\frac{x_{p-n}^2}{2\sqrt{D_D t_D}} + 0.3\right)^2\right] = C_{0A} \exp\left(-\frac{(x_{p-n})^2}{4D_A t_A}\right)$$

(3.19) ифодадан:

$$x_{p-n}^2 = \left[\left(\frac{1}{2\sqrt{D_D t_D}} + \frac{0.3}{x_{p-n}}\right)^2 - \frac{1}{4D_A t_A}\right]^{-1} \ln\left(\frac{C_{0D}}{C_{0A}}\right) \quad (3.20)$$

Бу тенглама итерация усули билан ечилади, бунда бошланғич қиймат учун

$$x_{p-n}^{(0)} = 6\sqrt{D_D t_D} \quad (3.21)$$

ни қабул қиламиз, унда

$$x_{p-n}^{(1)} = \left[\frac{1}{4D_D t_D} - \frac{1}{4D_A t_A}\right]^{-1} \ln\left(\frac{C_{0D}}{C_{0A}}\right) \quad (3.22)$$

Эмиттер р-п ўтиш чуқурлигининг аниқроқ ифодаси куйидагича бўлади:

$$x_{p-n}^2 = \left[\left(\frac{1}{2\sqrt{D_A t_A}} + \frac{0.3}{x_{p-n}} \right)^2 - \frac{1}{4D_A t_A} \right]^{-1} \sqrt{\ln \left(\frac{C_{ol}}{C_R} \right)} \quad (3.23)$$

Коллектор р-п ўтишнинг чуқурлигини аниқлашда унинг эмиттер диффузияси вақтидаги силжишини ҳисобга олиш керак бўлади, унда

$$x_{p-n}^2 = 2\sqrt{D_A t_A + D_A t_D} \sqrt{\ln \left(\frac{C_{ol}}{C_R} \right)} \quad (3.24)$$

бу ерда, C_{ol} (3.17) формуладан аниқланади.

2-мисол. Электр ўтказувчанлиги п-турли, солиштирма қаршилиги $\rho = 0,15$ ом·см бўлган кремнийга кетма-кет бор ва фосфор қуйидаги режимларда диффузия қилинмоқда: $T_A = 1200$ °C, $t_A = 1$ соат, $T_D = 1100$ °C, $t_D = 2$ соат. Бор атомларининг сирт зичлиги $N_A = 5 \cdot 10^{14}$ см⁻², фосфор сирт концентрацияси чегаравий эрувчанлигига тенг бўлган чексиз киришма манбаидан диффузия қилинмоқда. Ҳосил бўлган п-р-п структурадан киришмалар тақсимоти профили ҳисоблансин.

Ечиш :

1. $\rho = f(c)$ графигидан (5-илова) кремнийнинг бошланғич пластинасидаги донор киришманинг концентрациясини топамиз: $C_R = 5 \cdot 10^{16}$ см⁻³.

2. $D = f(T)$ графигидан (6-илова) диффузия коэффициентларининг қийматини топамиз: $D_A = 2 \cdot 10^{-12}$ см²/с, $D_A^* = 2.5 \cdot 10^{-13}$ см²/с, $D_D = 1 \cdot 10^{-13}$ см²/с.

3. $C = f(T)$ графигидан (4-илова) фосфорнинг чегаравий эрувчанлигини топамиз: $C_{ol} = 1,2 \cdot 10^{21}$ см⁻³.

$D_A t_A$ ва $D_A^* t_A$ кўлайтмаларнинг қийматларини солиштирамиз: $D_A t_A = 2 \cdot 10^{-12} \cdot 60 \cdot 60 = 7,2 \cdot 10^{-9}$ см², $D_A^* t_A = 2,5 \cdot 10^{-13} \cdot 260 \cdot 60 = 1,8 \cdot 10^{-9}$ см². Демак, $D_A t_A \gg D_A^* t_A$ ва бундан тақсимотни қуриш учун (3.11) формуладан фойдаланиш мумкин эканлиги келиб чиқади:

$$C(x,t) = C_{ol} \exp \left(- \frac{x^2}{4D_A t_A} \right) - C_{ol} \exp \left(- \frac{x^2}{2\sqrt{D_A t_A}} \right) - C_R$$

бу ерда,

$$C_{ol} = \frac{N_A}{\sqrt{4D_A t_A}} = \frac{5 \cdot 10^{14}}{\sqrt{3,14 \cdot 7,2 \cdot 10^{-9}}} = 3,3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$$

5. Тақсимотни қуришда x ўқидаги қадамни рационал танлаб олиш учун коллектор ва эмиттер ўтишларнинг жойлашган чуқурликларини аниқлаймиз:

$$x_{p-n}^2 = 2\sqrt{D_A t_A} \cdot \sqrt{2,31 \lg \left(\frac{C_{ol}}{C_R} \right)} = 2\sqrt{7,2 \cdot 10^{-9}} \cdot \sqrt{2,31 \lg \left(\frac{3,3 \cdot 10^{18}}{5 \cdot 10^{16}} \right)} = 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 3,5 \text{ мкм}$$

Эмиттер p-n ўтиш жойлашган чуқурликни топиш учун (3.21) – (3.23) формулалардан фойдаланамиз.

$$x_{p-n}^{20} \approx 6\sqrt{D_{H^+}t} = 6\sqrt{1 \cdot 10^{-13} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 60} = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 1,6 \text{ мкм};$$

$$x_{p-n}^{21} = \left(\frac{1}{4D_{H^+}t} - \frac{1}{4D_{A^+}t} \right)^{-\frac{1}{2}} \sqrt{2,31g \left(\frac{C_{H^+}}{C_{OH^-}} \right)} =$$

$$= \left(\frac{1}{4 \cdot 7,2 \cdot 10^{-10}} - \frac{1}{4 \cdot 7,2 \cdot 10^{-9}} \right)^{-\frac{1}{2}} \sqrt{2,31g \left[\frac{2 \cdot 10^{21}}{3,3 \cdot 10^{18}} \right]} = 1,35 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 1,35 \text{ мкм};$$

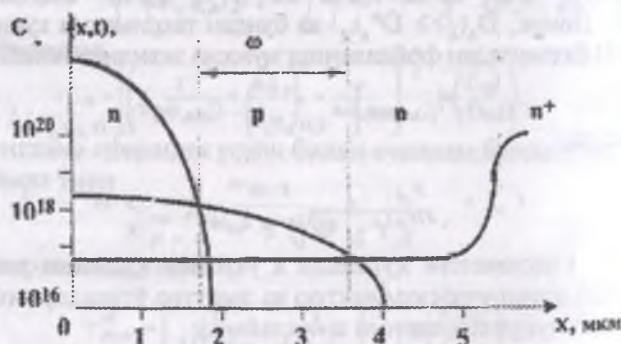
$$x_{p-n}^3 = \left[\left(\frac{1}{2\sqrt{D_{H^+}t}} + \frac{0,3}{x_{p-n}^{21}} \right)^2 - \frac{1}{4D_{A^+}t} \right]^{-\frac{1}{2}} \sqrt{2,31g \left(\frac{C_{H^+}}{C_{OH^-}} \right)} =$$

$$= \left[\left(\frac{1}{2 \cdot 7,2 \cdot 10^{-10}} + \frac{0,3}{1,35 \cdot 10^{-4}} \right)^2 - \frac{1}{4 \cdot 7,2 \cdot 10^{-9}} \right]^{-\frac{1}{2}} \sqrt{2,31g \left(\frac{2 \cdot 10^{21}}{3,3 \cdot 10^{18}} \right)} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 1,2 \text{ мкм}$$

6. Тақсимотни қурамыз.

$$c^+(x, t) = 3,3 \cdot 10^{18} \exp \left(- \frac{x^2}{2,84 \cdot 10^{-4}} \right) - 1,2 \cdot 10^{21} \exp \left(- \frac{x^2}{5,35 \cdot 10^{-5}} \right) - 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$$

$x = 1,2$ мкм чуқурликкача $0,3$ мкм ли қадамдан фойдаланамиз, $x = 1,5 + 3,5$ мкм чуқурликда қадамни $0,5$ мкм қилиб оламиз. Одатда бундай тақсимот алоҳида олинган эгри чиқиқлар қўринишида ифодаланади (3.19-расм).



3.19-расм. Иккиланган кетма-кет диффузия натижасида олинган p-p-p транзисторида киришма тақсимотининг ҳисобланган профили.

Диффузия режимларини аниқлаш. Энди тескари масалаларни ечишга ўтамиз. Тескари масалалар амалиётда муҳим аҳамиятга эга, чунки диффузия жараёнини ўтказиш учун диффузия режимларини: вақтини ва температурасини аниқ билиш керак бўлади. Тескари масалаларни аниқ ечиш кўпинча D кўпайтмани аниқлашга олиб келинади. Ундан кейин кўпинча T температуранинг қиймати қабул қилиб олинади ва шу бўйича киришманинг диффузия коэффиценти топилади. Ундан кейин эса диффузия вақти t аниқланади. Баъзан киришманинг чегаравий эришининг температурага боғлиқлигини ҳам ҳисобга олишга тўғри келади.

Киришма тақсимооти параметрларига асосан диффузия режимларини аниқлаш.

Бир босқичли диффузия ёки ҳайлаш босқичини ҳисоблаш учун тескари масалани ечиш жуда оддий. Масалан, ион имплантация ёрдами билан ҳосил қилинган миқдори чекланган киришмали қатламдан диффузия жараёни ўтказилмоқда. Унда

$$x_{p-n} = 2 \sqrt{Dt} \sqrt{\ln \left(\frac{C_0}{C_B} \right)}$$

формулага асосан қуйидагини ёзишимиз мумкин:

$$Dt = \frac{x_{p-n}^2}{4 \ln \left(\frac{C_0}{C_B} \right)} \quad (3.26)$$

Энди диффузия жараёнининг ё температурасини, ёки вақтини танлаб олиш керак. Агар ишлаб чиқариш минимал вақт талаб қилса, унда жараён температураси ҳисобланган диффузия коэффиценти орқали аниқланади.

$$D = \frac{x_{p-n}^2}{4t \ln \left(\frac{C_0}{C_B} \right)} \quad (3.27)$$

3-мисол. Солиштирма қаршилиги $\rho = 1$ Ом·см бўлган p -турли кремнийга ион имплантация ёрдамида киритилган мишьяк As тарқатилмоқда. Агар p - n ўтишнинг чуқурлиги $x_{p-n} = 0,5$ мкм сирт концентрацияси $C_0 = 1,5 \cdot 10^{20}$ см⁻³ жараённинг вақти $t = 1$ соат бўлса, мишьякни тарқатиш босқичи ўтказилаётган диффузиянинг температураси аниқлансин ва кремнийга киритиладиган мишьяк атомларининг миқдори топилинсин.

Ечиш:

1. $\rho = f(C)$ графигидан (5-илова) C_B аниқланади: $C_B = 1,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

2. Диффузия коэффициентини ҳисоблаймиз:

$$D = \frac{x_p^2}{4t \ln \left(\frac{C_0}{C_B} \right)} = \frac{0,25 \cdot 10^{-8}}{4 \cdot 1 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 2,3 \lg \left(\frac{1,5 \cdot 10^{20}}{1,5 \cdot 10^{16}} \right)} = 1,9 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{с}.$$

3. Мишьякнинг топилган кремнийдаги диффузия коэффициенти қийматиға $D = f(T)$ графигидан (6-илова) 1070°C температура мос келади: $T = 1070^\circ \text{C}$

4. Бирлик юзага киритилган мишьяк атомларининг миқдори сирт концентрациясининг ифодаси асосида топилади:

$$C_0 = \frac{N}{\sqrt{\pi D t}};$$

$$N = C_0 \sqrt{\pi D t} = 1,5 \cdot 10^{20} \sqrt{3,14 \cdot 1,9 \cdot 10^{-14} \cdot 1 \cdot 60 \cdot 60} = 2,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$$

4-мисол. Солиштира қаршилиги $p = 10 \text{ ом} \cdot \text{см}$ бўлган n -турдаги кремнийға бор икки босқичли диффузия қилинмоқда. Агар киришманинг тақсимои қуйидаги параметрларға $C_0 = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $x_{p-ii} = 2,5 \text{ мкм}$ эға бўлса, киритиш ва тарқатиш жараёнларининг температуралари ва вақтларини аниқланг.

Ечиш.

1. $\rho = f(C)$ графигидан (5-илова) C_B ни топамиз: $C_B = 4,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

2. $D_1 t_1$ қўпайтмани ҳисоблаймиз:

$$D_1 t_1 = \frac{x_p^2}{4 \ln \left(\frac{C_0}{C_B} \right)} = \frac{6,25 \cdot 10^{-8}}{4 \cdot 2,3 \lg \left(\frac{5 \cdot 10^{18}}{4,5 \cdot 10^{14}} \right)} = 1,7 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2$$

3. T температурани 1150°C деб қабул қиламиз: $T_1 = 1150^\circ \text{C}$. $D = f(T)$ графигидан (6-илова) T_1 температураға мос келадиган диффузия коэффициенти D_1 ни топамиз: $D_1 = 7,2 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{с}$. Бунга асосан t_1 вақтни ҳисоблаймиз:

$$t_1 = \frac{1,7 \cdot 10^{-9}}{D_1} = \frac{1,7 \cdot 10^{-9}}{7,2 \cdot 10^{-13}} = 2,36 \cdot 10^3 \text{ с} \approx 40 \text{ мин}.$$

4. Борнинг киритиш босқичи температурасини 1050°C деб қабул қиламиз: $T_1 = 1050^\circ \text{C}$. Бу температураға мос келадиган борнинг эрувчанлиги C_{01} ни $C = f(T)$ графигидан (4-илова), диффузия коэффициенти D_1 ни $D = f(T)$ графигидан (6-илова) топамиз: $C_{01} = 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, $D_1 = 6,9 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{с}$.

5. Киритиш вақтини ҳисоблаймиз:

$$t_1 = \frac{D_2}{D_1} \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{C_{02}}{C_{01}} \right)^2, t_2 = \frac{7,2 \cdot 10^{-13}}{6,9 \cdot 10^{-14}} \left(\frac{3,14}{2} \cdot \frac{5 \cdot 10^{18}}{3 \cdot 10^{20}} \right)^2 \cdot 2,4 \cdot 10^3 = 10,6 \text{ с.}$$

Бундай вақт давомида киритиш жараёнини амалда бажариб бўлмайди, шу сабабли киришма ё борнинг чекланган манбаидан ёки ион имплантация усули ёрдамида киритилиши керак бўлади.

6. Киритиш босқичида киритилиши керак бўлган бор атомлари миқдорини ҳисоблаймиз:

$$N = C_{02} \sqrt{\pi D_2 t_2} = 5 \cdot 10^{18} \sqrt{3,14 \cdot 1,7 \cdot 10^{-9}} = 3,6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$$

Диффузантининг чекланган манбасидан фойдаланилганда киритиш вақти t_1 ни ўзимиз қабул қилиб оламиз ва $D_1 \cdot C_{01}^2 = D_2 \cdot C_{02}^2 \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \frac{t_2}{t_1}$ кўлайтманинг қийматини аниқлаймиз.

7. $t_1 = 10$ мин. деб оламиз, унда

$$D_1 C_{01}^2 = 7,2 \cdot 10^{-17} \cdot 25 \cdot 10^{36} \left(\frac{3,14}{2} \right)^2 \frac{2,4 \cdot 10^3}{6 \cdot 10^{-2}} = 1,78 \cdot 10^{26} \frac{1}{\text{см}^4 \cdot \text{с}}$$

8. $T_1 = 1050^\circ \text{C}$ га тенг деб қабул қиламиз. Бу температурага мос келувчи борнинг кремнийдаги диффузия коэффициентининг қиймати $D = f(T)$ графигидан (6-илова) топилади: $D_1 = 6,9 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2 / \text{с}$ ва C_{01} ҳисобланади:

$$C_{01} = \sqrt{\frac{1,78 \cdot 10^{26}}{D_1}} = \sqrt{\frac{1,78 \cdot 10^{26}}{6,9 \cdot 10^{-14}}} \approx 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$$

Иккиланган кетма-кет диффузия режимларини аниқлаш

Юқоридаги мисолларда киришма бир жинсли легирланган яримутказгичга диффузия қилинган эди. Иккиланган кетма-кетли диффузияда эмиттер диффузияси бир жинсли бўлмаган легирланган база соҳасига диффузия қилинади. Шу сабабли технологик режимларни ҳисоблаш мураккаблашади. Ҳисоблаш учун бошланғич маълумотлар сифатида коллектор ва эмиттерли р-п ўтишларининг чуқурликлари $x_p^k \cdot n \cdot x_p^3 \cdot n$, эпитаксиал қатламдаги киришма концентрацияси C_p , диффузияланаётган акцептор ва донор киришмаларнинг сирт концентрациялари C_{0A} , C_{0D} керак бўлади. Аниқланиши керак бўлган параметрлар: база диффузиясида акцепторли киришмани киритиш режимлари: $(T_{A1}; t_{A1}; N_A)$ ва

тарқатиш режимлари: $(T_{A2}; t_{A2})$ ҳамда эмиттер диффузиясида донорли киришмани тарқатиш режимлари: $(T_D; t_D)$.

База диффузиясининг режимини ҳисоблаш бир жинсли ле-гирланган ярим ўтказгичга икки босқичли диффузия режими-ни ҳисоблаш каби бир хил бўлади. Ҳисоблашни соддалашти-риш учун эмиттер диффузияси жараёнида акцептор киришма-си тақсимои сезиларли силжимади деб қабул қилинади:

$$(D_1)_{\text{эфф}} = D_{A2} \cdot t_{A2} + D_{A3} \cdot t_{D1} \approx D_{A2} \cdot t_{A2} \quad (3.28)$$

бу ерда, D_{A3} — акцептор киришмасининг эмиттер диффузи-яси жараёнидаги диффузия коэффициенти.

Эмиттер диффузияси режимини ҳисоблашда (3.20) ифода-дан фойдаланилади. Бу тенглик $D_D \cdot t_D$ кўпайтмага нисбатан ечилиб, диффузия жараёнининг температураси ва вақти аниқланади:

$$D_D \cdot t_D = \frac{(x_{p-n}^2)^2}{4 \left[\sqrt{\ln \left(\frac{C_{0M}}{C_{0A}} \right)} + \frac{(x_{p-n}^2)^2}{(4 D_A t_A)} - 0,3 \right]} \quad (3.29)$$

5-мисол. Кремнийга борнинг базавий диффузиясида ки-ритиш (T_{A1}, t_{A1}, N_A) ва тарқатиш режимлари (T_{A2}, t_{A2}) ҳамда эмиттер диффузиясида фосфорнинг киритиш режими (T_D, t_D) қуйидаги берилган бошланғич маълумотлар асосида аниқлансин: $C_E = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $x_{p-n}^D = 1,2 \text{ мкм}$, $x_{p-n}^K = 3,5 \text{ мкм}$, $C_M = 3,3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $C_{0D} = 1,2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$.

Ечиш.

Аввалига базавий диффузия режимларини аниқлаймиз.

1. Кўпайтмани ҳисоблаймиз:

$$D_{A2} t_{A2} = \frac{(x_{p-n}^2)^2}{4 \ln(C_{0A}/C_E)} = \frac{12,25}{4 \cdot 2,3 \lg [3,3 \cdot 10^{18} / (5 \cdot 10^{16})]} = 7,3 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2.$$

2. Тарқатиш босқичи учун температуранинг қийматини $T_{A2} = 1150^\circ \text{ С}$ деб оламиз. Унда $D = f(T)$ графигидан шу температурага мос келадиган борнинг кремнийдаги диффу-зия коэффициенти $D_{A2} = 7,2 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{с}$ га тенг эканлиги топилади. Шу асосда жараён вақтини ҳисоблаймиз:

$$t_{A2} = 7,3 \cdot 10^{-9} / D_{A2} = 7,3 \cdot 10^{-9} / (7,2 \cdot 10^{-13}) = 1,01 \cdot 10^4 \text{ с} = 2,8 \text{ соат } 50 \text{ мин.}$$

3. Базавий диффузия учун керак бўладиган бор атомларнинг сирт зичлигини топамиз:

$$N_A = C_{0A} \sqrt{\pi D_{A2} t_{A2}} = 3,3 \cdot 10^{18} \sqrt{3,14 \cdot 7,3 \cdot 10^{-9}} = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$$

4. Киритиш режими қуйидаги кўпайтма асосида танлаб оламиз:

$$D_{A1} t_{A1} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{N_A}{C_{0A1}} \right)^2 = D_{A2} t_{A2} \left(\frac{\pi C_{0A}}{2 C_{0A1}} \right)^2$$

Борни киритиш температурасини $T_{A1} = 1050^\circ \text{C}$ деб қабул қиламиз ва $C = f(T)$ графигидан бу температурага мос келувчи C_{0A1} , $D = f(T)$ графигидан D_{A1} топилади: $C_{0A1} = 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, $D_{A1} = 6,9 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{с}$.

2 Борни киритиш вақти:

$$t_{A1} = \frac{D_{A2}}{D_{A1}} \left(\frac{\pi C_{0A}}{2 C_{0A1}} \right)^2 t_{A2} = \frac{7,2 \cdot 10^{-13}}{6,9 \cdot 10^{-14}} \left(\frac{3,14 \cdot 3,3 \cdot 10^{18}}{2 \cdot 3 \cdot 10^{20}} \right)^2 \cdot 1,01 \cdot 10^4 = 30 \text{ с}$$

Бу вақт ичида киритиш жараёнини амалга ошириб бўлмайди. Шу сабабли 4-мисолдаги каби $t_{A1} = 10$ мин деб оламиз ва қуйидаги кўпайтмани ҳисоблаймиз:

$$D_{A1} C_{0A1}^2 = D_{A2} C_{0A}^2 \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 t_{A2} t_{A1} = 7,2 \cdot 10^{-13} (3,3 \cdot 10^{18})^2 \left(\frac{3,14}{2} \right)^2 \frac{1,01 \cdot 10^4}{6 \cdot 10^2} = 3,24 \cdot 10^{26} \frac{1}{\text{см}^4 \cdot \text{с}}$$

6. $C_{0A1} = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ деб қабул қиламиз, унда

$$D_{A1} = 3,24 \cdot 10^{26} / C_{0A1}^2 = 3,24 \cdot 10^{26} / (5 \cdot 10^{19})^2 = 1,3 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{с}$$

Диффузия коэффициентининг бу қийматига мос келадиган температура $D = f(T)$ графигидан топилади: $T_{A1} \approx 1065^\circ \text{C}$.

7. Эмиттер диффузияси режимини аниқлаш учун қуйидаги кўпайтмани топамиз:

$$D_B \cdot t_D = \frac{\left(\frac{3}{2} \right)^2}{4 \left[2,318 (C_{0A}/C_{0A1}) + \left(\frac{3}{2} \right)^2 / (4 D_{0A} t_D) - 0,3 \right]} = \frac{1,44 \cdot 10^{-8}}{4 \left[2,318 [1,2 \cdot 10^{21} / (3,3 \cdot 10^{18})] + 1,44 \cdot 10^{-8} / (4 \cdot 7,2 \cdot 10^{-6}) - 0,3 \right]} = 7,2 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2$$

8. Эмиттер диффузияси вақтини белгилаб оламиз: $t_d = 1$ соат, фосфорнинг диффузия коэффициентининг қиймати $D_d = 7,2 \cdot 10^{-10} / (60 \cdot 60) = 2 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{с}$. $D = f(T)$ графигидан фойдаланиб, бунга тўғри келадиган температурани аниқлаймиз: $T_d = 1125^\circ \text{C}$.

9. Эмиттер диффузияси вақтида бор концентрациясининг тақсимоти ўзгармас, деб қабул қилган фаразизмининг қанчалик тўғрилигини баҳолаймиз. $T = 1125^\circ \text{C}$ учун $D_{A1A} = 4 \cdot 10^{-13} \cdot 60 \cdot 60 = 1,44 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2$, $D_{A2A} = 7,3 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2$.

Шундай қилиб, $D_{A2A} \gg D_{A1A}$ тенгсизлик кераклича ба-жарилаялги.

Куйида эмиттер диффузияси жараёнида коллектор ўтишининг силжишини ҳисобга олиш кераклигига оид мисол келтирилган.

6-мисол. Электр ўтказувчанлиги p -тур бўлган кремнийнинг бошланғич эпитаксиал қатламидаги донорли киришманинг концентрацияси $C_D = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ҳамда $x^0 = 1 \text{ мкм}$, $x^k = 2 \text{ мкм}$, $C_{DA} = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $C_{AD} = 5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ бўлган ҳолат учун ион имплантация усули билан база соҳасини ҳосил қилиш учун киритилаётган бор атомлари миқдори ва киритиш режими T_{A2} , t_{A2} ион имплантация ёрдамида эмиттер соҳасини ҳосил қилиш учун киритиладиган фосфор атомлари миқдори ва киритиш режими T_{A1} , t_{A1} аниқлансин.

Ечилиш.

1. Базавий диффузияни кўриб чиқамиз. Эмиттер диффузияси вақтидаги юқори температуранинг таъсирини ҳисобга олиш учун куйидаги катталиқни киритамиз:

$$D_{A1A} = D_{A2A} + D_{A3A}$$

бу ерда $D_{A3} = T_D$ температурадаги борнинг диффузия коэф-фициенти. Кўпайтмани ҳисоблаймиз:

$$D_{A1A} = \frac{(x_{p-n}^k)^2}{4 \ln(C_{DA}/C_D)} = \frac{4 \cdot 10^{-8}}{4 \cdot 2,3 \lg(3 \cdot 10^{18} / (5 \cdot 10^{15}))} = 1,565 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2$$

2. Бирлик юзага киритилиши керак бўлган бор атомлари миқдори:

$$N_A = C_{DA} \sqrt{\pi D_{A1A}} = 3 \cdot 10^{18} \sqrt{3,14 \cdot 1,565 \cdot 10^{-9}} = 2,1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$$

3. Эмиттер диффузиясини кўриб чиқамиз. Фосфор атомлари ион имплантация усули ёрдамида киритилаётганлиги сабабли эмиттер диффузияси киришма миқдори чекланган қатламдан киритиш босқичига ўхшаш бўлади. Шу сабабли эмиттер ўтиши жойлашган чуқурлик Гаусс эгри чиққлари билан тасвирланадиган иккита тақсимогнинг тенглик шартидан топилади:

$$C_{AD} \exp\left(-\frac{(x_{p-n}^2)^2}{4 D_{A1A} t_{A1}}\right) = C_{DA} \exp\left(-\frac{(x_{p-n}^2)^2}{4 D_{A1A} t_{A1}}\right)$$

Бу ифодадан куйидаги кўпайтмани топамиз:

$$D_{A1} t_D = \left[\frac{\ln \left(\frac{C_{O1}}{C_{O2}} \right)}{(x_{p-n})^2} + \frac{1}{D_{A1}} \right] = \left[\frac{4.231 \cdot 5 \cdot 10^{20} \cdot 10^{-10}}{1 \cdot 10^{-10}} + \frac{1}{1.565 \cdot 10^{-9}} \right] t = 3.73 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2$$

4. Бирлик юзага киритилиши керак бўлган фосфор атомларининг миқдорини ҳисоблаймиз:

$$N_D = C_{O1} \sqrt{\pi D_{A1} t_D} = 5 \cdot 10^{20} \sqrt{3.14 \cdot 3.73 \cdot 10^{-10}} = 1.71 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$$

5. Эмиттер диффузиясининг температурасини қабул қиламиз:

$T_D = 1100^\circ \text{ С}$. Бу температурага тўғри келадиган фосфорнинг диффузия коэффициентини графикдан аниқлаймиз: $D_D = 1.1 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{с}$. Унда эмиттер диффузияси вақти

$$t_D = 3.73 \cdot 10^{-10} / D_D = 3.73 \cdot 10^{-10} / (1.1 \cdot 10^{-13}) = 3.39 \cdot 10^3 \text{ с} = 56.5 \text{ мин}$$

6. Базавий диффузиянинг режимларини аниқлаймиз. $T_D = 1100^\circ \text{ С}$ да борнинг диффузия коэффициенти $D_{A3} = 2.5 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{с}$ га тенг эканлигини $D = f(T)$ графикдан (6-илова) топилади. $D_{A2} t_{A2}$ кўпайтмани ҳисоблаймиз:

$$D_{A2} t_{A2} = D_{A1} t_D - D_{A3} t_D = 1.565 \cdot 10^{-9} - 2.5 \cdot 10^{-13} \cdot 3.39 \cdot 10^3 = 7.2 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2$$

7. Базавий диффузиянинг температурасини қабул қиламиз: $T_{A2} = 1150^\circ \text{ С}$. Бунга тўғри келадиган борнинг диффузия коэффициентини графикдан (6-илова) аниқлаймиз: $D_{A2} = 7.2 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{с}$. Базавий диффузиянинг вақти

$$t_{A2} = 7.2 \cdot 10^{-10} / D_{A2} = 7.2 \cdot 10^{-10} / (7.2 \cdot 10^{-13}) = 10^3 \text{ с} = 16 \text{ мин } 45 \text{ с.}$$

8. Базавий диффузиядан кейин ҳосил бўлган диффузияли базавий қатламнинг параметрларини баҳолаймиз. Борнинг сирт концентрацияси

$$C_{O1}^* = \frac{N_D}{\sqrt{\pi D_{A2} t_{A2}}} = \frac{2.1 \cdot 10^{14}}{\sqrt{3.14 \cdot 7.2 \cdot 10^{-10}}} = 4.4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$$

Коллектор утишининг жойлашган чуқурлиги

$$x_{p-n}^K = 2 \sqrt{D_{A1} t_D} \cdot 2.31 \lg \left(\frac{C_{O1}}{C_{O2}} \right) = 2 \sqrt{7.2 \cdot 10^{-10}} \cdot 2.31 \lg \left(\frac{4.4 \cdot 10^{18}}{5 \cdot 10^{15}} \right) \approx 1.4 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 1.4 \text{ мкм}$$

Шундай қилиб, базавий диффузиядан кейин борнинг сирт концентрацияси ва коллектор ўтишининг чуқурлиги талаб қилинган қийматларидан анчага фарқ қилиб, бу қийматларга эмиттер диффузиясидан кейингина эришилар экан.

Кўриб ўтилган 5- ва 6-мисоллар $D_{A_2}t_{A_2}$ ва $D_{A_2}t_d$ кўпайтмаларнинг нисбатларига боғлиқ ҳолда базавий диффузия натижасида ҳосил қилинган киришманинг тақсимотига эмиттер диффузиясининг таъсирини ҳисобга олиш кераклиги ёки керак эмаслигини кўрсатади.

3.4.5. ИОН ИМПЛАНТАЦИЯ УСУЛИ БИЛАН СТРУКТУРАЛАР ҲОСИЛ ҚИЛИШ

Ион имплантация усулида киришмаларнинг мусбат зарядли ионлари ион нурли тезлаткичда юқори тезликкача тезлаштирилиб кристалл сиртига бомбардимон қилиниб киритилади. Кристалл панжарасига киритилган киришма иони уни логирлайди ва шу вақтнинг ўзida радиацион бузилишлар ҳам ҳосил қилади. Киритилган ионлар концентрациясининг тақсимоти Гаусс эгри чизиги билан ифодаланади ва унинг асосий параметри тезланган ионларнинг югуриш йўли ҳисобланади. Кичик дозали нурланишда ҳосил бўладиган радиацияли бузилишлар ярим ўтказгичнинг кристалл структурасини бузмайди, бироқ киришма атомларининг катта дозаси билан нурланганда кристалл аморфланади. Мана шу бузилишларни йўқотиш ва киритилган киришма атомларини активлаш учун кристалл қиздирилади.

Ион имплантация усули киритиш (загонка) босқичи технологиясида киришма атомларининг аниқ ўлчанган миқдорини киритишда кенг қўлланилмоқда. Булар эса киришма профилини шакллантириш учун ўтказиладиган кейинги диффузион тарқатиш (разгонка) босқичида киришма манбаи бўлиб хизмат қилади. Бундан ташқари биполяр транзисторларда юлқа база соҳасини ҳосил қилиш, МДП - транзисторларида бўсага қучланишини бошқариш ва бошқа мақсадлар учун имплантация фойдаланилади.

Ион имплантацияли структураларни назорат қилиш учун киритилган атомларнинг профил тақсимоти текширилади ва заряд ташувчиларнинг эффектив сирт концентрацияси ўлчанади.

Имплантация тўғрисида физик тушунчалар. Ион имплантация усулининг моҳияти энергиялари 10 КэВ дан 1 МэВ гача бўлган тезланган ионларнинг нурли оқими билан қаттиқ жисмларнинг хоссалари ва структураларини ўзгартириш мақсадида уларни бомбардимон қилишдир.

Имплантация жараёнидаги асосий ҳодисалар. Тезланган ионлар атом ядросидаги мусбат зарядларнинг итарувчи кучларини енгиб кристалл панжарага кириб боради. Бунда ионларнинг кириш чуқурлиги уларнинг энергияси ошиб бориши билан ортиб боради. Енгил ионлар оғир ионларга қараганда чуқурроққа киради, бироқ оғир ионларнинг ҳаракат траекториялари тўғри чизиққа яқинроқдир. Ионларнинг имплантацияси давомида радиацияли нуқсонлар йиғилиб боради. Киритилган ионларнинг кўпчилиги тугун оралиғида жойлашади ва электр жиҳатдан ноактив ҳисобланади. Уларни тугунга ўтказиш, яъни активлаш учун ярим ўтказгичлар қиздирилади (отжиг). Қиздириш жараёни давомида радиацияли нуқсонлар парчаланади ва киритилган киришмалар вакант тугунларга жойлашади, бунинг натижасида ўтказувчанлиги p - ёки n -турли бўлган қатлам ҳосил бўлади.

Ионнинг ўртача тўлақ югуриши. Ионларнинг моддага кириш чуқурлиги югуриш йўли билан характерланади. Алоҳида ионнинг траекторияси синиқ чизиқ каби бўлади ва бундаги ҳар бир тўғри чизиқли қисм ва тўла узунлик ҳар хил бўлади. Шу сабабли ҳар бир ионнинг югуришларининг жамланмаси тасодикий катталиклар тақсимотининг нормал қонуни бўйича ўртача тўла югуриш йўли R ва югуриш йўлининг ўртача квадратик оғиши ΔR қийматлари билан гуруҳланади. Амалда ионнинг бошланғич тезлиги йўналишидаги проекциялари бўлган ўртача нормал югуриш йўли R_p ва унинг ўртача квадратик оғиши ΔR_p аҳамиятга эга.

3.2-жадвалда кремнийда 20-200 КэВ энергияли бир неча ионлар учун ўртача нормал югуриш ва югуришнинг стандарт оғишларининг қийматлари нанометрда келтирилган.

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
40	R_p	161	56	49	27	23
	ΔR_p	54	19	16.4	6.2	3.8
60	R_p	244	85	73	38	31
	ΔR_p	71	27	23	8.4	5.1
80	R_p	324	114	98	48	38
	ΔR_p	84	35	30	10.5	6.3
100	R_p	398	144	123	58	46
	ΔR_p	94	42	35	12.5	7.4
120	R_p	469	175	149	68	53
	ΔR_p	102	48	41	14.5	8.4
140	R_p	537	205	175	79	60
	ΔR_p	110	54	47	16	9.5
160	R_p	605	236	201	89	67
	ΔR_p	116	60	52	18	10.5
180	R_p	665	266	228	99	74
	ΔR_p	121	60	57	20	11.5
200	R_p	725	297	254	110	81
	ΔR_p	126	70	61	22	12.5

Киририлган ионлар югуришларининг тақсмоти. Киририлган ионлар тақсмотининг профили нурланган қатлам чуқурлиги бўйича ўртача нормал чопиш йўли тақсмотининг характери билан аниқланади. Агар ионлар оқими ихтирий сирт юзасига тушса ноориентирланган тушиш дейилади. Бундай ҳолда киририлган атомларнинг тақсмоти Гаусс эгри чизиги билан ифодаланади:

$$C(x) = \frac{N}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - R_p}{\Delta R_p}\right)^2\right] \quad (3.30)$$

Бунда киршмалар концентрациясининг максимуми диффузия усулидагидан фарқли ўлароқ, сиртда эмас, балки $x = R_p$ чуқурликда ётади:

$$C_{\max} = \frac{0.4 N}{\Delta R_p} \quad (3.31)$$

$R_p \pm \Delta R_p$ чуқурликдаги концентрациянинг максимал концентрацияга нисбати:

$$\frac{C(R_p \pm \Delta R_p)}{C_{\text{max}}} = \frac{1}{\sqrt{e}} = 0,607 \quad (3.32)$$

Бундан югуришларнинг дисперсиясини (стандарт оғиш) тажриба йўли билан ҳосил қилинган тақсимот профилидан аниқлашда фойдаланилади.

Ион имплантация режимлари. Ион имплантация режимларини аниқлашдаги асосий параметрлар *тезланган ионларнинг энергияси* ва *нурланиш дозаси* ҳисобланади. Заряди q (Кл) бўлган ион потенциаллар фарқи U (В) таъсирида E (Ж) энергияга эга бўлади:

$$E = qU. \quad (3.33)$$

Амалда тезланган ионларнинг энергияси электрон-вольт (эВ) ёки килоэлектрон-вольтларда ифодаланади (КэВ). Агар ионлашиш даражаси $n = 1, 2, 3$ электрон бўлса, ионнинг заряди 1 дан 3е гача ўзгаради. Умумий ҳолда

$$q = ne. \quad (3.34)$$

Ионлашиш даражасини белгилаш учун «+» симболидан фойдаланилади. Масалан $^{31}\text{P}^+$, $^{31}\text{P}^{++}$, $^{31}\text{P}^{+++}$ каби. Бу ерда 31 сони фосфор ионининг атом массасини кўрсатади.

Нурланиш дозаси деганда берилган вақт ичида бирлик юзани бомбардимон қилаётган заррачалар миқдори тушунилади. Нурланиш дозаси Q (Кл/м²) ион токининг зичлиги j (А/м²) ва нурланиш вақти t (с) билан аниқланади:

$$Q = jt. \quad (3.35)$$

Дозани бирлик сиртга киритилган заррачалар миқдори (ион/м²) орқали ифодалаш учун Q нинг катталиги битта ионнинг зарядига бўлинади:

$$N = Q/q = jt / (en). \quad (3.36)$$

Электроннинг заряди $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл эканлигини эътиборга олсак, Q нинг ўлчамлари мкКл/см² бўлса, нурланиш дозаси (ион/см²):

$$N = 6,25 \cdot 10^{12} Q/n \quad (3.37)$$

Ион имплантация усули планар технологияда асосий ҳисобланиб, у ионларнинг дозали миқдори кўринишидаги киришмалар киритиш босқичини диффузияли тарқатиш босқичи билан бирга ўтказиш имкониятини беради. Серияли ишлаб чиқаришда ион имплантация усулининг фойдаланилиши асосланадиган асосий устунлиги шундаки, пластина сиртига киритилаётган киришма миқдорини аниқ назорат

қилиш мумкинлиги ва сиртнинг юқори даражада бир жинсли легирланишидир.

Ион имплантация қилинган қатламдан киришмаларнинг диффузияси. Кичик дозали $Q \leq 10^2$ мкКл/см² нурланишлар учун ион-имплантация усули билан легирланган қатламдан киришмаларнинг диффузиясини киришманинг миқдори чекланган манбадаги каби бўляпти деб қабул қилиш мумкин:

$$C(x, t) = \frac{N}{\sqrt{\pi Dt}} \exp \left(-\frac{x^2}{4Dt} \right) \quad (3.38)$$

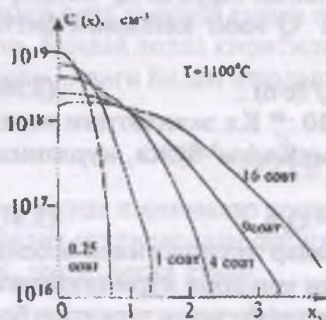
Фақат бу тенгламада имплантация билан ҳосил қилинган киришманинг аввалги тақсимотини ҳисобга олиш керак бўлади. Бунда қўшма тақсимот қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$C(x, t) = \frac{N}{\sqrt{\pi (\sqrt{2} \Delta R_p + \sqrt{Dt})}} \exp \left[-\left(\frac{x - R_p}{\sqrt{2} \Delta R_p + 2\sqrt{Dt}} \right)^2 \right] \quad (3.39)$$

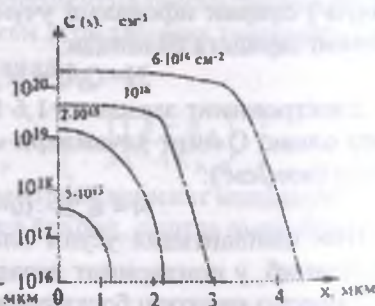
Имплантациядан кейин ҳамда паст температурали куйдиришдан (отжиг) кейин $\sqrt{Dt} \ll \Delta R_p$ бўлганлиги учун (3.39) ифодали тақсимот (3.30) билан ифодаланган тақсимотга мос келади:

$$C(x, t) = \frac{N}{\sqrt{2\pi \cdot \Delta R_p}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - R_p}{\Delta R_p} \right)^2 \right] \quad (3.40)$$

Юқори температурали диффузияли тарқатишдан кейин



3.20-расм. Кремнийда борнинг тарқатилишдан кейинги тақсимот профили.



3.21-расм. Кремнийда фосфорнинг тақсимот профили.

$\sqrt{Dt} \gg \Delta R_p$, $R_p \ll x$ бўлгани учун (3.39) тақсимот диффузияли тақсимот каби бўлади ва (3.5) ифода билан аниқланади.

Агар $\sqrt{Dt} = \Delta R_p$ бўлса, унда киришмалар тақсимои (3.39) тенглама асосида қурилади.

3.20-расмда аргон атмосферасида 1100°C температурада $0,25 \div 16$ соат давомида тарқатилган бор концентрацияси тақсимотининг профили келтирилган. Бор $N = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ дозада ва $E = 30 \text{ кэВ}$ энергияда имплантация қилинган. Агар $D = \text{const}$ бўлса, унда p - n ўтишининг жойлашган чуқурлигини қуйидаги ифода орқали ҳисоблаш мумкин:

$$x_{p-n} = 2\sqrt{Dt} \sqrt{\ln\left(\frac{C_0}{C_B}\right)} \quad (3.41)$$

Катта дозада нурлантирилиб ҳосил қилинган қатламлардан диффузия қилинаётганда (3.41) тенглик бузилади. 3.21-расмда $E = 40 \text{ кэВ}$ энергияда ва $5 \cdot 10^{13}$ дан $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ гача бўлган доза оралиғида киритилган фосфор қурилган азот атмосферасида 1150°C температурада, $1,5$ соат давомида тарқатилгандан кейинги профили келтирилган.

Ион имплантацияли структураларни ҳисоблаш усуллари. Ион имплантацияли структураларни технологик ҳисоблашларда ҳам диффузиядагига ўхшаб тўғри ва тескари масалалар учрайди. Тўғри масалада берилган ион, энергия ва нурланиш дозаси асосида концентрациянинг тақсимот профилини қуриш керак бўлади. Бунда тақсимот профили юқоридаги (3.30) ифода билан тавсифланади ва уни қуриш R_p ва ΔR_p ларни жадвалдан ёки ҳисоблаб топишга асосланади. Транзисторли структуралар учун профил қуриш анча мураккаб бўлиб, бу ерда икки марта имплантация ўтказиш керак бўлади.

Структураларга иккиланган имплантация билан киритилган киришмалар концентрациясининг тақсимот профилини ҳисоблаш. Тури p - p - n бўлган транзистор яратиш учун электр ўтказувчанлиги n — турли бўлган эпитаксиал қатламга база соҳасини ҳосил қилиш учун энергияси E_A ва дозаси N_A бўлган акцептор киришмаси ионлари ва эмиттер соҳасини шакллантириш учун энергияси E_D ва дозаси N_D бўлган донор киришмаси ионлари кетма-кет имплантация қилинмоқда. Бунда қуйидаги тенгсизликлар бажарилган:

$$1) R_{PA} > R_{PD}, \quad 2) C_{\max A} < C_{\max D}$$

Киришмаларнинг якуний тақсимои куйидагича ифодаланади:

$$C(x) = C_{\max A} \exp \left[- \left\langle (x - R_{PA}) / (\sqrt{2} \Delta R_{PA}) \right\rangle^2 \right] - C_{\max D} \exp \left[- \left\langle (x - R_{PD}) / (\sqrt{2} \Delta R_{PD}) \right\rangle^2 \right] - C_B. \quad (3.42)$$

Коллектор p-n ўтишининг жойлашган чуқурлиги куйидаги шарт бўйича аниқланади:

$$C_{\max A} \exp \left[- \left(\frac{x_{p-n}^K - R_{PD}}{\sqrt{2} \Delta R_{PD}} \right)^2 \right] - C_B = 0 \quad (3.43)$$

$$\text{Бундан} \quad x_{p-n}^K = R_{PD} + \Delta R_{PD} \sqrt{2 \ln(C_{\max A} / C_B)} \quad (3.44)$$

$$\text{бу ерда,} \quad C_{\max A} = N_A / (\sqrt{2} \Delta R_{PA}) \quad (3.45)$$

Эмиттер p-n ўтишининг чуқурлиги $C(x_{p-n}^3) \geq C_B$ ни ҳисобга олган ҳолда куйидаги шартдан аниқланади:

$$C_{\max A} \exp \left[- \left(x_{p-n}^3 - R_{PA} \right) / (\sqrt{2} \Delta R_{PA}) \right]^2 = C_{\max D} \exp \left[- \left(x_{p-n}^3 - R_{PD} \right) / (\sqrt{2} \Delta R_{PD}) \right]^2$$

$$\text{бундан} \quad x_{p-n}^3 = \left(-m + \sqrt{m^2 - ac} \right) / a \quad (3.46)$$

$$\text{бу ерда,} \quad a = \Delta R_{PD}^2 - R_{PA}^2, \quad m = -R_{PA} \cdot \Delta R_{PD}^2 + R_{PD} \cdot \Delta R_{PA}^2$$

$$c = R_{PA}^2 \cdot \Delta R_{PD}^2 - R_{PD}^2 \cdot \Delta R_{PA}^2 - 2 \Delta R_{PA}^2 \cdot \Delta R_{PD}^2 \ln \frac{N_A \Delta R_{PD}}{N_D \Delta R_{PA}}$$

Агар $C(x_{p-n}^3) \approx C_B$ тенгликдан келиб чиқадиган бўлсак, унда эмиттер ўтишининг чуқурлиги x_{p-n}^3 ни тахминан куйидаги ифода ёрдамида аниқлаш мумкин:

$$x_{p-n}^3 \approx R_{PD} + \Delta R_{PD} \sqrt{\ln \left(\frac{C_{\max D}}{C_B} \right)} \quad (3.47)$$

$$\text{База соҳасининг қалинлиги:} \quad \omega \approx x_{p-n}^K - x_{p-n}^3 \quad (3.48)$$

1-мисол. Электр ўтказувчанлиги n-турли бўлган кремнийга бор $^{11}\text{B}^+$ ва фосфор $^{31}\text{P}^+$ ионларининг имплантацияси натижасида транзисторли структура ҳосил қилинган. Агар $C_B = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $E_A = 100 \text{ КэВ}$, $N_A = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $E_D = 200 \text{ КэВ}$, $N_D = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ бўлса, киришмалар концентрациясининг тақсимои профили ҳисоблансин.

Ечиш:

1. 3.2-жадвалдан 100 КэВ энергияли бор иони учун $R_{pA} = 0,398$ мкм, $\Delta R_{pA} = 0,094$ мкм, 200 КэВ энергияли фосфор иони учун $R_{pD} = 0,254$ мкм, $\Delta R_{pD} = 0,061$ мкм эканлигини топамиз.

2. Бор ва фосфорнинг максимал концентрацияларини ҳисоблаймиз:

$$C_{\max A} = \frac{0,4 \cdot N_A}{\Delta R_{pA}} = \frac{0,4 \cdot 5 \cdot 10^{13}}{0,094 \cdot 10^{-4}} = 2,12 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$$

$$C_{\max D} = \frac{0,4 \cdot N_D}{\Delta R_{pD}} = \frac{0,4 \cdot 1 \cdot 10^{15}}{0,061 \cdot 10^{-4}} = 6,55 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$$

3. Коллектор ва эмиттер p-n ўтишларининг жойлашган чуқурлигини топамиз:

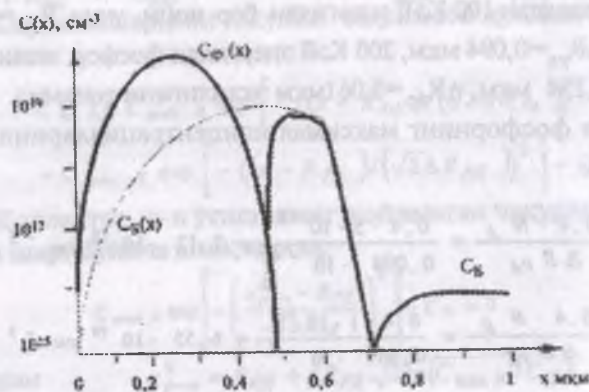
$$x_{p-n}^K = R_{pA} + \Delta R_{pA} \sqrt{2 \ln \frac{C_{\max A}}{C_B}} = 0,398 + 0,094 \sqrt{4,6 \lg \frac{2,12 \cdot 10^{18}}{1 \cdot 10^{16}}} = 0,705 \text{ мкм}$$

$$x_{p-n}^E = R_{pD} + \Delta R_{pD} \sqrt{2 \ln \frac{C_{\max D}}{C_B}} = 0,254 + 0,061 \sqrt{4,6 \lg \frac{6,55 \cdot 10^{19}}{1 \cdot 10^{16}}} = 0,510 \text{ мкм}$$

База соҳасининг қалинлиги:

$$\omega \approx x_{p-n}^K - x_{p-n}^E = 0,705 - 0,510 \approx 0,2 \text{ мкм}$$

4. (3.42) ифодадан фойдаланиб p-p-n транзистор структурадаги акцептор ва донор киришмаларнинг якуний тақсимодини қурамыз. 3.22-расмда бу тақсимоат узлуксиз чизик сифатида кўрсатилган. Шу расмнинг ўзида киритилган бор $C_B(x)$ ва фосфор $C_P(x)$ атомларининг тақсимоати алоҳида кўрсатилган. Бу расмдан кўриниб турибдики, эмиттер ўтишининг ҳолатини аниқловчи содда формула кераклича аниқ натижа берар экан.



3.22-расм. п-р-п транзисторда бор ва фосфорнинг тақсимооти.

Икки қатламли структураларда киришмалар концентрациялари тақсимотини ҳисоблаш. МОЯ (МОП)-структураларни ҳосил қилишда кремнийга киришмалар кўпинча диоксид юпқа қатлами орқали имплантация қилинади. Икки қатламли структуралар SiO_2 — Si нинг бўлиниш чегарасида уларнинг тормозлаш хусусиятларининг ҳар хилиги туфайли киришмаларнинг концентрациялари сакраб ўзгаради. Икки қатламли структураларда тақсимот профилини назарий қуриш учун қуйидагича мулоҳаза юритамиз. Бизга N доза билан нурлантирилган структуранинг алоҳида компонентлари SiO_2 ва Si даги ионлар тақсимотиниң профилилари маълум бўлсин. SiO_2 даги профилда оксид юпқа қатламининг қалинлиги d_1 тенг чуқурликда қирқим ўтказамиз. Бу қирқимнинг чап ва ўнг томонларида ётган атомлар микдорини мос ҳолда N_1 ва N_2 билан белгилаймиз. Si нинг профилида ҳам d_1 чуқурликда шундай қирқим ўтказамизки, бунда $N'_1 = N_1$ ва $N'_2 = N_2$ бўлсин.

Агар югуришлар ва стандарт четга оғишларнинг SiO_2 қатламдаги R_{p1} ва ΔR_{p1} , Si қатламдаги R_{p2} ва ΔR_{p2} ларнинг қийматлари маълум бўлса, бу тақсимотни аналитик равишда қуриш мумкин. Кремнийга киритилган киришма концентрациясининг тақсимот профилини қуриш учун диоксид юпқа қатламида $x=0$ дан $x=d_1$ гача бўлган қисмидаги тормозланаётган ионларнинг дозаси N_1 ни аниқлаш керак:

$$N_1 = \int_0^{d_1} C(x) dx = \frac{N}{\sqrt{2\pi\Delta R_{p1}}} \int_0^{d_1} \exp\left[-\left(\frac{x - R_{p1}}{\sqrt{2\Delta R_{p1}}}\right)^2\right] dx = \frac{N}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \frac{d_1 - R_{p1}}{\sqrt{2\Delta R_{p1}}}\right) \quad (3.49)$$

Оксид орқали кремнийга ўтган ионлар дозаси:

$$N_2 = N - N_1 \quad (3.50)$$

Диоксид юпқа қатлами бўлмагандаги ионлар дозаси $N_1' = N_1$ кремнийда $x = 0$ дан $x = d_1$ гача бўлган чуқурликда мавжуд бўлади:

$$N_1' = \frac{N}{\sqrt{2\pi\Delta R_p}} \int_0^{d_1} \exp\left[-\left(\frac{x - R_{p2}}{\sqrt{2\Delta R_{p2}}}\right)^2\right] dx = \frac{N}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \frac{d_1 - R_{p2}}{\sqrt{2\Delta R_{p2}}}\right)$$

(3.49) ва (3.51) ифодаларни бир бирига тенглаб қуйидагини ҳосил қиламиз:

$$\operatorname{erf} \frac{d_1 - R_{p1}}{\sqrt{2\Delta R_{p1}}} = \operatorname{erf} \frac{d_1 - R_{p2}}{\sqrt{2\Delta R_{p2}}}$$

Бу тенглик ўринли бўлиши учун erf-функцияларнинг аргументлари ҳам бир-бирига тенг бўлиши керак:

$$\frac{d_1 - R_{p1}}{\sqrt{2\Delta R_{p1}}} = \frac{d_1 - R_{p2}}{\sqrt{2\Delta R_{p2}}} \quad (3.52)$$

Бундан ионларнинг $N_1' = N_1$ дозаси тормозланадиган кремнийдаги эквивалент қатламнинг қалинлигини топамиз:

$$d_2 = R_{p2} + (d_1 - R_{p1}) \frac{\Delta R_{p2}}{\Delta R_{p1}} \quad (3.53)$$

Кремнийга киритилган киришманинг тақсимотини қуришда координаталар боши кремний сиртида деб, қабул қилинади. Шу сабабли тақсимоот профили Гаусс эгри чизиги сифатида қуйидагича ифодаланади:

$$C(x) = \frac{0.4N}{\Delta R_{p2}} \exp\left[-\left(\frac{x + d_2 - R_{p2}}{\sqrt{2\Delta R_{p2}}}\right)^2\right] \quad (3.54)$$

2-мисол. Энергияси 40 КэВ ва нурланиш дозаси $6,2 \cdot 10^{13}$ см² бўлган бор ионлари қалинлиги $d_1 = 0,2$ мкм бўлган диоксид юпқа қатлами орқали кремнийга киритилмоқда. Кремнийдаги бор ионлари концентрациясининг тақсимооти қурилсин.

Ечиш:

1. Кремний учун 3.2-жадвалдан, кремний диоксида учун 3.3-жадвалдан қуйидагиларни аниқлаймиз: $R_{p1} = 0,142$ мкм, $\Delta R_{p1} = 0,04$ мкм, $R_{p2} = 0,161$ мкм, $\Delta R_{p2} = 0,054$ мкм.

2. (3.53) формула ёрдамида кремнийдаги эквивалент қатламнинг қалинлигини топамиз:

$$d_2 = 0.161 + (0.2 - 0.142) \frac{0.054}{0.040} = 0.239 \text{ мкм}$$

3. Бор тақсимоти профиллари учун ҳисоблаш формулаларини ёзамиз:

кремнийда

$$C(x) = \frac{0.4 \cdot 6.2 \cdot 10^{13}}{0.054 \cdot 10^{-4}} \exp \left[- \left(\frac{x + 0.239 - 0.161}{\sqrt{2 \cdot 0.054}} \right)^2 \right] = 4.6 \cdot 10^{18} \exp \left[- \left(\frac{x + 0.078}{0.0765} \right)^2 \right]$$

кремний диоксидида

$$C(x) = \frac{0.4 \cdot 6.2 \cdot 10^{13}}{0.04 \cdot 10^{-4}} \exp \left[- \left(\frac{x - 0.142}{\sqrt{2 \cdot 0.04}} \right)^2 \right] = 6.2 \cdot 10^{18} \exp \left[- \left(\frac{x - 0.142}{0.0566} \right)^2 \right]$$

4. Ҳисоблаш формулалари асосида икки қатламли структурадаги борнинг тақсимот профилини курамиз (3.23-расм).

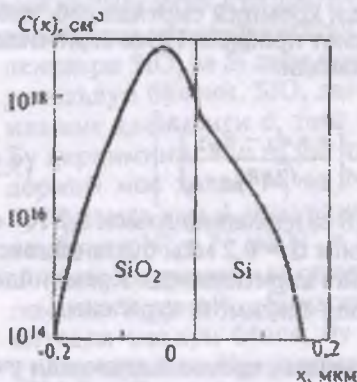
5. (3.45) формула ёрдамида диоксид юпқа қатламида қоладиган бор ионларининг дозасини топамиз:

$$N_1 = \frac{6.2 \cdot 10^{13}}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \frac{0.2 - 0.142}{\sqrt{2 \cdot 0.04}} \right) = 5.75 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$$

6. Кремнийга ўтган бор ионларининг дозаси:

$$N_2 = N - N_1 = 6.2 \cdot 10^{13} - 5.75 \cdot 10^{13} = 4.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2},$$

яъни кремнийга тўлиқ нурланиш дозасининг 0,1 қисмидан ҳам кичик қисми ўтган.



3.23-расм. SiO_2 -Si структурада борнинг тақсимоти

3.3-жадвал

M_1	Е., КэВ	R_p , нм	ΔR_p , нм
^{11}B	20	69	24
	40	142	40
	100	339	67
	140	453	78
^{75}As	40	35	12.5
	80	52	18
	150	83	29

Имплантация режимларини аниқлаш. Биз юқорида ион-имплантацияли структураларни ҳисоблашга доир амалиёт-да кўп учрайдиган тўғри масалаларни ечиш намуналарини кўриб чиқдик. Тескари масалаларни ечиш анча мураккаб бўлиб, улар ионларнинг берилган ўртача нормал югуриш-ларини ҳосил қилишга керак бўладиган энергияни аниқ-лашга ёки берилган киришма концентрациясини таъмин-лайдиган нурланиш дозасини аниқлашга олиб келинади.

Берилган югуришни ҳосил қилишга керак бўладиган ионлар энергиясини аниқлаш. Югуриш билан энергия орасидаги боғла-нишни ҳисоблашга доир формулаларни келтириб чиқариш анча мураккаб бўлганлиги сабабли бу масалани ечишда энг оддий бўлган усулдан, яъни 3.1-жадвалдан фойдаланилади. Бу жадвал ёрдамида $R_p = f(E)$ боғланиш қурилади ва шу асосда берилган югуриш учун керакли энергиянинг қиймати топилади.

Масалан, $R_p = 398$ мкм берилган бўлса, унда бу югу-ришни таъминлаш учун бор ионининг энергияси $E = 100$ КэВ бўлиши керак ва ҳоказо.

Берилган киришма концентрациясини ҳосил қилиш учун нурланиш дозасини ҳисоблаш. Киритилаётган киришманинг тақсимот профили Гаусс эгри чизиги билан ифодаланган-лиги сабабли уни қуриш учун ўртача нормал югуриш R_p , югуришнинг ўртача квадратик оғиши ΔR_p ва нурланиш дозаси N ларни билиш керак. Одатда бу учта параметрнинг ҳаммаси номаълум. Маълум бўлганларга p - n ўтишнинг жой-лашган чуқурлиги x_{p-n} , киришманинг максимал концентра-цияси C_{max} ва ярим ўтказгич пластинасидаги бошланғич киришманинг концентрацияси C_B кабилар киради.

p - n ўтиш жойлашган чуқурликнинг ифодаси (3.30) дан $C(x)=0$ га тенглаб топилади:

$$x_f = R_p + \Delta R_p \sqrt{2 \ln \left(\frac{C_{max}}{C_B} \right)} \quad (3.55)$$

Нурланиш дозаси қуйидаги ифода ёрдамида ҳисобланади:

$$C_{\max} = \frac{0,4N}{\Delta R_p} \text{ ёки } N = 2,5\Delta R_p C_{\max}$$

Югуришларнинг стандарт оғишлари ΔR_p ни аниқлаш учун график ечимдан фойдаланамиз. Энергиянинг бир неча қийматларини берамиз, уларга тўғри келадиган ΔR_p ва R_p нинг қийматларини топамиз ва (3.55) тенгламанинг ўнг томонининг энергия бўйича боғланишини қурамиз. Шундан кейин энергия ўқиға параллел равишда x_{p-n} нинг берилган қиймати бўйича тўғри чизиқ ўтказамиз, яъни (3.55) тенгламанинг чап томонини қурамиз. (3.55) тенгламанинг ўнг ва чап қисмларининг кесишган нуқтаси изланаётган энергия E нинг қийматини беради. Топилган энергия учун югуришнинг стандарт оғиши ΔR_p ни аниқлаймиз ва нурланиш дозасини ҳисоблаймиз.

3-мисол. Электр ўтказувчанлиги p — турли ва $C_p = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ бўлган кремнийга фосфорнинг имплантацияси ёрдамида $x_{p-n} = 0,3 \text{ мкм}$ чуқурликда p - n ўтишни ҳосил қилиш учун ионларнинг энергияси ва нурланиш дозаси аниқлансин. Бунда $C_{\max} = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ га тенг бўлиши таъминлансин.

Ечиш:

(3.51) тенгламага биноан,

$$x_j = R_p + \Delta R_p \sqrt{4,6 \lg \frac{5 \cdot 10^{19}}{1 \cdot 10^{16}}} = R_p + 4,12 \Delta R_p$$

2. $R_p + 4,12\Delta R_p$ нинг энергия бўйича 80-160 КэВ оралиқдаги боғланишини 3.2-жадвалдан фойдаланиб қурамиз (3.24-расм). Шу расмда $x_{p-n} = 0,3 \text{ мкм}$ чизигини ўтказамиз ва кесишган нуқтаси бўйича $E = 113 \text{ КэВ}$ эканлигини аниқлаймиз. Амалий мақсадларда қулайлик учун ионларнинг энергияси 5 ёки 10 га бўлинадиган қилиб танглаб олинади. Шу сабабли $E = 110 \text{ КэВ}$ деб қабул қиламиз.

3. Итерполяцияни қўллаб 3.2-жадвалдан $E = 110 \text{ КэВ}$ учун $R_p = 136 \text{ нм}$, $\Delta R_p = 38 \text{ нм}$ эканлигини топамиз.

4. Нурланиш дозасини топамиз:

$$\begin{aligned}
 N' &= 2,5 \Delta R_p C_{\text{max}}^* = \\
 &= 2,5 \cdot 3,8 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^{19} = \\
 &= 4,75 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}
 \end{aligned}$$

Транзистор структурасини ҳосил қилиш учун имплантация режимларини ҳисоблаш. Бу ҳисоблашни бажаришда юқорида кўрилган усуллардан фойдаланилади. Бунини аниқ мисолда кўриб чиқамиз.

4-мисол. Структурасининг гури p-p-n, база соҳасининг қалинлиги $w = 0,1 \text{ мкм}$, эмиттер ўтишининг чуқурлиги $x_{p-n} = 0,2 \text{ мкм}$ бўлган транзистор кремнийда ҳосил қилинмоқда. Бунда эпитаксиал қатламдаги донорларнинг концентрацияси $C_B = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ва акцептор ҳамда донор киришмаларнинг максимал концентрациялари $C_{\text{maxA}} = 3 \cdot 10^{18}$, $C_{\text{maxD}} = 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ га тенг. Эмиттер ва база соҳалари мос равишда фосфор ва борини имплантация қилиб ҳосил қилинмоқда. Мана шу имплантацияларнинг режимлари аниқлансин.

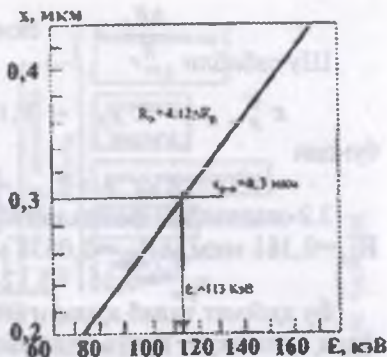
Ечиш:

Ион имплантация режимлари N_A , N_D дозалар ва E_A , E_D энергиялар билан аниқланади. Бу масалани умумий кўринишда ечиш мумкин эмас. Шу сабабли бир қатор соддалаштирилган нисбатларни киритамиз.

1. Коллектор p-n ўтишининг жойлашган чуқурлигининг ифодасини ёзамиз:

$$x_{p-n} = R_{\text{A1}} + \Delta R_{\text{A1}} \sqrt{\frac{C_{\text{maxA}}}{C_B}} = R_{\text{A1}} + \Delta R_{\text{A1}} \sqrt{\frac{3 \cdot 10^{18}}{(2 \cdot 10^{16})}} = R_{\text{A1}} + 3,16 \Delta R_{\text{A1}}$$

Массалари $M_1 > M_2$ бўлган ионлар учун 20-100 КэВ энергиялар оралиғида югуриш ва югуришнинг стандарт оғишлари ўртасида қуйидаги тахминий нисбатлар ўринли бўлади:



3.24-расм. Ионларнинг энергиясини график усулда топиш.

ларнинг ишлашида ионлаштирувчи нурланишнинг (нейтрон ва гамма — нурланишлар) ҳосил бўлишидир; 2) ишлаш режими; 3) ҳосил бўлаётган нурланишнинг тўлқин узунлиги: рентген ($3 \cdot 10^{-3}$ — $3 \cdot 10^{-7}$ мкм), ультрабинафша (0,2 — 0,4 мкм) кўринадиган ёруғлик (0,4 — 0,7 мкм), яқин инфрақизил (0,7 — 1,4 мкм), инфрақизил ($1,4 \cdot 10^2$ мкм), субмиллиметрли (10^2 — 10^3 мкм); 4) актив элементи: қаттиқ жисмли (рубин, шиша, активланган неодим, алюмоиттрийли гранат, пластмассалар), ярим ўтказгичли (ZnS , ZnO , CaSe , Te , PbS , GaAs ва бошқалар), суюқ (хамёб ерли активлаштирувчи ёки органикли бўёвчилар билан), газли (He — Ne , аргон, криптон, ксенон, неон, He — Cd , CO , ва бошқалар), газдинамики (CO_2 , N_2 , H_2O ва бошқалар); 5) инверс аҳолини ҳосил қилиш усули (накачка — дамлаш); 6) иссиқликни олиб кетиш усули; 7) қандай ишга мўлжалланганлиги; 8) конструктив жиҳатдан тайёрланганлиги.

Технологик жараёнда лазерларнинг қўлланилиши. Квант электроникаси соҳасида кўп йиллик фундаментал тадқиқотлар натижасида ўтган аср олтинчи йилларининг бошида биринчи лазерлар пайдо бўлди ва улардан янги технологик жараёнларда кенг фойдалана бошланди.

Бу қурилмаларнинг ишлаши 1917 йилда А. Эйнштейн томонидан кашф қилинган индуцирланган нурланиш ҳодисаси ва уни В. А. Фабрикант томонидан кўрсатилган электромагнит тўлқинларни кучайтириш учун қўллаш мумкин эканлигига асосланган.

Лазерларнинг хусусияти шундаки, улардан нурланаётган ёруғлик шунгача бўлган ҳар қандай энергетик манбада ҳосил қилиб бўлмайдиган хоссаларга эга. Бу хоссаларга биринчи навбатда нурланишнинг монохроматиклиги бўлиб, у юқори даражадаги когерентлик билан узвий боғланган. Иккинчидан, нурланишнинг қуввати бўлиб, у замонавий лазерларда импульсда юзлаб гигаватт ва узлуксиз режимда эса юзлаб киловаттга етади. Учинчидан, кўпинча асосий характеристикаси деб ҳисобланадиган нурланишнинг ингичга даста кўринишда йўналишидир.

Мана шу хоссалари туфайли лазерлар фан ва техникада кенг қўлланилмоқда (алоқа, локация, ўлчаш техникаси, голография, молдани ички структурасини текширишда, бир томонга йўналган кимёвий реакцияни амалга оширишда, изотопларни ажратишда, термоядровий синтезда, медицинада ва ҳоказо).

Лазер нурланишининг жуда кичик бурчакда тарқалиши уни кичик юзаларда (тўлқин узунлиги билан ўлчанадиган) фокуслаш имкониятини беради. Бунинг натижасида материални энергиянинг фокуслашган нуқтасида локал қиздира оладиган, уни буғлантириб юбора оладиган ва ишлов берилаётган соҳадан олиб кетадиган даражадаги интенсив ёруғлик оқимининг қувватли зичлигини ҳосил қилиш мумкин.

Технологик жараёнларда узлуксиз ёки импульсли режимларда ишлайдиган лазерлардан фойдаланиш мумкин. Алоҳида қисқа импульслар кўринишидаги нур генерация қиладиган лазерлардан (одатда қаттиқ жисмли лазерлар) тирқиш ҳосил қилишда, нуқтали пайвандлашда ва бошқа катта юзали ишловни талаб қилмайдиган технологик операцияларда фойдаланилади. Узлуксиз режимда ишлайдиган лазерлар (асосан газли лазерлар) тезкор кесишда, чокли пайвандлашда ва катта ўлчамли маҳсулотларга термик ишлов беришда қўлланилади.

Ҳозирги даврда лазерли технологиянинг асосий назарияси ва амалиёти кераклича яхши ўрганилган. Айниқса, материалларга ишлов беришда, электрон асбоблар ва қурилмалар ишлаб чиқаришда, умуман ярим ўтказгичлар технологияси учун технологик режимлар ва уларни амалга оширишда лазерли қурилмалардан кенг фойдаланилмоқда. Маҳсулотларга ишлов бериш учун керакли лазер нурланишининг қувват зичлигига боғлиқ ҳолда лазерларни қўлланилиш соҳалари 3.26-расмда кўрсатилган.

Алоқа, локация, голография, ўлчов техникаси, термик ишлов бериш ва бошқалар	Пайвандлаш	Юлқу қатламларни буғлантириш	Тешиклар тешиш, материалларни кесиш ва бичкиш	Махсус вазифаларни бажариш
1	2	3	4	5
10^1	10^4	10^3	10^{11}	10^{12}
10^2			10^{12}	10^{13}
				10^{14}
				Вт/м ²

3.26-расм. Лазер нурланишининг қувватига боғлиқ ҳолда лазерлар қўлланиладиган соҳалар.

Лазер нурланиш билан термик ишлов беришда ва пайвандлашда модда локал қиздирилади ва бунда модда бузилмайди.

Саноатда лазерлар кўпроқ ўлчамли ишлов беришда, хусусан тешиklar ҳосил қилишда кенг қўлланилмоқда. Мана шундай ишларга мўлжалланган лазерли технологик қурилманинг схемаси 3.27-расмда келтирилган. Қурилманинг лазерли боши учта асосий қисмдан иборат: актив элемент (а), ёритувчи тизим (б) ва резонатор (в). Актив элемент сифатида рубин, неодимли шиша, алюмоиттрийли гранат ва бошқа моддалардан қилинган стерженлардан фойдаланилади. Буларнинг ичидан энг кўп тарқалгани неодимли шишадан қилинган стержен бўлиб, у 1,06 мкм тўлқин узунлиқдаги нурларни ҳосил қилади.

Ёритувчи тизим дамловчи импульсли лампа ва қайтаргичлардан ташкил топган.

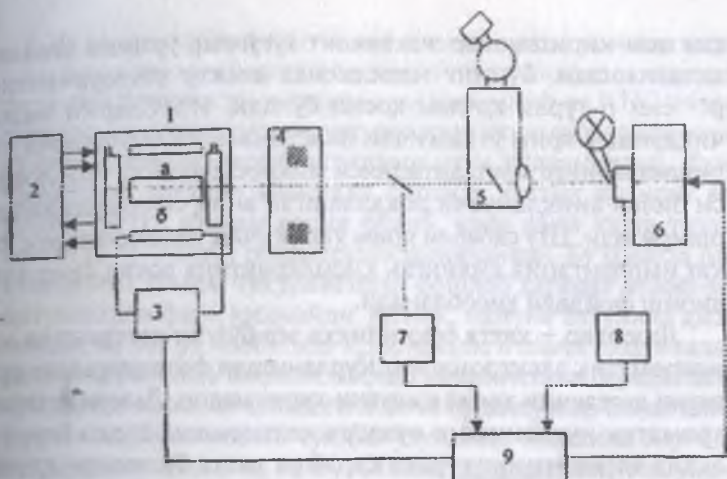
Лазер боши резонатори иккита текис параллел қайтариш коэффициентлари 100 % га яқин ("ёпиқ" ойна) ва 30 % ("чиқиш" ойнаси) бўлган диэлектрик ойналардан иборат.

Лазернинг ток манбаи — юқори вольтли тўғрилагичдан зарядланадиган конденсаторлар батареяси ва ёқувчи блокдан иборат. Ёқувчи блок лампадаги разряд оралиғида бирламчи ионлашишни ҳосил қилиш учун хизмат қилади. Лазер боши-ни совутиш тизими ундаги импульс лампаларининг ёниши вақтида ажраладиган катта миқдордаги иссиқликни олиб кетиб, уни совутиб туради. Катта қувватли ва частотали лазерларда берк тизимли сувли совутишдан фойдаланилади.

Нурланишни дозировка қиладиган қурилма бошқариладиган диафрагма ва ҳар хил зичликдаги ёруғлик филтърлари йиғмасини ўз ичига олади.

Оптик тизимга деталнинг ишлов берилаётган сиртига ёруғлик оқимининг юқори зичликдаги нурланишини шакллантирувчи қурилма ва бошқарувчи ҳамда кузатувчи қурилмалар киради.

Лазер қурилмаси таркибига ишлов берилаётган детални маҳкамлаш ва силжитиш учун ишчи стол ва технологик жараёни назорат ва бошқариш учун маҳсус программалашган қурилмалар (ЭХМлар) ҳам киради.



3.27-расм. Дсталларга ўлчамли ишлов беришда қўлланиладиган лазер қурилмасининг блок ~ схемаси:

1-лазер боши; 2-совутиш тизими; 3-ток манбаи; 4-нурланишни дозиронка қиладиган қурилма; 5-фокуслаш ва кузатиш учун оптик тизим; 6-ишчи стол; 7-нурланиш параметрларининг датчиги; 8-технологик жараёнлар параметрларининг датчиги; 9-программаловчи қурилма (ЭХМ).

Электрон асбоблар ва қурилмалар ишлаб чиқариш технологиясида лазерларнинг қўлланилиши. Ярим ўтказгичли технологияда лазер нурланишидан фойдаланиш биринчи навбатда модданинг кичик ҳажмида катта энергияни уйғунлаштириш имкониятига асосланган бўлиб, бу эса ўз навбатида структураларга термик ишлов бериш имкониятини тугдиради. Бундай қайта ишлов аввал ион-имплантация усули билан олинган структуралар асосида ИМС ишлаб чиқаришда зарурдир. Ион-имплантация жараёнида ярим ўтказгичнинг чуқурлиги 1 мкм дан катта бўлмаган сирт қатлами энг кўп тартибсизланади, бундан ташқари киритилган ионларнинг кўпчилиги тугунлар оралигида жойлашади ва бу ерда улар электр жиҳатдан ноактив бўлади. Уларни тугунларга ўтказиш учун, яъни киритилган ионларни активлаш учун, шунингдек ярим ўтказгичнинг кристалл структурасини тартиблаш мақсадида куйдириш (қиздириш) жараёни амалга оширилади. Куйдириш жараёнида радиацион нуқсонларнинг парчаланиши ва аннигиляцияси (йўқ бўлиб кетиши) рўй беради, киритил-

ган ион-киришмалар эса вакант тугунлар ўрнини эгаллаб, активлашади, бунинг натижасида электр ўтказувчанлиги p - ёки n -турли қатлам ҳосил бўлади. ИМСларни ишлаб чиқаришда ярим ўтказгичли пластиналарга легировчи киришмаларнинг имплантацияси микросхеманинг топологияси билан аниқланувчи локаллашган аниқ соҳаларда амалга оширилади. Шу сабабли ярим ўтказгичли пластиналарни фақат имплантация қилинган қисмларнигина локал лазер куйдириш фойдали ҳисобланади.

Лазерлар — катта ёрқинликка эга бўлган когерент ва монохроматик электромагнит нурланишли фотонларнинг қувватли дастасини ҳосил қилувчи қурилмадир. Лазерлар монохроматик нурланишни вужудга келтиришда ёрдам берувчи актив элементнинг турига қараб уч хилга бўлинади: қаттиқ жисмли, суюқликли ва газли. Қаттиқ жисмли лазерлар бир қанча устунликларга эга: нурнинг ўткир фокусланиши, тезкорлик, оптик шаффоф атмосферада ишлаш имконияти, иккиламчи рентген нурланишнинг йўқлиги, қурилманинг соддалиги кабилар.

Қаттиқ жисмли лазерларда актив ишчи элемент сифатида асосан $0,01 \div 0,05\%$ Cr_2O_3 , қўшимчали Al_2O_3 синтетик рубиннинг стержени; неодимли алюмоиттрий гранат (АИГ); неодимли шишалар ва ҳоказолар қўлланилади. Қаттиқ жисмли лазерларда фотонлар оқимини ҳосил қилишнинг принципи импульсли дамлаш (накачка) лампаси билан ёритиш ёрдамида актив элементдаги киришмаларнинг ионларини кўзғатиб, электронларини юқориқ энергетик сатҳларга ўтказишдан иборат. Ёритилиш тўхтатилганидан сўнг электронлар ўз энергетик сатҳига қайтади ва бунда ортиқча олган энергиясини қувватли фотонлар оқими сифатида нурлантиради. Фотонлар оқимининг жўшқин ортиб боришини уларнинг АИГ стерженининг ойнасимон қирраларидан кўп марабали қайтишлари қўллаб туради. Фотонлар оқими стерженнинг ярим шаффоф қиррасидан нурланади.

Неодимли АИГ асосидаги қаттиқ жисмли лазерларнинг аслиги ўзгартириладиган режимда импульсларининг даври $10 \div 100$ нс., максимал қувват зичлиги 100 МВт/см^2 , асосий гармоника учун тўлқин узунлиги $\lambda = 1,064$ мкм ва иккинчи гармоника учун $\lambda = 0,53$ мкм тўлқин узунлигига эга бўлади.

Лазерли куйдириш технологияси нон имплантация қилинган кремний қатлами, кремний тагликларга чанглан-тирилиб ўтқазилган поликристалл кремний ва КНС-структураларнинг кристалл структураларни яхшилаш ҳамда кири-тилган киришмаларни активлаш учун қўлланилади. Лазер куйдириш вақтида кристалл сиртида қаттиқ қизиган ёки эриган юпқа қатлам ҳосил бўлиб, улар жуда катта тезлик билан ($v > 100$ см/с) рекристаллизацияланади. Бу ҳолатда пла-стинанинг 10мкм чуқурлигидан бошлаб ҳарорат атроф-му-ҳитникидан фарқ қилмайди. Демак, намуна бутунича қизи-майди, бу эса ўз навбатида кристаллдаги заряд ташувчилар-нинг юқори яшаш вақтини сақлаш имкониятини беради. Лазер куйдириш жараёни куйидаги асосий параметрлар билан аниқ-ланади: нурланишнинг тўлқин узунлиги, пластина сиртида-ги энергия зичлиги, импульснинг даврийлиги, намунани қиздириш ҳарорати.

Ион имплантацияланган структураларни лазер куйдириш термик диффузион куйдиришдан фарқли равишда киритил-ган киришмани юпқа сирт қатламида сақлаб қолиш ва ки-ришманинг юқори электр активлигини таъминлаш имкони-ни беради.

Бундан ташқари лазер нурланиш ёрдамида лазерли ле-гирлаш ҳам амалга оширилади. Бунда кремний сиртида ле-гирловчи элементнинг юпқа қатлами ҳосил қилингандан кейин уни импульсли лазер дастаси билан нурлантирилади. Шундай усул билан кремнийда кичик чуқурликда жойлаш-ган р-п-ўтишлар ва GaAs да омик ўтишлар шакллантирила-ди. Легирлаш эффекти металл юпқа қатлами ва ярим ўтказ-гичнинг юпқа сирт қатламининг лазер нури таъсирида эри-ши билан асосланади. Бунда сирт энергиясининг зичлиги $1+10$ Ж/см² ни ташкил қилади ва унинг асосий қисми импульс давридан кичик $1+10$ нс вақт давомида эрийдиган металл плёнкаси томонидан ютилади. Импульс энергиясининг ор-тиши билан кремний қатламида легирловчи киришманинг атомлар миқдори ортиб боради ва максимумга етади, кейин эса камаяди. Бу катта энергияларда киришмаларнинг тез буг-ланиб кетиши билан тушунтирилади. Легирлаш ярим ўтказ-гичнинг суяқ фазасида киришманинг диффузияланиши ҳисобиға амалга оширилади. Шундан кейинги қатламнинг бир зумда кристалланиши метастабил ўга тўйинган қаттиқ қоришмани ҳосил қилади. Бундаги киришмаларнинг кон-

центрациялари кўпинча эрувчанликнинг чегаравий қийматларидан 1-2 тартибга юқори бўлади.

3.5. МИКРОСХЕМА ТОПОЛОГИЯСИНИ ШАКЛЛАНТИРИШ УСУЛЛАРИ

3.5.1. ФОТОЛИТОГРАФИЯ УСУЛИНИНГ МОҲИАТИ

Ярим ўтказгичли асбоблар ишлаб чиқариш саноатида 1957 йилда литография усулининг қўлланилиши электроника элемент базасининг кейинги ривожланиш босқичини белгилаб берди ва дискрет элементлар ишлаб чиқаришдан интеграл элементлар тайёрлашга ўтиш имконияти вужудга келди. Литография планар технологиянинг ажралмас жараёни бўлиб қолди. Литография ёрдамида ниқобловчи юпқа қатламда тирқишча очилади ва у орқали локал диффузия қилинади. Кейин эса алюминий юпқа қатламида металланишнинг нусхаси ҳосил қилинади. Мезотехнологияда чуқур локал емириш учун контакт ниқоби ҳосил қилинади. Литография ёрдамида микрон ва ундан кичик ўлчамли элементларнинг аниқ нусхасини ҳосил қилиш мумкин. Литография ёрдамида шаблонлар олинади. Шундай қилиб, литография ёрдамида пластина сиртида шаклланидиган технологик қатламлар топологиясига мос келувчи тирқишли контакт ниқоб ҳосил қилинади ва кейинчалик бу топология (расм) шу қатламнинг материалига берилади.

Литография қўлланилаётган нурланишнинг турига қараб оптик, рентген, электрон ва ион литографияларга бўлинади. Оптик литографияда (фотолитография) асосан ультрабинафша нурланишдан фойдаланилади.

Фотолитография жараёнининг мазмуни қуйидагича: Пластина ёки тагликнинг махсус тайёрланган сиртига ёруғлик сезувчи материал - фоторезистнинг юпқа қатлами суркалади. Фоторезист қуригандан кейин таглик сиртида мустақкам плёнка ҳосил бўлади. Ундан кейин пластина сиртига фотошаблон (контактли расмга тушириш) қўйилади. Фотошаблон орқали фоторезист сеза оладиган ва унинг хоссаларини ўзгартирадиган актив ёруғлик туширилади. Плёнка очилтирилгандан ва полимерлангандан сўнг фоторезистда керакли рельеф, яъни плёнкада очиқ (фоторезист плёнкадан ҳоли) ва ёпиқ (фоторезист плёнкали) қисмлар ҳосил бўлади. Бу ҳосил бўлган рельеф тагликка ўтказилади (3.28-расм).

Фоторезист плёнкасида ҳосил қилинган «тирқишчалар» бир қанча зарур технологик операцияларни ўтказиш имкониятини беради: ярим ўтказгич материалида қатламини олиб ташлаш учун ва мезаструктура ҳосил қилиш учун тагликни локал емириш, диффузияга «тирқишчалар» очиш учун ҳимояловчи диэлектрик қатламлар SiO_2 ва Si_3N_4 ни олиб ташлаш, ҳамда омик контакт ва мураккаб геометрик шаклдаги ток ўтказувчи йўлакчаларни ҳосил қилиш учун металл қатламларни емириш кабилар.

3.5.2. ФОТОРЕЗИСТЛАР

Фоторезистлар деб уларга таъсир қиладиган актив ёруғлик билан ёритилганда уларнинг ҳоссалари, энг аввало эрувчанлиги ўзгариб кислотали ва ишқорли емиргичлар таъсирига чидамли бўлиб қоладиган моддаларга айтилади. Демак, фоторезистлар ёрдамида яримўтказгичли пластина сиртида керакли конфигурацияли тасвири ҳимоя плёнкаси ҳосил қилинади. Тасвир рельефи ёруғлик таъсирида ёритилган ёки ёритилмаган қисмлар ҳолида ҳосил бўлади. Нурлангандан сўнг фоторезистнинг плёнкаси очилтирилади. Бунинг натижасида фоторезистнинг бир қисми (керакли тасвир) тагликда қолиб кейинги технологик операцияларда ниқоб сифатида хизмат қилади, кераксиз қисми эса олиб ташланади.

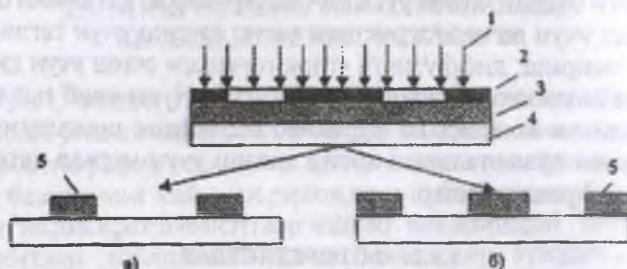
Фоторезистлар асосан полимер моддалардан тайёрланганлиги сабабли ультрабинафша нурларни сезувчан бўлиб, уларнинг тўлқин узунлиги 220–360 нм соҳага тўғри келади. Фоторезистлар улардаги ёруғлик таъсирида кечадиган фото-кимёвий реакцияларнинг характериға қараб иккита гуруҳга бўлинади: 1) негатив ва 2) позитив.

Негативли фоторезистларда ёруғлик таъсирида тагликнинг сиртида эримайдиган плёнкали қисмлар ҳосил бўлади ва очилтирилгандан сўнг улар сиртда қолади. Демак, фоторезистда фотошаблоннинг негатив тасвири ҳосил бўлади (3.28-расм, а).

Позитив фоторезистда эса аксинча, ёруғлик таъсир этган қисмлар таглик сиртидан эритгичлар таъсирида олиб ташланади. Натижада сиртда қолган фоторезистнинг қатлами фотошаблоннинг позитив нусхасини беради (3.28-расм, б).

Ярим ўтказгичлар технологиясида негатив фоторезист сифатида поливинил спирти ва поливинилциннамат кисло-

тасининг мураккаб эфири асосидаги таркибдан фойдаланилади. Бундан ташқари ҳар хил қўшилмалар



3.28-расм. Контактли резистли никобларни негатив (а) ва позитив (б) резистлар ёрдамида ҳосил қилиш: 1-актив нурлар; 2-фотошаблон; 3-фото-резист қатлами; 4-таглик; 5-резистли никоб.

қўшилган циклокаучук ҳам ишлатилади. Унинг ёруғликни сезувчанлигини ошириш учун ҳар хил органик азидлар (алкилазидлар, алкеназидлар, арилазидлар, бисазидлар каби-лар) қўшилади.

Позитив фоторезист сифатида новолак ва ёруғлик сезувчан нафтохинондиазид асосидаги таркиб энг кўп қўлланилмоқда.

Фоторезистлардан яримўтказгичли асбоблар ва интеграл микросхемалар тайёрлаш технологиясида фойдаланишда қуйидаги асосий мезонлар ҳисобга олинади: маълум тўлқин узун-ликидаги ёруғликни сезувчанлик; минимал ўлчамли микро-рельеф тасвирини ҳосил қила олишлик имконияти; кисло-тага чидамлилиқ; тагликка бўлган сўрилувчанлик (адгезия); технологияга мослашувчанлик.

3.5.3. ФОТОШАБЛОНЛАР ВА УЛАРНИ ТАЙЁРЛАШ ТЕХНОЛОГИЯСИ

Планар технологияда фотолитография жараёнини ўтказиш учун фотошаблонлардан фойдаланилади. Фотошаблон-лар деб, текис параллел томонли шаффоф материалдан қилин-ган ва унинг томонларида ёруғликнинг маълум тўлқин узун-лигини ўтказадиган ва ўтказмайдиган, асбоб ёки интеграл микросхеманинг топологиясини белгилайдиган тасвирлар туширилган пластинага айтилади.

Шундай қилиб фотошаблонлар ёрдамида фоторезист қат-ламида ҳар қандай мураккаб расмнинг микротасвирини ҳосил

қилиш мумкин. Фотошаблоннинг асоси оптик шишадан тайёрланади. Шиша сиртидаги тасвирни фотография усули билан ҳосил қилинади. Шиша пластинада ҳосил қилинган тасвирнинг материалига қараб фотошаблонлар эмульсияли, металлланган ва рангли (транспарент) фотошаблонларга бўлинади.

Эмульсияли фотошаблонларда одатдаги фотография усули билан эмульсияли қатламда оптик зичлиги максимал ва минимал бўлган тасвирли қисмлар ҳосил қилинади.

Металланган фотошаблонларда тасвирнинг қисмлари юлқа хром қатлами орқали ҳосил қилинади.

Рангли фотошаблонларда тасвирлар темир оксиди плёнкаси ёрдамида ҳосил қилинади.

Рангли фотошаблонлардан фойдаланиш контактли босмада ёруғликнинг қайтиш (аксланиш) эффектини камайтириш имкониятини берди ва бунинг натижасида ҳосил қилинадиган микротасвирнинг сифати анчага яхшиланди.

Фотошаблонлар негатив (қоронғи майдонли), бунда тасвирнинг элементлари қора майдонда ёруғ қисмлар кўринишида, ёки позитив (ёруғ майдонли), бунда тасвир элементлари ёруғ фонда қора қисмлар кўринишида, бўлиши мумкин. Фотошаблонларга қуйидаги талаблар қўйилади:

1) Тасвирдаги элементларнинг геометрик ўлчамларининг юқори даражадаги аниқлиги.

2) Фрагментлар оралиғидаги қадам ўлчамининг аниқлиги.

3) Расм ва унинг ўлчамларининг вақт бўйича ўзгармаслиги.

4) Ишқаланишга чидамлилиги.

5) Ишчи сиртининг текислиги.

6) Фотошаблонлар комплектининг бир-бирига мос тушиши.

Хозирги вақтда фотошаблонларни тайёрлашда оптик-механик усулдан фойдаланилади. Бу усул уч хил вариантда қўлланилиб, улар бир-биридан операциялар кетма-кетлиги ва фойдаланиладиган аслаҳалар билан фарқ қилади (3.29-расм).

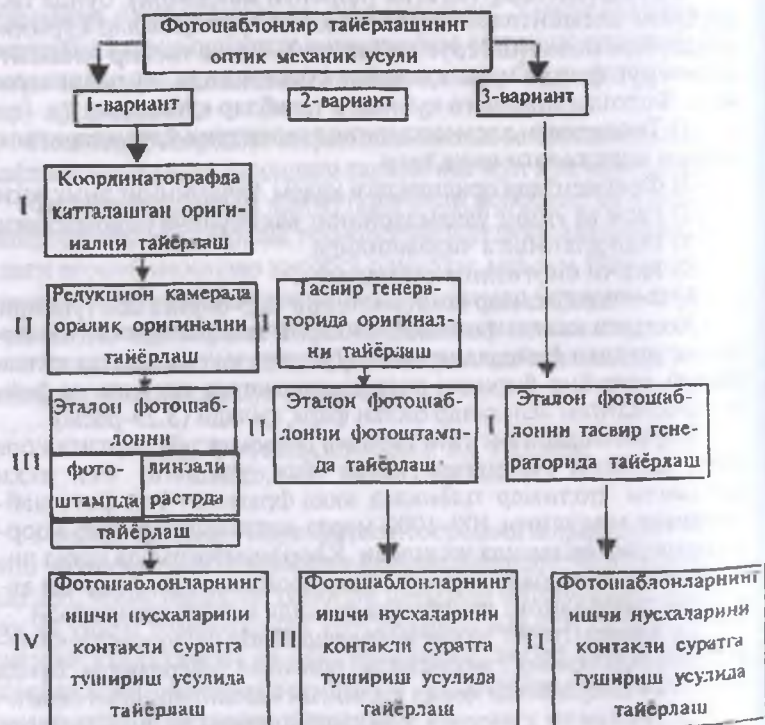
Биринчи вариантнинг *биринчи операциясида* сиртига қора бўёқ қатлами суркалган қоғоз ёки шишага, ёки икки қатламли полимер плёнкага яқка фрагмент ёки фотошаблоннинг модулини 100-1000 марта катталаштирилиб координатограф ёрдамида чизилади. Координатографда шакл чизиш автоматик равишда ЭХМ дан фойдаланилган ҳолда аввалдан тайёрланган программа асосида амалга оширилади.

Бу вариантнинг *иккинчи операциясида* редукцияли камера ёрдамида оралиқ (эмульсияли) оригинал тайёрланади. Бунда биринчи операцияда ҳосил қилинган каттайтирилган оригинал редукцияли камерага жойлаштирилади ва 50-100 марта кичрайтирилган ҳолда юқори аниқлик қобилиятига эга бўлган фотопластинага фотосурати олинади.

Учинчи операцияда оралиқ оригиналдаги расм ишчи майдоннинг ҳамма юзасига мултипликация қилинади, яъни эталон фотошаблон тайёрланади. Мультипликация жараёни махсус қурилмалар: бир ўринли ёки кўп ўринли фотоштампларда амалга оширилади.

Оралиқ оригинал фотоштампнинг проекцияловчи камерасига жойлаштирилади. Фотоштамп оралиқ оригиналдаги расмни эталон фотошаблоннинг ёруғлик сезгир қатламли пластинаси сиртига ишчи ўлчамларгача кичрайтирилган ҳолдаги суратини туширади ва мана шу суратни пластинанинг ҳамма сиртига мултипликациялайди.

Тўртинчи, якуловчи операцияда ҳосил қилинган эталон фотошаблондан ишчи нусхалар тайёрланади. Бу операцияда эталон фотошаблондаги расм ёруғлик сезгир қатламли металлланган пластинага контактли суратга туширилади.

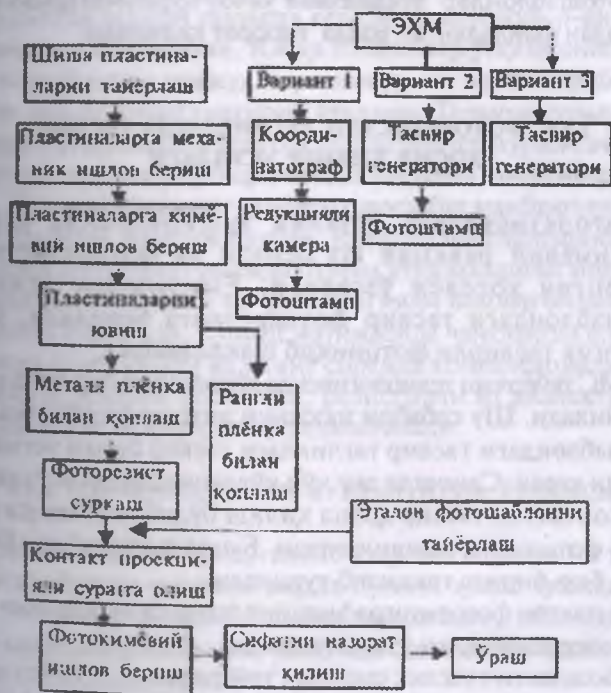


3.29-расм. Фотошаблонларни тайёрлаш вариантлари.

3.5.4. ФОТОШАБЛОНЛАРНИ САНОАТДА ТАЙЁРЛАШ

Яримўтказгичли асбоблар ва интеграл микросхемалар ишлаб чиқарилишини таъминлаб туриш учун саноатда металлланган фотошаблонлар ишлаб чиқарилиши йўлга қўйилган. У ҳар хил технологик жараёнлар комплексини ўз ичига олади: оптик шишадан пластиналар тайёрлаш, шиша пластиналарга механик ва кимёвий ишлов бериш, ювиш, шиша пластиналар сиртини металл ёки рангли плёнкалар билан қоплаш, мана шу плёнкаларда фоторезист қатламини ҳосил қилиш, контакт суратга олиш, фоторезист қатламига фотокимёвий ишлов бериш, фотошаблонларнинг сифатини назорат қилиш ва уларни ўраш.

3.30-расмда фотошаблонларни саноатда серияли ишлаб чиқаришнинг схемаси келтирилган.



3.30-расм. Фотошаблонларни серияли тайёрлаш.

3.5.5. ФОТОШАБЛОНЛАРНИ НАЗОРАТ ҚИЛИШ

Фотошаблонларни назорат қилиш мураккаб ва меҳнат талаб қиладиган операциядир. Бу операцияда меҳнатни энг кўп талаб қиладиган ва вақтни оладиган қисми бу ишчи майдоннинг сифатини текширишдир. Фотошаблонларнинг ишчи майдонида бирон бир сирт нуқсонлари: тирналган, кўчган, оқ, қора нуқта ва бошқалар бўлмаслиги керак.

Фотошаблоннинг қуйидаги параметрлари назорат қилинади:

- 1) Микротасвирдаги элементларнинг шакли ва ўлчамлари.
- 2) Фотошаблон комплектидаги элементларнинг устма-уст тушиш аниқлиги.
- 3) Ишчи майдонининг тозаллиги.

Фотошаблонлар предцизион ўлчов қурилмаларида микроскопдан фойдаланган ҳолда назорат қилинади.

3.5.6. ФОТОРЕЗИСТЛИ ТАГЛИКЛАРДА ТАСВИР ҲОСИЛ ҚИЛИШ УСУЛЛАРИ

Фоторезистларга ёруғлик туширилганда уларда фотохимёвий реакция юз беради ва фоторезистнинг бошланғич хоссаси ўзгаради. Емиришдан кейинги фотошаблондаги тасвир фотоқатламга берилади, яъни топологик тасвири фотониқоб шаклланади.

ИМС тайёрлаш технологиясида литография бир неча марта қўлланилади. Шу сабабли иккинчи литографиядан бошлаб фотошаблондаги тасвир тагликдаги тасвир билан устма-уст тушиши керак. Саноатда энг кўп қўлланиладиган усуллардан бири контактли тасвир ҳосил қилиш бўлиб, у ўз ичига контактли фотолитографияни олади. Бунда фотошаблон билан таглик бир-бирига теккизиб турилади.

Контактли фотолитографиянинг технологик жараёни қуйидаги операцияларни ўз ичига олади:

1. Бошланғич таглик сиртини тайёрлаш.
2. Таглик сиртига фоторезист қатламини суркаш.
3. Фоторезистни бирламчи қуритиш—плёнка ҳосил бўлиши.

4. Фотошаблондаги тасвирни тагликдаги тасвир билан уст-ма-уст тушириш.
5. Контакт усули билан тасвир ҳосил қилиш.
6. Фоторезистни очилтириш.
7. Фоторезистни иккиламчи қуритиш-полимерлаш.
8. Фоторезист плёнкасидаги тасвир рельефини назорат қилиш.
9. Тагликни емириш.
10. Таглик сиртидаги фоторезист қатламини олиб ташлаш.
11. Тагликдаги тасвир рельефини назорат қилиш.

3.6. ЮПҚА ҚАТЛАМЛАР ҲОСИЛ ҚИЛИШ УСУЛЛАРИ

Ярим ўтказгичлар технологиясида структураларнинг сир-тига юпқа қатламли қопламаларни вакуумда ўтқазиш ёки олиб ташлаш каби жараёнлар катта ўрин эгаллайди. Бу жараёнлар сийраклашган газларда кечадиган молекуляр-кинетик ходисаларга асосланган. Юпқа плёнкалар ўтқазишнинг ик-кита асосий усули мавжуд: термовакуумли буғлантириб ўтқа-зиш ва катодли чанглантириб ўтқазиш. Термовакуумли буғ-лантириб ўтқазишда модда буғланиш температурасигача қиз-дирилади ва унинг буғлари таглик сиртида конденсацияла-нади. Бунда тагликнинг температураси буғ манбаининг тем-пературасидан пастроқ бўлади. Катодли чанглантириб ўтқа-зишда хона темпреатурасида бўлган ўтқазиладиган модда газ разряди плазмасидаги кичик энергияли ионлар билан бом-бардимон қилинади. Бунинг натижасида чангланган атомлар тагликка етиб боради ва унинг сиртида конденсацияланади. Бу иккала усулдан ўтказувчи, резистивли ва диэлектрикли плёнкалар ҳосил қилишда фойдаланилади.

3.6.1. ТЕРМОВАКУУМЛИ БУҒЛАНТИРИБ ЎТҚАЗИШ

Термовакуумли буғлантириб ўтқазиш жараёнини тўртга босқичга бўлиш мумкин: модда буғини ҳосил қилиш, буғ-нинг манбадан тагликка томон тарқалиши, тагликда буғ-нинг конденсацияланиши, усини марказларининг ҳосил бўли-ши ва плёнканинг ўсиши.

1. *Модда буғини ҳосил қилиш* учун модда буғлантирилади ёки сублимацияланади. Модда қиздирилганда ундаги атом-

ларнинг ўртача кинетик энергияси ошиб боради. Бунинг натижасида уларнинг атомлараро боғланишни узиш эҳтимоллиги ҳам ошади. Атомлар сиртдан ажралиб чиқади ва фазода тарқалиб буг ҳосил қилади.

Тизимнинг мувозанат ҳолатида, яъни модда сиртидан чиқиб кетаётган атомлар сони қайтиб тушаётган атомлар сонига тенг бўлган ҳолатга мос келувчи бугнинг босими p , тўйинган бугнинг босими дейилади. Бугланишининг шартли температураси деб $p = 1,33 \text{ Па}$ га тенг бўладиган модданинг температурасига айтилади.

Бугланишининг солиштирма тезлиги деб 1 см^2 юзадан бир секундда бугланаётган модданинг граммлар ҳисобидаги миқдори айтилади ва қуйидаги ифода билан аниқланади:

$$V_{\text{буг}} = 5,85 p_1 \sqrt{M/T} \quad (3.56)$$

бу ерда, p_1 — модда тўйинган бугининг босими, Па, M — модданинг молекуляр массаси, г/мол, T — модданинг температураси, К.

2. Бугнинг манбадан тағлиқка томон тарқалиши биринчи навбатда вакуум даражаси таъсир қиладиган диффузия ва конвекция йўллари билан амалга ошади. Бугланаётган материалнинг исрофланишини камайтириш ва бир хил қалинликдаги плёнка ҳосил қилиш учун заррачаларнинг тағлиқ томон тўғри чизиқли ҳаракатини амалга ошириш керак. Бунинг асосий шартли буг заррачасининг эркин югуриш йўли узунлиги манба — тағлиқ масофасидан катта бўлишлигидир.

Газларнинг кинетик назариясига биноан:

$$\lambda_{\text{эр}} = \kappa T / (\pi \sqrt{2} \delta^2 p) \quad (3.57)$$

бу ерда, $\lambda_{\text{эр}}$ — газ молекуласи эркин югуриш йўлининг ўртача узунлиги, см, $\kappa = 1,37 \cdot 10^{-17} \text{ Па} \cdot \text{см}^3/\text{К}$ — Больцман доимийси, T — газнинг абсолют температураси, К, δ — газ заррачасининг эффектив диаметри, см, p — газнинг босими, Па.

(3.57) ифодага биноан $p = 10^{-3} \text{ Па}$ дан бошлаб газ заррачаларининг эркин югуриш йўли узунлиги буг манбадан тағлиқкача бўлган масофадан (бу масофа саноатда ишлатиладиган вакуум қурилмаларида 30 см дан ошмайди) катта бўлади. Демак, мана шу босимдан бошлаб буг заррачасининг қолдиқ газ молекулалари билан тўқнашиш эҳтимоллиги жуда кичик бўлади ва буглантирилаётган модданинг заррачалари тағлиқ томон тўғри чизиқли ҳаракат қилади.

3. Таглик сиртида буғнинг конденсацияланиши тагликнинг температурасига ва атомар оқим зичлигига боғлиқ бўлади. Тагликка етиб борган буғ атомлари а) шу заҳоти ундан қайтиши (эластик тўқнашиш), б) адсорбцияланади ва қисқа вақтдан сўнг тагликдан қайтиб чиқиши (қайта буғланиш), в) адсорбцияланади ва сирт бўйлаб қисқа вақтли миграциядан сўнг унда бутунлай қолади (конденсация).

Буғ атомларининг таглик атомлари билан боғланиш энергияси таглик атомларининг ўртача энергиясидан катта бўлса, конденсация кузатилади, акс ҳолда атомлар сиртдан қайтиб кетади. Агар таглик қиздирилган бўлса, унинг атомларининг энергияси катта ва буғларнинг конденсацияланиш эҳтимоли кичик бўлади.

Буғ оқимининг берилган зичлигида таглик сиртидан ҳамма атомлар қайтиб кетадиган ва юпқа қатлам ҳосил бўлмайдиган температура конденсациянинг критик температураси дейилади.

Берилган температура учун атомар оқимнинг критик зичлиги деб, тагликда атомлар конденсацияланадиган энг кичик зичликка айтилади.

4. Ўсиш маркасларининг ҳосил бўлиши атомларнинг атом — таглик тизимида эркин энергиянинг минимумига мос келувчи ўринларни топиш натижасида рўй беради. Буғларнинг конденсацияланиши давомида муртақлар ўсиб боради, улар орасида бирлаштирувчи кўприкчалар ҳосил бўлади, муртақлар бирлашиб йирик оролчаларга айланади. Бундан сўнг оролчалар бирлашиб битта тўр ҳосил бўлади. Тўр яхлит плёнкага айланади ва қалинлик бўйича ўсиш бошланади. Мана шу вақтдан бошлаб тагликнинг таъсири йўқ бўлади ва буғ заррачалари сиртдан умуман қайтмасдан ҳаммаси амалда конденсациялана бошлайди.

3.6.2. ҲИМОЯЛАШДА ҚўЛЛАНИЛАДИГАН ДИЭЛЕКТРИКЛИ ЮПҚА ҚАТЛАМЛАР

Ҳимояловчи юпқа қатламларга қўйиладиган талаблар. Ярим ўтказгичли асбоблар ва интеграл микросхемаларни ялбар технология бўйича тайёрлашда ҳимояловчи диэлектрикли юпқа қатламлар асосий рол ўйнайди. Улар донор ва акцептор киришмаларни локал диффузия қилиш, микросхемаларнинг бир-бирдан изоляцияланган актив ва пассив эле-

ментларини шакллантириш, ҳамда p-n ўтишларни ташқи таъсирлардан ҳимоя қилиш имкониятларини беради.

Шу сабабли планар технологияда ҳимояловчи диэлектрикли юпқа қатламларга қуйидаги асосий талаблар қўйилади: дастлабки тағлиқнинг сиртини диффузияланувчи элементар (бор, фосфор, сурьма, мышьяк ва бошқалар) киришмаларнинг киришидан тўлиқ ҳимоялаш; вақт бўйича кимёвий чидамлилиқ ва барқарорлиқ; бир жинслилиқ ва нуқсонсизлиқ; солиштирма қаршилиқ ва электр мустаҳкамлигининг юқорилиги; юқори механик мустаҳкамлик.

Ҳимояловчи диэлектрикли юпқа қатламлар юқорида келтирилган талабларга мумкин қадар тўлиқ жавоб бера оладиган моддалардан ҳосил қилинади.

Ҳимояловчи диэлектрикли юпқа қатламлар тайёрлаш учун бошланғич материаллар сифатида кварц, кремнийнинг моноксиди ва диоксиди, кремний нитриди, алюминий оксиди ва нитриди, бор нитриди ва бошқалардан фойдаланиш мумкин. Бироқ ҳозирги даврда саноатда кўпроқ икки материал: кремний диоксиди ва нитриди кенг қўлланилмоқда.

Кремнийни термик оксидлаш кинетикаси. Ярим ўтказгичли асбоблар ва ИМСларни планар технология бўйича тайёрлашда энг кўп тарқалган кремнийни термик оксидлаш усули бўлиб, бунда ҳимояловчи диэлектрикли юпқа қатлам SiO_2 бошланғич кремнийли тағлиқларни оксидловчи муҳитда қиздириш билан ҳосил қилинади. Бу усул юқори сифатли ниқобловчи, бир хил қалинлик ва структурали, юқори ҳимояловчи ва диэлектрикли хоссаларга эга бўлган юпқа қатламлар олиш имкониятини беради.

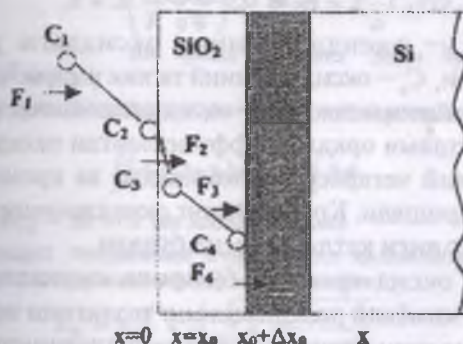
Кислородли атмосферада термик оксидлаш билан ҳимояловчи диэлектрикли юпқа қатлам SiO_2 нинг ҳосил бўлиш жараёни кинетикасини кўриб чиқамиз.

3.31-расмда кремнийни термик оксидлаш жараёнининг модели келтирилган бўлиб, у оксидловчи (газ) — оксид қатлами (қаттиқ) - кремний тағлиги тизимидан иборат. Бу тизим орқали тўртта оқимдан ташкил топган “оксидловчининг оқими” ўтади.

“Оксидловчининг оқими” деганда тағлиқнинг бирлик сиртидан бирлик вақтда кесиб ўтадиган оксидловчининг молекулалари миқдори тушунилади. Тўртта оқимнинг ҳар биттаси оксидловчи муҳит - кремний тағлиги тизимининг битта соҳасига тегишлидир.

Расмдан шу нарсa кўриниб турибдики, F_1 оқим кремний таглик сиртига оксидловчининг газ фазасидаги масса узатилишига мос келади. Кремний сиртида доимо оксиднинг юпқа қатлами бўлгани учун F_1 оқимни оксидловчининг оксид сиртига узатиладиган оқим деб ҳисоблашимиз мумкин. Бу узатилиш диффузия жараёни ҳисобига, ҳамда мужбурий равишда газ — узатувчи ёки оксидловчи оқимининг силжиши ҳисобига амалга ошиши мумкин. Узатилиш тезлиги оксидлаш жараёнининг технологик режимига боғлиқ бўлади.

Саноатда кремнийни термик оксидлаш жараёни учун ишчи камерадан маълум бир тезликда ўтаётган F_1 оксидловчининг мажбурий оқимидан фойдаланилади:



3.31-расм. Кремнийни термик оксидлаш жараёни.

$$F_1 = h(C_1 - C_2) \quad (3.58)$$

бу ерда, h — оксидловчини газ фазасидан масса узатиш жараёни тезлигининг константаси, C_1 — газ фазаси ҳажмидаги оксидловчининг мувозанатли концентрацияси, C_2 — оксидловчининг оксид сиртидаги концентрацияси.

Оксид сиртига етиб борган оксидловчи шу сиртга адсорбцияланади ва унда эриб кетади. Бунда газ фазадаги оксидловчининг концентрацияси билан қаттиқ фазада эриган оксидловчининг концентрациялари орасида тақсимлаш коэффициенти билан аниқланадиган нисбат амалга ошади. Оксидда оксидловчининг эриш жараёнини ҳаракатлантирадиган куч газ — оксид сирти тизимидаги оксидловчининг

концентрация градиенти ҳисобланади. Шу сабабли оксидловчининг оқими

$$F_2 = \delta(C_2 - C_3), \quad (3.59)$$

бу ерда, δ — оксид қатламидаги оксидловчининг эриш жараёни тезлигининг константаси, C_3 — газ фаза чегарасидаги оксидловчининг концентрацияси.

Оксид қатламда эриган оксидловчи газ фаза — оксид бўлиниш сиртидан оксид — кремний таглик бўлиниш сиртига диффузияланади. Бу ҳолатда оксидловчининг оқими F_3 оксидланиш чегарасидаги концентрациялар фарқига тўғри пропорционал, оксид қатлами қалинлигига эса тескари пропорционал бўлади:

$$F_3 = D \frac{C_3 - C_4}{x_0} \quad (3.60)$$

бу ерда, D — оксидловчининг оксиддаги диффузия коэффициенти, C_4 — оксид-кремний таглик чегарасидаги оксидловчининг концентрацияси, x_0 — оксид қатламининг қалинлиги.

Оксид қатлами орқали диффузияланган оксидловчи оксид — кремний чегарасига етиб келади ва кремний билан реакцияга киришади. Кремнийнинг оксидланиши натижасида оксиднинг янги қатлами ҳосил бўлади.

F_4 оқим оксид-кремний бўлиниш сиртида кечаётган оксидланиш кимёвий реакциясининг тезлигини ифодалайди. Кремнийнинг оксидланиш тезлиги оксидловчининг концентрациясига пропорционал, шу сабабли,

$$F_4 = R C_4, \quad (3.61)$$

бу ерда, R — оксидлаш реакцияси тезлигининг константаси.

Турғун режимда (мувозанатла) ҳамма оқимлар бир — бирига тенг, яъни $F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = F$ бўлгани учун оқимлар тенгламаларини биргаликда ечиб оксидловчининг йиғинди оқими учун алоҳида оқимларни ҳисобга олган ҳолдаги ифодасини топиш мумкин.

Бу ифоданинг охириги кўриниши қуйидагича бўлади:

$$F = \frac{\frac{R}{a} C_1}{1 + \frac{R}{\delta} + \frac{R x_0}{D}} = R_{\text{эф}} C_1 \quad (3.62)$$

бу ерда, $0 < a < 1$, $R_{\text{эф}}$ — оксидлаш жараёни тезлигининг эффектив константаси.

Агар V бирлик хажмдаги оксидни оксидлаш реакцияси натижасида ҳосил бўлиши учун оксидловчининг N заррачаси кетган бўлса, унда оксид қатламининг ўсиш тезлиги қуйидаги тенглама билан ифодаланади:

$$\frac{dx_0}{dt} = \frac{F}{N} = FV = R_{\text{эф}} C_1 V; \quad (3.63)$$

ёки

$$\frac{dx_0}{dt} = \frac{\frac{1}{a} C_1 V}{\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{\delta}\right) + \frac{x_0}{D}} = \frac{\frac{1}{a} C_1 V D}{\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{\delta}\right) D + x_0}. \quad (3.64)$$

Қуйидаги белгилашларни киритамиз:

$$A = 2 \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{\delta} \right) D \quad \text{ва} \quad B = 2 \frac{1}{a} C_1 V D,$$

унда $\frac{dx_0}{dt} = \frac{B}{A + 2x_0}$ ни ҳосил қиламиз. Энди бу ифодани ўзгарувчиларни бўлаклаш усули билан интеграллаймиз:

$$\int (A + 2x_0) dx_0 = \int B dt$$

ва $x_0^2 + Ax_0 - Bt = 0$ ни ҳосил қиламиз.

Бу квадрат тенгламани счиб, оксид қалинлигининг вақт бўйича функциясининг ифодасини топамиз:

$$x_0 = -\frac{A}{2} + \frac{A}{2} \sqrt{1 + \frac{t}{A^2/(4B)}} \quad (3.65)$$

ёки

$$\frac{x_0}{A/2} = \sqrt{1 + \frac{t}{A^2/(4B)}} - 1. \quad (3.66)$$

Кремнийни термик оксидлаш жараёнини иккита чегаравий ҳолини кўриб чиқамиз:

1-ҳол. Оксидлаш жараёни қатта вақтда ўтказилмоқда, яъни $t \gg A^2/(4B)$, унда қуйидаги ифодани ҳосил қиламиз:

$$\left(\frac{x_0}{A/2} \right)^2 = \frac{t}{A^2/(4B)} \quad \text{ёки} \quad x_0^2 = Bt$$

Шундай қилиб, бу чегаравий ҳолда термик оксидлаш жараёнининг параболик қонуни амал қилади. B константа оксидлаш тезлиги константаси сифатида қаралади.

2-ҳол. Оксидлаш жараёни нисбатан кичик вақтда ўтказилмоқда, яъни $t \ll A^2/(4B)$, бунда

концентрация градиенти ҳисобланади. Шу сабабли оксидловчининг оқими

$$F_2 = \delta(C_2 - C_1), \quad (3.59)$$

бу ерда, δ — оксид қатламидаги оксидловчининг эриш жараёни тезлигининг константаси, C_2 — газ фаза чегарасидаги оксидловчининг концентрацияси.

Оксид қатламда эриган оксидловчи газ фаза — оксид бўлиниш сиртидан оксид — кремний таглик бўлиниш сиртига диффузияланади. Бу ҳолатда оксидловчининг оқими F_3 оксидланиш чегарасидаги концентрациялар фарқига тўғри пропорционал, оксид қатлами қалинлигига эса тескари пропорционал бўлади:

$$F_3 = D \frac{C_3 - C_4}{x_0} \quad (3.60)$$

бу ерда, D — оксидловчининг оксиддаги диффузия коэффиценти, C_3 — оксид-кремний таглик чегарасидаги оксидловчининг концентрацияси, x_0 — оксид қатламининг қалинлиги.

Оксид қатлами орқали диффузияланган оксидловчи оксид — кремний чегарасига етиб келади ва кремний билан реакцияга киришади. Кремнийнинг оксидланиши натижасида оксиднинг янги қатлами ҳосил бўлади.

F_4 оқим оксид-кремний бўлиниш сиртида кечаётган оксидланиш кимёвий реакциясининг тезлигини ифодалайди. Кремнийнинг оксидланиш тезлиги оксидловчининг концентрациясига пропорционал, шу сабабли,

$$F_4 = RC_4, \quad (3.61)$$

бу ерда, R — оксидлаш реакцияси тезлигининг константаси.

Турғун режимда (мувозанатла) ҳамма оқимлар бир — бирига тенг, яъни $F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = F$ бўлгани учун оқимлар тенгламаларини биргаликда ечиб оксидловчининг йиғинди оқими учун алоҳида оқимларни ҳисобга олган ҳолдаги ифодасини топиш мумкин.

Бу ифоданинг охириги кўриниши қуйидагича бўлади:

$$F = \frac{\frac{R}{a} C_1}{1 + \frac{R}{\delta} + \frac{Rx_0}{D}} = R_{\text{эф}} C_1 \quad (3.62)$$

бу ерда, $0 < a < 1$, $R_{\text{эф}}$ — оксидлаш жараёни тезлигининг эффектив константаси.

Агар V бирлик хажмдаги оксидни оксидлаш реакцияси натижасида ҳосил бўлиши учун оксидловчининг N заррачаси кетган бўлса, унда оксид қатламининг ўсиш тезлиги қуйидаги тенглама билан ифодаланади:

$$\frac{dx_0}{dt} = \frac{F}{N} = FV = R_{\phi} C_1 V; \quad (3.63)$$

ёки

$$\frac{dx_0}{dt} = \frac{\frac{1}{a} C_1 V}{\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{\delta}\right) + \frac{x_0}{D}} = \frac{\frac{1}{a} C_1 V D}{\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{\delta}\right) D + x_0}. \quad (3.64)$$

Қуйидаги белгилашларни киритамиз:

$$A = 2\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{\delta}\right) D \quad \text{ва} \quad B = 2 \frac{1}{a} C_1 V D,$$

унда $\frac{dx_0}{dt} = \frac{B}{A + 2x_0}$ ни ҳосил қиламиз. Энди бу ифодани

ўзгарувчиларни бўлаклаш усули билан интеграллаймиз:

$$\int (A + 2x_0) dx_0 = \int B dt$$

ва $x_0^2 + Ax_0 - Bt = 0$ ни ҳосил қиламиз.

Бу квадрат тенгламани ечиб, оксид қалинлигининг вақт бўйича функциясининг ифодасини топамиз:

$$x_0 = -\frac{A}{2} + \frac{A}{2} \sqrt{1 + \frac{t}{A^2/(4B)}} \quad (3.65)$$

ёки

$$\frac{x_0}{A/2} = \sqrt{1 + \frac{t}{A^2/(4B)}} - 1. \quad (3.66)$$

Кремнийни термик оксидлаш жараёнини иккита чегаравий ҳолини кўриб чиқамиз:

1-ҳол. Оксидлаш жараёни катта вақтда ўтказилмоқда, яъни $t \gg A^2/(4B)$, унда қуйидаги ифодани ҳосил қиламиз:

$$\left(\frac{x_0}{A/2}\right)^2 = \frac{t}{A^2/(4B)} \quad \text{ёки} \quad x_0^2 = Bt$$

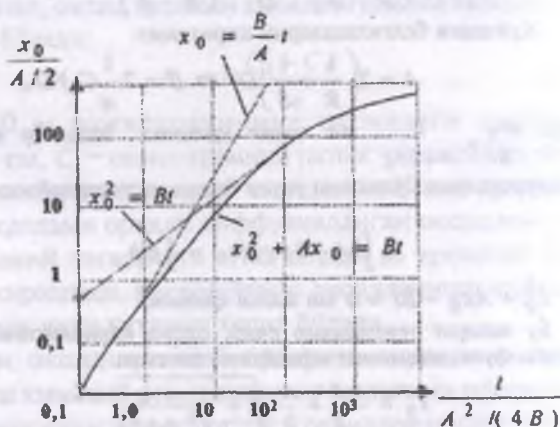
Шундай қилиб, бу чегаравий ҳолда термик оксидлаш жараёнининг параболик қонуни амал қилади. B константа оксидлаш тезлиги константаси сифатида қаралади.

2-ҳол. Оксидлаш жараёни нисбатан кичик вақтда ўтказилмоқда, яъни $t < A^2/(4B)$, бунда

$$\frac{x}{A/2} = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{A^2 K(4B)} \right); x_0 = \frac{B}{A} t$$

3.32-расмда оксид қалинлигининг термик оксидлаш жараёни вақтига умумий ва унинг 2 та чегаравий холи учун боғланишлари кўрсатилган.

Кремнийни сув буғида термик оксидлаш. Кремнийда ҳимояловчи диэлектрик юпқа қатламини ҳосил қилиш учун юқори тозаликдаги сув буғида (10-20 МОм·см атрофида) термик оксидлашдан фойдаланилади.



3.32-расм. SiO_2 юпқа қатлами қалинлигининг кремнийни оксидлаш жараёни утказиётган вақтга боғланиши.

Агар буг микдори реакция тезлигини чекламаса, кремнийнинг сув буғи билан юқори температурали реакциясидан фойдаланилади. Кремний пластинкаси сиртида сув буғининг керакли парциал босимини ушлаб туриш учун сув иситилади.

Оксид юпқа қатламининг структуравий шаклланиши оксид қатлами орқали кремний сиртига сувнинг диффузияли узатилиши ҳисобига рўй беради. Оксид юпқа қатламининг структуравий шаклланишига оксидлаш реакцияси жараёнида ҳосил бўладиган ва пластинканинг ичкарисига диффузияланадиган водород таъсир кўрсатади. Водороднинг диф-

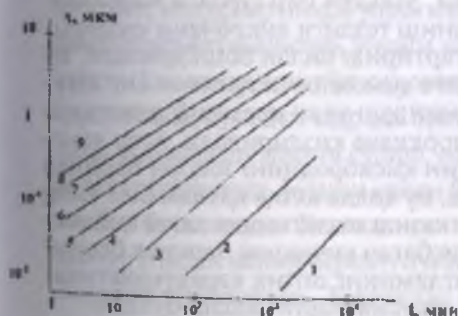
фузия коэффициентининг ($2 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$, 1050°C да) сув диффузия коэффициентидан ($2 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2/\text{с}$, 1050°C да) анча катта эканлигидан кремний — оксид бўлиниш чегарасида гидроксид гуруҳининг ҳосил бўлиши фақат сув молекуласи борлиги билан эмас, балки водороднинг ҳам борлиги билан тушунтирилади.

Оксидланиш жараёни 1100°C температурадан юқори температураларда ўтказилганда оксид қатлами параболик қонун бўйича ҳосил бўлади ва $x^2 = Vt$ ифода билан тасвирланади. Жараён 1100°C дан паст температурада ўтказилганда оксид қатламининг ҳосил бўлиш қонуни параболик бўлмасдан

$$x^2 + V_1 x = V_2 t \quad (3.67)$$

қуринишга эга бўлади.

Оксидланиш жараёни паст температурада ўтказилган сари оксид қатлами чизиқли қонунга яқин қонун бўйича ҳосил бўлади. Оксид юпқа қатлами ўсишининг чизиқли қонуни юқори босимли ($2,5 \cdot 10^5 - 4,0 \cdot 10^7 \text{ Па}$) сув буғида $500 - 800^\circ\text{C}$ температураларда кузатилади.



3.33-риси. Сув буғи атмосферида ўстирилган SiO_2 юпқа қатламининг ҳар хил температураларда вақтга боғланиши:
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 .

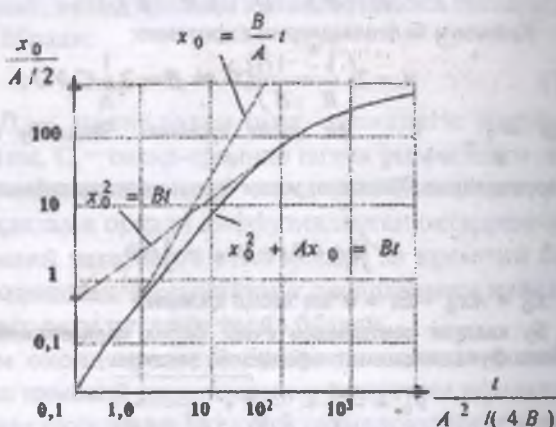
Оксидли юпқа қатламининг ўсиш тезлигига тагликнинг ориентацияси, электр ўтказувчанлик тури ва бошланғич тагликдаги киришмалар концентрацияси катта таъсир қилади.

Планар технологияда ярим ўтказгичли асбоблар ва интеграл микросхемалар тайёрлашда ҳимояловчи диэлектрик юпқа қатламлар муҳим аҳамиятга эга. Улар донор ва акцептор киришмаларини локал диффузия ўтказиш, микросхемаларнинг бир - бирдан изоляцияланган пассив ва актив элементларини шакллантириш, шунингдек p-n ўғишларни ташқи таъсирлардан ҳимоялаш имкониятларини беради.

$$\frac{x}{A/2} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{t}{A^2 K(4B)} \right); \quad x_0 = \frac{B}{A} t$$

3.32-расмда оксид қалинлигининг термик оксидлаш жараёни вақтига умумий ва унинг 2 та чегаравий холи учун боғланишлари кўрсатилган.

Кремнийни сув буғида термик оксидлаш. Кремнийда ҳимояловчи диэлектрик юпка қатламини ҳосил қилиш учун юқори тозаликдаги сув буғида (10-20 МОм·см атрофида) термик оксидлашдан фойдаланилади.



3.32-расм. SiO_2 юпка қатлами қалинлигининг кремнийни оксидлаш жараёни ўтказиладиган вақтга боғланиши.

Агар буғ миқдори реакция тезлигини чекламаса, кремнийнинг сув буғи билан юқори температурали реакциясидан фойдаланилади. Кремний пластинкаси сиртида сув буғининг керакли парциал босимини ушлаб туриш учун сув иситилади.

Оксид юпка қатламининг структуравий шаклланиши оксид қатлами орқали кремний сиртига сувнинг диффузияли узатилиши ҳисобига рўй беради. Оксид юпка қатламининг структуравий шаклланишига оксидлаш реакцияси жараёнида ҳосил бўладиган ва пластинканинг ичкарисига диффузияланадиган водород таъсир кўрсатади. Водороднинг диф-

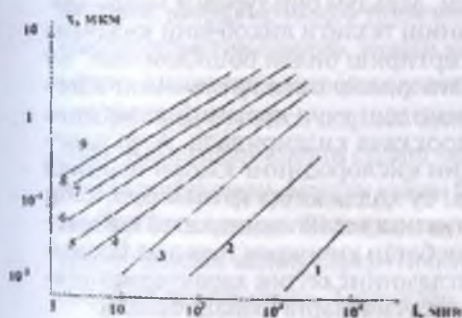
фузия коэффициентининг ($2 \cdot 10^{-6}$ см²/с, 1050°C да) сув диффузия коэффициентидан ($2 \cdot 10^{-10}$ см²/с, 1050°C да) анча катта эканлигидан кремний – оксид бўлиниш чегарасида гидроксид гуруҳининг ҳосил бўлиши фақат сув молекуласи борлиги билан эмас, балки водороднинг ҳам борлиги билан тушунтирилади.

Оксидланиш жараёни 1100°C температурадан юқори температураларда ўтказилганда оксид қатлами параболик қонун бўйича ҳосил бўлади ва $x^2 = V_t$ ифода билан тасвирланади. Жараён 1100°C дан паст температурада ўтказилганда оксид қатламининг ҳосил бўлиш қонуни параболик бўлмасдан

$$x^2 + V_1 x = V_2 t \quad (3.67)$$

кўринишга эга бўлади.

Оксидланиш жараёни паст температурада ўтказилган сари оксид қатлами чизиқли қонунга яқин қонун бўйича ҳосил бўлади. Оксид юпқа қатлами ўсишининг чизиқли қонуни юқори босимли ($2,5 \cdot 10^5$ – $4,0 \cdot 10^7$ Па) сув буғида 500 – 800 °C температураларда кузатилади.



3.33-риси. Сув буғи атмосфeрасида ўстирилган SiO₂ юпқа қатламининг ҳар хил температураларда вақтга боғланиши:
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.

Оксидли юпқа қатламнинг ўсиш тезлигига тағлиқнинг ориентацияси, электр ўтказувчанлик тури ва бошланғич тағлиқдаги киришмалар концентрацияси катта таъсир қилади.

Планар технологияда ярим ўтказгичли асбоблар ва интеграл микросхемалар тайёрлашда ҳимояловчи диэлектрик юпқа қатламлар муҳим аҳамиятга эга. Улар донор ва акцептор киришмаларини локал диффузия ўтказиш, микросхемаларнинг бир - бирдан изоляцияланган пассив ва актив элементларини шакллантириш, шунингдек р-п ўтишларни ташқи таъсирлардан ҳимоялаш имкониятларини беради.

Ҳимояловчи диэлектрик плёнкаларни ҳосил қилиш учун бошланғич материаллар сифатида кварц, кремний монооксида ва диоксида, кремний нитрида, алюминий оксида ва нитрида, бор нитрида ва ҳоказолар ишлатилиши мумкин.

Ҳимояловчи кремний оксида юпқа қатламларини ҳосил қилиш учун кремний монооксидини буглантиришга асосланган иккита усул қўлланилади. Биринчи усулда техник кукунсимон кремний монооксиди ишлатилади. Иккинчи усулда эса кремнийли электрод кислород атмосферасида қиздирилади. Бунда унинг сирти кремнийга нисбатан бугларининг босими юқорироқ бўлган ва осон бугланадиган кремний монооксиди билан қопланади.

Ярим ўтказгичли тагликка чанглатиш йўли билан ҳосил қилинадиган оксидлар Si-SiO-SiO_2 комплекси кўринишида бўлади. Бир жинсли ҳимояловчи оксид қатламини ҳосил қилиш учун кремний монооксиди кукунидан буглантириш манбаи сифатида фойдаланилганда энг эътиборли нарсалардан бири кремний монооксиди кукунини жойлаштириладиган маҳсус ликобча(тигель)нинг конструкцисаи ҳисобланади. Бугланиш тезлиги ликобчанинг геометрик шаклига, монооксид кукунининг ҳароратига, босимига, шунингдек бир жинслилигига боғлиқ бўлади. Маълум бир турдаги манбалардан фойдаланилганда бугланиш тезлиги ликобчани қиздирадиган электр қувватини ўзгартириш билан бошқарилади. Бу усулда бошланғич пластинага ҳимояловчи қатламнинг адгезияси яхши бўлишини таъминлаш учун кремний пластиналари 300°C ва ундан юқорироққача қиздирилади. Агар чанглатиш кичик тезликда, лекин кислороднинг юқори парциал босимида амалга оширилса, бу ҳолда юпқа қатлам SiO_2 каби хусусиятларга эга бўлади. Ўтказиш тезлигининг катта қийматларида ёки кислороднинг нисбатан кичикроқ парциал босимларида ўтказилган юпқа қатламнинг оптик характеристикалари SiO плёнкаларига хос хусусиятларга ўхшаш бўлади.

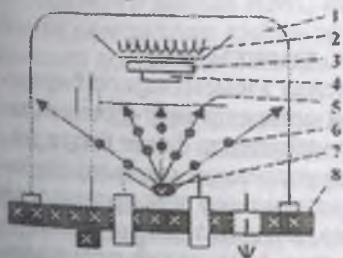
SiO_2 плёнкаси хусусиятларига эга бўлган ҳимояловчи юпқа қатламларни одатда манбанинг $1300-1400^\circ\text{C}$ ҳароратида ва умумий босими $6,5 \cdot 10^{-4}$ Па дан кам бўлмаган ҳолда ҳосил қилинади.

Оксид плёнкаларини вакуумда чанглатиш усули билан олиш учун манба сифатида кремний қўлланилиши мумкин. Бунда кремнийнинг сиртида рўй берадиган реакция асосий роль ўйнайди. Бу сирт яқинидаги кислороднинг ҳарорати ва парциал босими кремний сиртига кислород адсорбцияси ва SiO нинг бугланиш тезликларини аниқлайди. Кремний $700-1000^\circ\text{C}$ ҳароратгача қиздирилади. Кислороднинг парциал босими шундай бўлиши керакки, бунда кремнийли манба сир-

тида $\text{Si} + \text{O} \rightarrow \text{SiO}$ реакцияси таъминланиши лозим. Бу усул билан бошлангич ярим ўтказгичли пластинада $0,1 \text{ мкм}$ қалинликдаги юпқа қатламни 900°C ҳароратда ва $1,3 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$ босимда 30 дақиқа ичида олиш мумкин. Пластиналар жойлаштирилган таглик қиздирилганда оксид буғларининг адсорбцияси ва уларнинг ярим ўтказгичли пластиналарга адгезияси яхшиланади. Ўтқазилган оксид пленкасининг буғланиб кетмаслиги учун пластиналарининг ҳарорати манба ҳароратидан $100\text{--}200^\circ\text{C}$ пастроқ бўлиши лозим.

3.6.3. ЮПҚА ҚАТЛАМЛАРНИ ҲОСИЛ ҚИЛИШ ТЕХНИКАСИ

Кремний оксиди пленкаларини термик буғлантириш билан ҳосил қилиш жараёни махсус босимли вакуум камераларида ўтказилади. Бунинг учун ВУП-5 вакуум қурилмасидан фойдаланилади. Жараённинг схемаси 3.34-расмда келтирилган. Жараён вакуум камерасини юклаш билан бошланади: буғлантирилувчи материал тигелларга жойлаштирилади, тагликлар таглик ушлагичларга, ниқоблар ниқоб ушлагичларга ўрнатилади. Ундан кейин камера герметик ёпилиб, ундаги ҳавони сўриш бошланади. Беркитгич (заслонка)нинг ёпиқ ҳолатида тагликларни белгиланган ҳароратгача, буғлатгичлар эса буғланиш ҳароратигача қиздирилади. Камерада ҳавони сўриш чегаравий вакуум даражасигача амалга оширилади. Бундан кейин беркитгич очилади ва чанглатириш бошланади. Белгиланган қалинликдаги пленка ҳосил қилинганидан кейин беркитгични ёпиш йўли билан чанглатиш жараёни тўхтатилади. Тагликлар совитилади ва кейин секин-аста камерага ҳаво киригилади, сўнг тагликлар ечиб олинади.



3.34-расм. Термовакуум чанглатиш жараёнининг схемаси:
1-вакуум камера; 2-таглик қиздиргичи; 3-таглик ушлагичи; 4-таглик; 5-беркитгич (заслонка); 6-буғланувчи модданинг зарралари; 7-монооксид кремний булагин солинган буғлантиргич; 8-таянч плита.

лойиҳалаштирилаётган технологик жараён туғрисида миқдорий ахборотлар келтирилмайди

ИМС технологиясида *профилли технологик схема* кенг тарқалган. Бунда ҳар бир операциядан кейин ҳосил бўладиган структуралар (профиллар) кўрсатилади.

Умумий технологик жараёнлар бажарилишининг аниқ кетма-кетлиги келтирилган маълум миқдордаги бир хиллаштирилган жараён ёки операциялардан ташкил топган бўлиб, маълум бир турдаги буюм ёки полуфабрикатни тайёрлаш учун қўлланилади.

Бир хиллаштирилган технологик жараён бир хил турдаги операциялар мажмуасидан иборат бўлиб, битта технологик участкада ва бир-бирига яқин жиҳозлардан фойдаланилади. Масалан кимёвий тозалаш, диффузия, оксидлаш, фотолитография ва бошқалар.

Умумий технологик жараённи тавсифлашда *спиралсимон технологик схемадан* фойдаланиш қулайдир.

ИМС тайёрлаш технологиясининг ҳамма босқичларини тўртта гуруҳга бириктириш мумкин:

1. Бошланғич пластинани ҳосил қилиш.
2. Яримўтказгич, диэлектрик ва металл қатламли плёнкаларни ўстириш.
3. Пластина сиртида ИМС топологиясини ҳосил қилувчи расмларни шакллантириш.
4. ИМСни йиғиш ва монтаж қилиш.

3.8.1. ЮПҚА ПЛЁНКАЛИ ИМС (ГИС)ЛАРНИ ТАЙЁРЛАШ ТЕХНОЛОГИЯСИНинг УМУМий МАРШРУТЛАРИ

Гибрид интеграл микросхемаларда (ГИС) ҳамма пассив элементлар диэлектрик пластинада (тагликда) плёнка ҳолатда ҳосил қилинади. Актив элементлар: диодлар ва транзисторлар эса, плёнкали схемага осма равишда уланади. Мураккаб ГИС ларда осма элементлар сифатида ИМСлар ва микроэлектрон компонентлар қўлланилган бўлса, уни микройигма (микросборка) дейилади. ГИС лар юпқа ва қалин плёнкали хилларга бўлинади.

Плёнкали технология деганда гибрид ва плёнкали ИМС ларнинг платаларини тайёрлаш тушунилади. Юпқа плёнкали технологияда қалинлиги бир мкм дан ошмаган пассив элементлар чанглатиш, буғлатиш, ион плазмали жараёнлар ёрдамида тайёрланади. Қалин плёнкали технологияда эса, пас-

сив элементларнинг қалинлиги 5-25 мкм бўлиб, трафарет босма ёрдамида ҳосил қилинади.

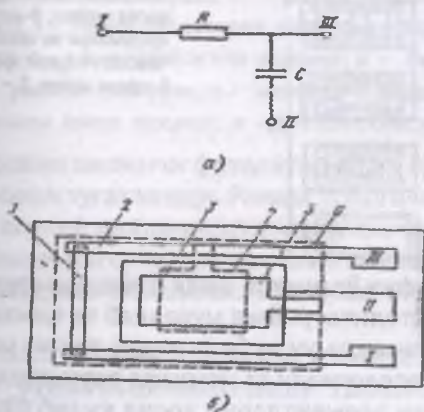
Юпқа плёнкали структуралар 1) эркин маска, 2) фото-литография ёрдамида тайёрланади.

Эркин маска ёрдамида юпқа плёнкали структуралар ҳосил қилиш. Эркин металл маскalar термовakuумли чанглатиш ва ион плазмали буғлатишлар билан биргаликда элементлар топологиясини ҳосил қилиш учун фойдаланилади.

Юпқа плёнкали структураларни тайёрлаш узлуксиз, айриқча ва комбинацияли вакуум жараёнлари орқали бажарилади. Бунда комбинацияли вакуум жараёни кўпроқ қўлланилади. Бу жараённи РС-ИМ юпқа плёнкали структурани тайёрлаш мисолида кўриб чиқамиз (3.35-расм).

Юпқа плёнкали РС-структураларни эркин маска ёрдамида тайёрлаш жараёнларини иккита а) ва б) босқичга бўлиш мумкин (3.36-расм).

а) Резистивли ва ўтказгичли плёнкаларни чанглатиш узлуксиз жараён ҳолида битта вакуум камерасида бажарилади. Резистив қатлам хромни чанглангириб ҳосил қилинади. У сублимацияланадиган модда бўлиб, эриш температурасидан кичик бўлган 500 °С температурада учиради. Бунда резистивли вольфрам буғлантиргичдан фойдаланилади.



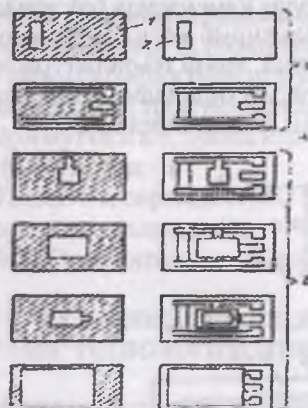
3.35-расм. Юпқа плёнкали РС-ИМнинг принципиал электр схемаси (а) ва топологияси (б): 1-резистор (хром); 2-ўтказувчи йулчалар ва контакт майдончалари (қатлам таги хромли мис); 3-конденсаторнинг пластини қопламаси (алюминий); 4-конденсаторнинг диэлектриги (германий монооксида), 5-конденсаторнинг юқори қопламаси (алюминий); 6-ҳимоя қатлами (кремний монооксида)

Чанглантириш жараёни давомида хром қолдиқ кислород билан бирикиб юқори қаршилиқли плёнка ҳосил қилади. Хромни чанглантишда таглик 200-250 °С гача қиздирилади. Керакли қалинлиқтаги плёнка ҳосил бўлгандан сўнг жараён тўхтатилади.

Ўтказгичли пленкалар суюқ ҳолдаги мисдан буғлантири-
либ ҳосил қилинади.

б) *Конденсатор қопламалари ва ҳимоя қатлами бошқа*
қурилмада чанглантириб ҳосил қилинади.

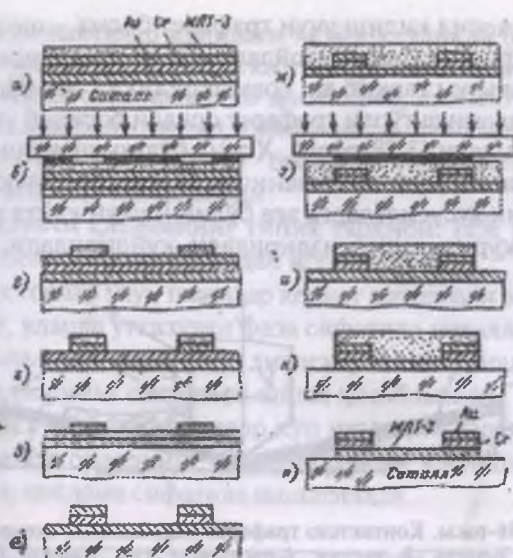
Вакуум камераси тўртта марта пленкаларни чанглантиш кетма кетлигига мос ҳолда чанглантириладиган материаллар — навескалар: алюминий, германий монооксиди, алюминий ва кремний монооксиди билан юкланади. Кейин камера герметикланади ва $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па босимгача ҳавоси сўрилади. Тагликнинг температураси ишча ҳолатгача кўтарилади ва чанглантишнинг ҳамма жараёнларида ўзгармас ҳолатда ушлаб турилади.



3.36-расм Эркин маска
ёрдамида юлқа плёнкали
RC-ИМ таъйёрлаш
схемаси: а-резисторлар,
ўтказгичлар ва контакт
майдончаларини чанглантиб
ҳосил қилиш; б-конденсатор
қатламлари ва ҳимоя плёнкасини
чанглантиб ҳосил қилиш;
1-эркин масса, 2 — таглик.

**Фотолитография ёрдамида юлқа плёнкали структуралар-
ни тайёрлаш.** Фотолитография мураккаб ва қиммат туради-
ган жараён бўлганлиги учун бу усулдан эркин маска ёрда-
мида мураккаб топологияли ва номинал параметрлари юқори
аниқликда бўлган элементларни ҳосил қилиб бўлмайдиган
ҳолатларда фойдаланилади.

Юлқа плёнкали R-структураларни фотолитография ёрдами-
да тайёрлаш схемаси икки босқичдан иборат бўлади (3.37-расм).
Аввал ўтказгич ва контакт майдончалари таг ости хром бўлган
оптандан тайёрланади. Бунда хром МУТТ-3 қотишмадан тайёрланган
резисторларнинг плёнкасига яхши адгезияни таъминлаб беради.



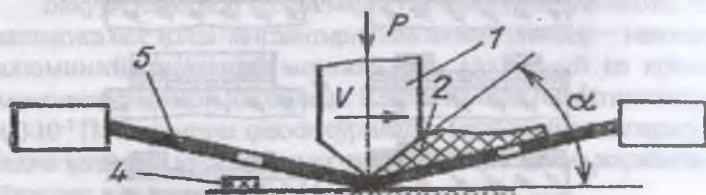
3.37 -расм. Юпқа плёнкали R-ИМни фотолитография ёрдамида тайёрлаш схемаси: а - МЛТ-3, хром, оltин плёнкаларини ўтказиш ва фотоқатламни шакллантириш; б - расмга тушириш; в - очилтириш (проявление); г - оltин плёнкасини локал емириш; д - фотониқобни олиб ташлаш; е - хром плёнкасини емириш; ж - фотоқатламни шакллантириш; з - расмини тушириш; и - очилтириш (проявление); к - МЛТ-3 қотиқламни локал емириш, л - фотониқобни олиб ташлаш.

Ундан кейин иккинчи фотолитография ёрдамида резистор шаклланиши тугалланади. Расмда ўтказгичлар кўрсатилмаган. Бу ерда асосий қийинчилик емиргачни танлаш бўлиб, у фақат керакли материалнигина олиб ташлаши ва плёнканинг параметрларини ёмонламаслиги керак.

3.8.2. ҚАЛИН ПЛЁНКАЛИ ГИБРИД ИНТЕГРАЛ МИКРОСХЕМАЛАРИНИНГ ТЕХНОЛОГИЯСИ

Қалин плёнкали гибрид ИМС ларни ишлаб чиқариш технологияси ИМС конструктив элементларидаги ўтказгичлар, резисторлар ва диэлектриклар ролини бажарувчи ҳар хил материалларнинг қалинлиги 10мкм дан юқори бўлган қатламларини ҳосил қилишга асосланган. ИМС нинг берилган

шаклини ҳосил қилиш учун трафарет босма - шелкография (сеткография) усулидан фойдаланилади. Бу куйидагича ўтказилади: маълум таркиб ва қовушқоқликка эга бўлган паста ракель ёрдамида турли трафарет орқали босилиб унинг шакли туширилади (3.38-расм). Ҳосил бўлган шаклли қатламга унинг платага мустаҳкамланиши ва керакли электрофизик ва механик хусусиятларга эга бўлиши учун қайта ишлов берилади - қурилади, қиздирилади, куйдирилади.



3.38-расм. Контактсиз трафарет жараёнининг схемаси:
1-ракель, 2-паста. 3- таглик, 4-пастанинг изи, 5-ниқоб (маска), V-
рикелнинг ҳаракат тезлиги, α - ракелнинг таглик сирти билан
учрашиш бурчаги, P- босим.

Қалин плёнкали технологияда аниқлик бўйича ютқазилса ҳам жараённинг оддийлиги ва иқтисодий жиҳати билан анча катта ютуққа эга бўлинади.

Куйида қалин плёнкали ГИС тайёрлаш технологик жараёнининг структура схемаси келтирилган (3.39-расм).

Пасталар босишнинг кетма-кетлиги термик ишлов температурасининг камайиш тартибига мос келиши керак.

Қалин плёнкали структуралар учун тагликлар асосан 22ХС маркали алюмокерамикадан тайёрланиб, унинг таркиби 94,4% - алюминий, 2,76% - кремний, 2,35% - марганец, 0,49% - хром оксидларидан ташкил топган.

Таглик учун материалларнинг диэлектрик сингдирувчанлиги иложи борица кичик қийматга эга бўлгани маъқул, чунки бунда электр сигналининг кечикиши минимум ҳолга келади:

$$\frac{\tau_k}{\ell} = \frac{\varepsilon}{c},$$

бу ерда, τ_k - кечикиш вақти, ℓ - тракт узунлиги, ε - диэлектрик сингдирувчанлик, c - ёруғлик тезлиги.

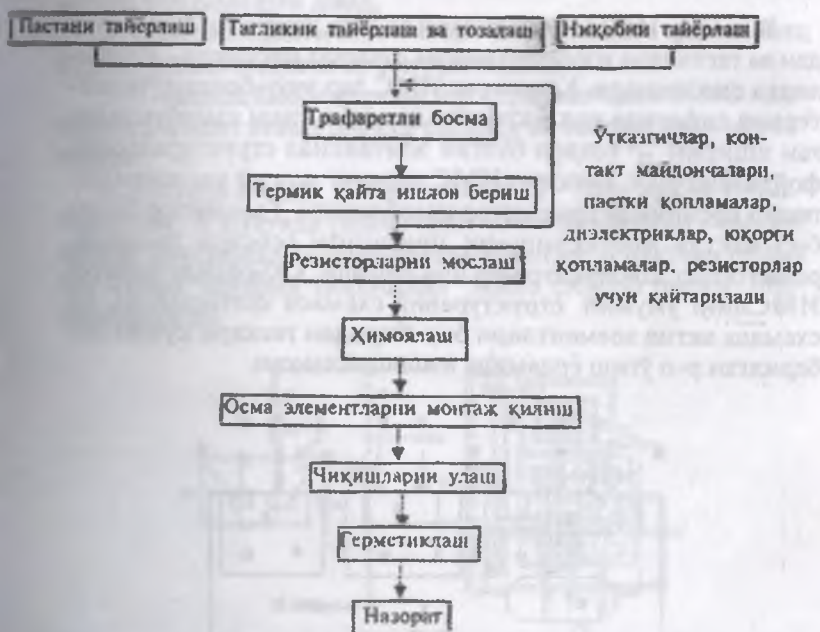
Одатда пасталар қуйидаги кетма-кетликда босилади ва термик ишлов берилади: ўтказгичлар, контакт майдончалари, конденсаторнинг пастки қопламаси, диэлектриклар, устки қоплама, резисторлар, ҳимоялаш.

Ўтказувчи қатлам учун пасталар нодир металллар (Au, Ag, Pd) асосида тайёрланади.

Ўтказувчи қатламнинг типик таркиби: 12% Pd, 75% Au ва 13% боғловчи материалдан иборат бўлади.

Резисторлар учун пасталар кермет материали асосида тайёрланиб, уларда ўтказувчи фаза сифатида металллар (Pd, Ag, W ва вольфрам карбиди), диэлектрик материал сифатида эса металлларнинг оксиди ва шиша ҳисобланади.

Диэлектрик материаллар кўп қатламли структураларни ва конденсаторларнинг қопламаларини изоляция қилувчи герметик қоплама сифатида ишлатилади.



3.39-расм. Қалин плёнкали гибрид ИМС ларни тайёрлаш схемаси.

Герметик қоплама сифатида ҳар хил органик компаундлар қўлланилади.

Конденсаторлар тайёрлашда диэлектрик қатлам сифатида сегнетоэлектрик материаллардан фойдаланилади, масалан: BaTiO_3 асосидаги ПК-1000-30 маркали паста.

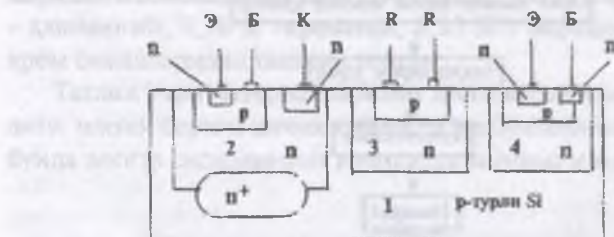
Пасталарга термик ишлов бериш иккита операцияни ўз ичига олади: қуритиш ва куйдириш.

Қуритиш операциясида пастадаги учувчан компонентлар секин аста йўқотилади. Бу жараён $80-150^\circ\text{C}$ температурада 5-15 минут давомида печда ёки инфрақизил лампаларда ўтказилади.

Куйдириш операцияси эса конвейерли, узлуксиз ишловчи, масалан СК-10/16.6-5 маркали электр печларида бажарилади.

3.8.3. БИПОЛЯР ИМСЛАРНИ ТАЙЁРЛАШ ТЕХНОЛОГИЯСИ

Биполяр ИМС элементлари электр жиҳатдан бир биридан ва тагликдан изоляцияланган алоҳида соҳаларда - чўнтакларда шаклланади. Кўпчилик ИМС лар учун бошлангич материал сифатида коллекторлар қаршилигини камайтирадиган яширин n^+ соҳаси бўлган эпитаксиал структуралардан фойдаланилади. Биполяр ИМС ларнинг асосий элементи биполяр кремнийли транзистор ҳисобланади. Транзистор билан бир вақтда мос келишлик принципи асосида диодлар, резисторлар, конденсаторлар шаклланади. 3.40-расмда биполяр ИМСнинг умумий структуравий схемаси келтирилган. Бу схемада актив элементлари бир-биридан тескари қучланиш берилган p-n ўтиш ёрдамида изоляцияланган.



3.40-расм. Кремнийли ИМС структураси: 1-электр ўтказувчанлик тури p бўлган таглик; 2-биполяр транзистор; 3-диффузион резистор; 4-база ва коллектор соҳалари бириктириб ҳосил қилинган диод.

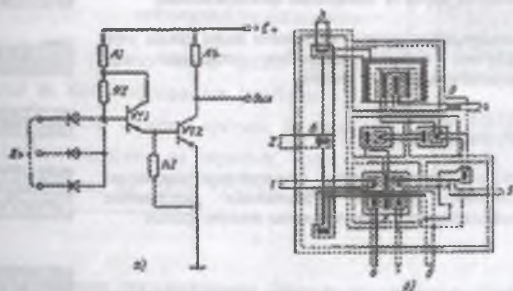
Яримўтказгичли ИМСда резисторлар кремний монокристалининг ички қисмида юқори омли қатламлар шаклида ҳосил қилинади. Бундай резисторнинг қаршилиги киришма концентратсияси профилига, диффузия чуқурлигига ва диффузион участканинг геометрик ўлчамларига боғлиқ бўлади. ИМСда конденсаторлар икки хил бўлади: 1) диффузион конденсатор, бунда р-п ўтишининг сизгимидан фойдаланилади ва 2) юпқа плёнкали конденсатор, бу кремнийли тагликнинг сиртида махсус участкаларда тайёрланади. Бунда диэлектрик сифатида кремний диоксидидан фойдаланилади. Конденсаторларнинг қопламалари сифатида Si ва Al плёнкаси хизмат қилади. Бундай конденсаторларнинг сизгими SiO_2 қатламининг қалинлиги 0,08 мкм бўлганда 600 мкм² квадрат метал плёнкали юзада 0,25 пФ ни ташкил қилади. Максимал ишчи кучланиш 20 В га етади.

ИМСда диодлар 2 хил бўлади:

- 1) эмиттер-база ўтишига эквивалент бўлган кичик тешувчи кучланишли диод,
- 2) транзистордаги коллектор - база ўтишига эквивалент бўлган ўртача тешувчи кучланишли диод.

3.41-расмда биполяр резистор - транзисторли ИМС мантикий элементининг электр схемаси ва топологияси кўрсатилган.

А нуқтада кириш диоди коллектор - база қисқа туташтирилган, Б нуқтада резисторли изоляциялашган соха энг мусбат потенциал билан бирлаштирилган, В нуқтада таглик энг кичик манфий потенциал масса (земля) билан бирлаштирилган.



3.41-расм. Мантикий элементнинг электр схемаси (а) ва топологияси (б):

1,5,7,8-киришлар (входы); 2-энг катта мусбат потенциал; 3-чиқиш;
4-ср (масса).

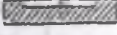
ИМСларнинг юзаси 6 дан 38 мм² гача бўлади. Шу сабаб-ли диаметри 200 мм бўлган кремний пластинасида юздан минггача ИМС ларни жойлаштириш мумкин.

Биполяр ИМСларнинг қуйидаги турлари мавжуд: ДТЛ – диод- транзисторли мантиқли; ТТЛ – транзистор - транзисторли мантиқли; ЭСЛ – эмиттер-боғланган мантиқ-ли; ТТШЛ – транзистор-транзисторли мантиқли Шотки диоди билан; U²L - интеграл инжекцияли мантиқли ва бошқалар.

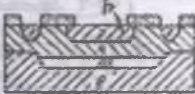
Элементлари p-n ўтишлар билан изоляцияланган ИМС-лар тайёрлаш. Қуйида элементлари p-n ўтиш ёрдамида изо-ляцияланган биполяр ИМС шаклланишининг асосий жара-ёнлари интеграл p-n-p транзистор мисолида келтирилган. Бошланғич материал сифатида ғадир-будурлиги 0,001 мкм гача жилоланган p - турли Si пластинкаси хизмат қилади. Технологик жараёнлар операцияларининг номлари ва кетма-кетлиги 3.4 -жадвалда келтирилган:

3.4-жадвал

Биполяр яримўтказгичли структураларни шакллантирувчи технологик жараён

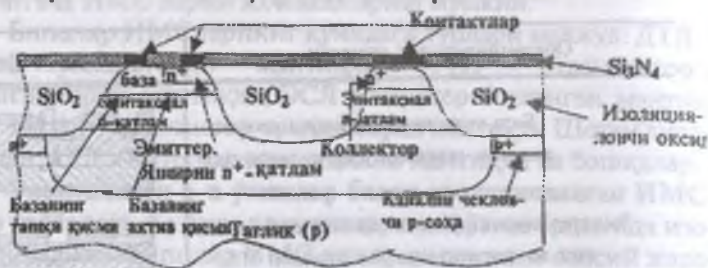
Операцияларнинг номлари	Структуранинг профили
Жилданган ксими p-турлиги пластинкаларни тозалаш; уларнинг сифатини аниқлаш	
Биринчи (қисқичлик оксид қатламидан) қалыңлигини ва товасхилигини бор - йўқлигини назорат қилиш	
Янақин қаликстор сохисини ҳосил қилиш учун фотолитография (I) амблидан фойдаланилади	
Қаликсторнинг назорат қатламидан ҳосил қилиш учун диффузияс шарин қаликстор сохисининг сирт қарининини назорат қилиш	
Оксидни олиб ташлаш	
Ўлказувчидаги n-турлиги кремнийнинг эпитаксиял қатламидан ўтказиш; эпитаксиял қатламидан товасхилигини ва қарининини назорат қилиш	
Қайта оксидлан; оксиднинг қалыңлигини ва товасхилигини бор - йўқлигини назорат қилиш	
Изоляциялиги соҳи ва бас сохисидан эпитаксиялдан диффузия учун фотолитография (II) амблидан	

3.4-жадвалнинг давоми

Операцияларнинг номлари	Структура профили
Базис соҳасини ва изоляцияловчи халқани шакллантирувчи диффузия	
Эмиттер соҳасини ҳосил қилиш учун оксидлаш ва фотолитография (шаблон III)	
Эмиттер соҳасини ҳосил қилиш учун диффузия ва изоляцияловчи халқани бирлаштириш	
Эмиттер ва коллекторга омик контактлари тағида иккинчи соҳасини ҳосил қилиш учун I-фотолитография (шаблон IV)	
Базис соҳасида омик контакт тағида р-соҳасини диффузия билан ҳосил қилиш учун иккинчи литография (шаблон V)	
Алюминий билан металланиш	
Контактлар ҳосил қилиш учун фотолитография (шаблон VI); алюминийни қиздириш	
Узаро бирикмалар (коммутация) ҳосил қилиш учун металланиш ва фотолитография (шаблон VII); ишлай олинган электр назорат қилиш; бутаклаш; иккиланиш; яроксизларни аниқлаш ва сараланиш; яроксизлик сабабини таҳлил қилиш ва ТЖга тузатиш киритиш	

Элементлари диэлектрик билан изоляцияланган биполяр ИМСлар тайёрлаш. Диэлектрик билан изоляциялаш ИМСлар параметрларининг яхшиланганини таъминлайди. 3.42-расмда кремний иккиоксидининг қалин қатламидан фойдала-

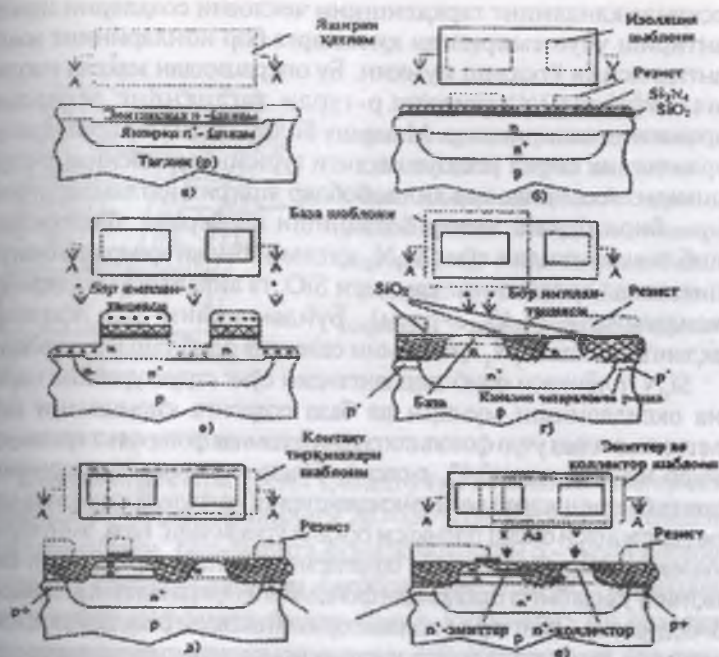
ниб изоляцияланган биполяр p - r - n транзисторли микросхема келтирилган. Бу усулдан фойдаланилганда актив элемент ишғол қилган юза ва паразит сиғимлар камайди.



3.42-расм. Оксид билан изоляцияланган биполяр транзисторли ИМСнинг тасвири.

Бошланғич материал сифатида p -турли ўтказувчанликли киришмалар билан кучсиз легирилган ($\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$) тагликлардан фойдаланилади. Аввал таглик юзасида ниқобловчи қатлам сифатида ишлатиладиган кремнийнинг оксиди ҳосил қилинади. Ундан сўнг яширин қатлам диффузияси учун тирқишчалар очилади. Бу тирқишчалардан мишьяк ёки сурьма ион имплантация қилинади. Бундай яширин қатламлар коллекторнинг кучли легирилган p^+ -қисми сифатида коллекторнинг қаршилигини камайтириш учун хизмат қилади. Имплантацияланган қатлам термик ишлов бериш йўли билан тагликнинг ичкарасига яширин қатламини шакллантириш учун ҳайдалади. Яширин қатлам шакллангандан сўнг таглик сиртида ўтказувчанлиги p -турли бўлган эпитаксиал қатлам ўстирилади (3.43, а-расм).

Эпитаксиал қатлам ўстирилгандан сўнг термик оксидлаш йўли билан аввал қалинлиги $\sim 50 \text{ нм}$ бўлган оралиқ плёнка SiO_2 ўстирилади ва ундан кейин таглик сиртига қалинлиги тахминан $\sim 100 \text{ нм}$ атрофда бўлган Si_3N_4 плёнкаси ўтказилади. Бу плёнка қийин оксидланидиган бўлгани сабабли ўзининг тагидаги кремний қатламларини оксидланишдан сақлайди. Оралиқ юпқа оксидли қатлам эса буферли қатлам вазифасини бажариб, кейинги бўладиган юқори температурavi оксидлаш босқичларида эластик кучланишлар натижасида дефектларнинг ҳосил бўлишидан ҳимоя қилади. Ўстирилган плёнканинг сиртида изоляцияловчи соҳаларнинг ҳолатларини аниқлаш учун фотолитография ўтказилади (3.43, б-расм). Фоторезистдан маска сифатида фойдаланиб, нитрид



3.43-расм Биполяр транзисторнинг ҳар қил босқичлардаги шаклланишининг юқоридаги ва қундилаг қосимларининг кўриниши: а - яширин қатлам шаблони ҳамда эпитаксиал қатлам устирилгандан ва яширин p^+ -қатлам шакллантириладан сўнгги структура; б - изоляцияни шакллантирувчи шаблон ҳамда нитрид кремний ва оралик оксиддан ташкил тоилган иккин қатламни ниқобнинг сиртида фото-резистни ниқобли структуранинг кўриниши; в - нитрид кремний, оралик оксид ва кремний қатламлари емирилгандан сўнгги ҳамда инверсли канал соҳасининг кенгйишини чекловчи ион имплантациядан кейинги структуранинг кўриниши; г - базани ҳосил қилувчи шаблон ҳамда изоляцияловчи оксидли соҳалар устирилгандан сўнгги ва база соҳасига бор имплантация қилингандан кейинги структуранинг кўриниши; д - контакт соҳаларини шакллантирувчи шаблон ҳамда база ҳосил қилингандан сўнгги ва база, эмиттер ва коллекторга контакт тирқишлари очилгандан кейинги структуранинг кўриниши, е - эмиттер ва коллектор контактларини ҳосил қилиш учун шаблон ҳамда эмиттер ва коллектор соҳаларига мишьяк имплантация қилингандан кейинги структуранинг кўриниши.

кремний, оралик оксид қатламлари ва эпитаксиал қатламнинг ярим қалинлиги емирилади (3.43, в-расм). Мана шу

босқичда каналнинг тарқалишини чекловчи соҳаларни шакллантириш учун емирилган қисмларга бор ионларининг имплантациясини ўтказиш мумкин. Бу операциядан мақсад изоляцияловчи оксид тагидаги р-турли тагликнинг легирлаш даражасини оширишдир. Мана шу билан кучсиз легирланган р-турли таглик сирти ўтказувчанлиги тури инверсиясининг олди олинади. Акс ҳолда ҳар хил асбоблар яширин қатламларининг бир - бири билан электр боғланиши юз беради. Фоторезист олиб ташлангандан сўнг Si_3N_4 қатлами билан ҳимояланмаган эпитаксиал қатламнинг ҳаммаси SiO_2 га айланмагунча термик оксидланади (3.43, г-расм). Бундан кейин SiO_2 қатлами сақланган ҳолда Si_3N_4 қатламини селектив олиб ташлаш мумкин.

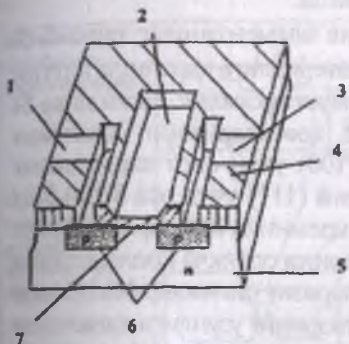
Si_3N_4 плёнкаси олиб ташлангандан сўнг структуранинг сирти яна оксидланиши мумкин ва база соҳасига киришмани ион имплантациялаш учун фотолитография ёрдамида фоторезист қатламида ниқоб шаклланади (3.43, г-расм). Бунда киришма ионларининг қанаъат кетиш жараёнини кучсизлантириш мақсадида киришманинг имплантацияси оксид плёнкаси орқали ўтказилади. База, эмиттер ва коллекторнинг белгиланган соҳаларига контакт тирқишлари бир вақтнинг ўзида битта шаблондан фойдаланган ҳолда очилиши мумкин (3.43, д-расм). Эмиттер ва коллектор контактлари соҳаларига кичик энергияда, аммо катта дозада мишьяк ионлари имплантацияланаётганда база контактини ҳимоя қилиш учун фоторезистли ниқобдан фойдаланилади (3.43, е-расм).

Технологик циклнинг танланган бу варианты қўшимча равишда коллектор контакти соҳасига фосфор ионларининг локал имплантациясини ҳам ўз ичига олиши мумкин. Бундан ташқари базанинг ташқи соҳасига базанинг контакт қаршилигини камайтириш мақсадида юқори дозадаги киришма ионларининг локал имплантацияси ҳам ўтказилиши мумкин. Бу вақтда эмиттер ва коллектор контактлари фоторезистли ниқоб билан ҳимояланган бўлиши керак.

3.8.4. МАЙДОНЛИ ИМСЛАРНИ ТАЙЁРЛАШ ТЕХНОЛОГИЯСИ

Майдонли ИМС таркибида индукцияланган каналли МОП транзисторлар энг кўп қўлланилади. 3.44-расмда ИМСдаги р-каналли МДП транзистори структурасининг схемаси келтирилган.

Қуйида МДП - ИМС технологиясининг асосий вариантларидан бири — р - каналли МДП- транзисторли структура-ни тайёрлашни кўриб чиқамиз.



3.44-расм. ИМСдаги МДП-транзисторининг конструкцияси:
1,3-мос ҳолда кириш ва чиқишнинг алюминийли контактлари;
2-алюминийли затвор; 4-изоляцияловчи оксид; 5-кремнийли таглик;
6-кириш ва чиқишнинг р-типли соҳалари; 7-затворости диэлектриги.

Бундай структура ҳосил қилиш учун бошланғич материал сифатида n — турли, қалинлиги 200–250 мкм бўлган кремнийдан фойдаланилади. Бир-бирига яқин жойлашган p — турли кириш ва чиқиш соҳалари оксидли ниқобдан тирқиш очиб 1–2 микрон чуқурликка диффузия билан ҳосил қилинади. Бу соҳалар оралиғида кремний сиртида юпқа (50–100 мкм) ва ўта тоза кремний оксидининг (SiO_2) плёнкаси ҳосил қилинади ва унга алюминий плёнкаси ўтқазилади. Бу МДП - транзисторга затвор (очқич-ёпқич) бўлиб хизмат қилади. Кириш ва чиқишнинг p -турли соҳаларида алюминийли омик контактлар шаклланади. Агар затворости диэлектриги сифатида кремний оксиди қўлланилса, унда ИМС ИМС-МОП (металл-оксид-полупроводник) турли ёки МОП-ИМС дейилади.

МОП интеграл схемаларнинг конструкцияси ва технологиясининг сезиларли соддалиги уларнинг радиоэлектрон қурилмаларда кенг қўлланилишига асос бўлди.

МОП-ИМС ишлаб чиқаришда технологик операцияларнинг умумий сони 45 ни ташкил қилса, биполяр ИМСларда эса — 130 ни ташкил қилади. МОП-ИМС технологиясида мураккаб операциялар сонининг камайиши яроқли қурилмалар чиқишининг ошишига сабаб бўлди.

МОП-ИМС технологиясида нозик жиҳатлар: затворости оксидини ҳосил қилиш, затвор билан каналнинг бир-бири

билан аниқ устма - уст тушишини таъминлаш ва канали қисқа бўлган структура ҳосил қилиш.

Затворости оксиди ИМС актив элементининг таркибий қисми бўлиб, унга контакт ниқоб материалига қараганда қаттиқ талаблар қўйилади: юқори электр мустаҳкамлик, ҳажмда ва $\text{Si} - \text{SiO}_2$ чегарасида минимал заряд, ҳоссаларининг максимал стабиллиги ва хоказо. Кремний (100) учун сирт зарядининг зичлиги $1,4 \cdot 10^{-3}$ Кл/см² ни, кремний (111) учун эса $8 \cdot 10^{-4}$ Кл/см² ни ташкил қилади. Шу сабабли кремний (100) афзалроқдир.

Затвор кириш ва чиқиш боғларини ортиқча қопламаслиги керак, акс ҳолда ҳосил бўладиган паразит снгимлар ИМСнинг тезкорлигини камайтиради. Агар затворнинг узунлиги каналнинг узунлигидан кичик бўлса, унда исток-сток (кириш-чиқиш) занжири электр жиҳатдан узилган бўлиб қолади.

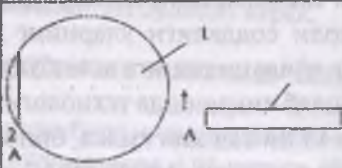
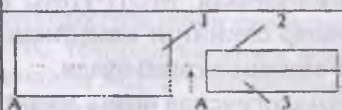
Канал узунлиги ток ташувчиларнинг киришдан чиқишга ўтиш вақтини, яъни МОП-ИМС ларнинг тезкорлигини белгилайди.

МОП-ИМС тайёрлашнинг кўп сонли технологик усуллари мавжудлигига қарамасдан асосий технология сифатида р-ёки n-каналли МОП-ИМС тайёрлаш жараёни ҳисобланади. Бу технологик жараённинг схемаси 3.5-жадвалда келтирилган.

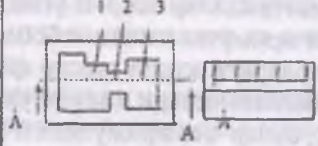
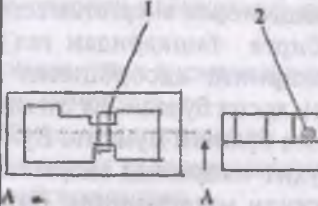
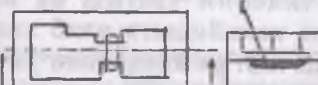
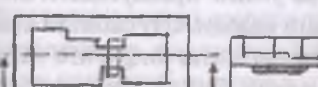
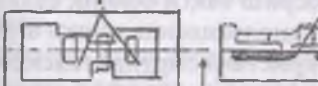
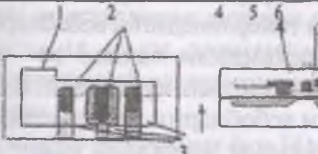
Бошлангич кремний пластинасининг диаметри 60 - 250 мм атрофида бўлади.

3.5-жадвал

Интеграл МОП-транзисторини тайёрлашнинг технологик (ўқув-лабораториявий) жараёни

Операциянинг номи	Операциядан кейинги структура (фрагментининг пани ва профили (А-А бўйича қирққим))	Эстатма
Тағлиқни боғлашчи назорат қилиш		1-диаметри 60 дан 250 мм гача бўлган кремний пластинаси; 2-пластила қирққинининг фрагменти
Пластишнни бирламчи оксидланг		1- Si пластина-синияги структура фрагментининг пани; 2-оксид қатла ми; 3 - n-турли Si тағлиқ

3.5-жадвалнинг давоми

Бирламчи ниқоблаш ва бирламчи емириш		1-исток (кириш) соҳаси; 2-ятовор (очқич-ёлқич) соҳаси; 3-сток (чиқиш) соҳаси
Иккиламчи ниқоблаш ва диффузияга таъсирлаш учун иккиламчи емириш		1-ниқобдаги ятовор соҳаси, 2-ятовордаги қалынлиги 0.2 мкм булган диэлектрик оксид қатлам; 3- иккиламчи емиришдан кейинги қалынлиги 0.8 мкм булган бошланғич оксид
p-турли исток ва стокнинг диффу- зион соҳаларини оксидлани диффузия билан юни қилиш		1-чуқурлиги 2 мкм ли p-турли диффузион қатлам
Учламчи емириш		1-исток; 2-сток
Иккиламчи оксидлаш		1- қалынлиги 0.02 мкм булган янги оксид (ятоворости) қатлами
Учламчи ниқоблаш ва туртламчи емириш		1-омиқ контактлар остида тирқовшча очил учун ниқоб; 2- омиқ контактлар ости тирқовшчаси
Металлаш, туртламчи ниқоблаш ва бешинчи емириш		1-p-турнинг диффу- зион қатламлари; 2-омиқ контактлар; 3-узро бирижмалар; 4-кириш; 5-ятовор; 6- чиқиш
Пассивлаш		1-пассивловчи қоплама

3.9. ЯРИМЎТКАЗГИЧЛИ СТРУКТУРАЛАР СИРТИНИ ҲИМОЯЛАШ

Ярим ўтказгичли материаллар ва р-п ўтиш сиртларининг ҳолатлари дискрет яримўтказгичли асбоблар ва ИМСларнинг электр параметрларига кучли таъсир қилади. Чунки сиртнинг структураси боғланишлари қисман узилган атомлардан ташкил топади, булар эса яримўтказгичнинг турига боғлиқ бўлмаган ҳолда акцепторли энергетик сатҳларни ҳосил қилади. Улар билан бирга ташқаридан газ ва суюқлик кўринишидаги моддаларнинг адсорбцияси натижасида кўшимча сирт ҳолатлари ҳосил бўлади. Бу сатҳлар донор ёки акцептор характериға эға бўлиши мумкин. Бунинг натижасида яримўтказгич - муҳит чегарасида энергетик зона эгриланади ва ярим ўтказгичли материалнинг сиртида инверс қатлам ҳосил бўлади.

Сирт ҳолатлари ярим ўтказгичларнинг бир қанча параметрларига салбий таъсир қилади. Булардан энг кераклиги ноасосий заряд ташувчиларнинг сирт рекомбинацияси тезлигидир. Транзисторларда сирт рекомбинациясининг тезлашиши заряд ташувчиларни узатиш ва кучайтириш коэффициентларининг камайишиға олиб келади. Яримўтказгичли кристалларда сирт ҳолатларининг ўзгариши атроф муҳитнинг ўзгариши ва унинг яримўтказгичли материалға таъсири натижасида юзаға келади. Шу сабабли яримўтказгичли структуралар сиртини ҳимоялаш сифатиға тайёр асбобларнинг электр параметрлари билан бир қаторда уларнинг ишончилиги ва ишлаб бериш вақти боғлиқ бўлади.

Яримўтказгичлар технологиясида ташқи агрессив муҳитнинг яримўтказгичли кристалл сиртиға таъсирини йўқотиш учун ҳар хил технологик усул ва операциялардан фойдаланилади. Нопланар турда тайёрланадиган асбобларни ҳимоялаш учун суюқ кремний органикли лаклар ва компаундлар яримўтказгичли кристалл сиртиға суркалади. Булар қуригандан ва қотгандан кейин асбобларни ташқи атмосфера таъсиридан сақлайди. Бу усулнинг устунлиги унинг оддийлигида ва автоматлаштириш имконияти борлигидадир.

Яримўтказгичли асбоблар ва ИМСлар ишлаб чиқаришда кремний диоксиди SiO_2 ва нитриди Si_3N_4 плёнкалари структураларни ҳимояловчи сифатида кенг қўлланилмоқда. Асбобларни тайёрлашнинг планар вариантыда кремний диоксиди

SiO_2 ва нитриди Si_3N_4 ҳимояловчи плёнкалар бошланғич таг-ликда p-n ўтишдан олдин ҳосил қилинади.

Булардан ташқари яримўтказгичли материаллар сиртини ҳимоялашда металл оксидлари ва шиша плёнкалардан ҳам фойдаланилади.

Умуман яримўтказгичли асбобларни ишлаб чиқаришда планар ва нопланар эпитаксиал технологияларда фойдаланиладиган ҳимояловчи плёнкаларга қуйидаги асосий талаблар қўйилади:

1. Диффузияланувчи элементларнинг сиртига тўлиқ кириб боришидан ҳимоялаш.
2. Вақт бўйича чидамлилиқ.
3. Бир жинслилик ва нуқсонсизлик.
4. Электр мустаҳкамлик.
5. Юқори механик мустаҳкамлик.

3.10. ЭЛЕКТРОН АСБОБЛАР ВА ҚУРИЛМАЛАРНИ ЙИҒИШ

Электрон асбоблар ва ИМС ларни йиғиш энг кўп меҳнат талаб қиладиган ва масъулиятли технологик босқич ҳисобланади.

Йиғиш этапи яримўтказгичли пластинани планар технология бўйича гуруҳли ишлов берилгандан ва алоҳида элементларга (кристаллчаларга) ажратилгандан кейин бошланади. Бу кристаллчалар содда (диодли ёки транзисторли) структурадан ёки мураккаб интеграл микросхемадан иборат бўлиб, дискрет, гибрид ёки монолит композицияларни йиғишга юборилади.

Йиғиш жараёни учта асосий технологик операциядан иборат: корпус асосига кристаллни бириктириш; яримўтказгичли кристаллнинг актив ва пассив элементларини ҳамда корпуснинг ички элементларини ток келувчи улагичларга бириктириб улаш; кристаллни ташқи муҳитдан герметизациялаш.

Яримўтказгичли асбобнинг ёки ИМСнинг кристаллини корпус асосига кавшарлаш жараёнлари эвтектик қотишма эритмасидан фойдаланиб пайвандлаш ҳамда елимлаш ёрдамида бириктирилади.

Кристаллни бириктириш операциясига бўлган асосий талаб бу юқори механик мустаҳкамликка, яхши электр ўтка-

зувчанликка ва иссиқлик ўтказувчанликка эга бўлган кристалл - корпус асоси бирикмасини ҳосил қилишдир.

Кавшарлаш. Бу жараён иккита ҳар хил детални эритмасдан туриб кавшарлагич (припой) деб аталадиган учинчи компонента ёрламида бир бири билан бириктиришдир. Бунда кавшарлаб бириктириш жараёни давомда кавшарлагич суюқ ҳолатда, бириктириладиган деталлар эса қаттиқ ҳолатда бўлади. Кавшарлагич эриш температурасигача қиздирилганда у ва бириктириладиган деталлар билан бир вақтда: бириктириладиган материалларнинг суюқ кавшарлагичда эриши, кавшарлагичнинг бириктириладиган материалларга диффузияланиб қаттиқ қоришма ҳосил қилиши, кавшарлагичнинг бириктириладиган деталлар материаллари билан кимёвий таъсирлашиб интерметалл бирикмалар ҳосил бўлиши кузатилади.

Совитилгандан сўнг кавшарлагич бириктириладиган деталлар юзасида кристалланиб, улар билан мустаҳкам металл боғланишини ҳосил қилади.

Бириктириладиган деталларнинг сиртлари оксид ва ифлосликлардан яхшилаб тозаланиши шарт. Кавшарлагичнинг сиртида ҳам оксид ва ифлосликлар бўлмаслиги керак. Кавшарлаш чокининг ҳосил бўлиш температураси тайёр структуранинг параметрларини ёмонлаштирадиган даражада юқори бўлмаслиги керак. Кавшарлагич эса ИМСнинг ишчи температураларида (кремний учун 125 °C) ўзининг хусусиятларини ўзгартмаслиги керак.

Пайвандлаш. Микросхемаларни йиғишда пайвандлаш секин аста кавшарлашни сиқиб чиқармоқда. Бу пайвандлаш бирикмаларнинг юқори сифатлилиги ва структура параметрларига камроқ таъсири билан изоҳланади. *Пайвандлаш жараёни деб деталларни атомлараро таъсирлашув масофасига қадар яқинлаштирилиши натижасида кавшарлагичсиз ажралмайдиган бирикма ҳосил бўлишига айтылади.* Пайвандлаш жараёнида бириктириладиган деталлар материалларининг сиртлари қуйидаги ҳолатларда бўлиши мумкин: пластик деформация, эриш ва пластик деформация, эриш ва кейинги кристалланиш.

Пайвандлашни қиздириб ва қиздирмасдан, сиқувчи кучланиш билан ёки кучланишсиз, ҳамда бир пайтнинг ўзида ҳам қиздириб, ҳам сиқувчи кучланиш билан бажариш мумкин.

Микросхемаларни йиғиш операциясини бажаришда пайвандлашнинг қуйидаги усуллари кўпроқ қўлланилади: термокомпрессияли, алоҳида импульсли қиздириш, ультратовушли, иккиланган электродли, лазерли нуқтали ва чокли, электрон-нурли, совуқ, электроконтактли, аргон - ёйли.

Елимлаш. Бу элементларни баъзи бир материалларнинг елимлаш хусусиятларига асосланган ҳолда бир-бири билан бириктириш жараёнидир. Бунда ярим ўтказгичли кристалл ва корпуслар (металл, шиша, керамика) асослари оралиғида механик мустақкам бирикма ҳосил бўлади. Елимли бирикмалар мураккаб қурилмаларни талаб қилмайди, осон бажарилади, бироқ ҳар доим ҳам яхши сифатли бирикма олишни таъминлай олмайди. Шу сабабли улар асосан кам қувватли, унча мураккаб бўлмаган шароитларда ишлайдиган микросхемаларда қўлланилади. Елимлар ток ўтказмайдиган ва ток ўтказадиган турларга бўлинади.

Электродли улагичларни улаш. Замоनावий яримўтказгичли асбобларда ва интеграл микросхемаларда контакт майдончаларнинг ўлчамлари бир неча ўн микрометрларни ташкил қилади. Шу сабабли улагичларни бириктириб улаш жараёни технологик операцияларнинг ичида энг кўп меҳнат талаб қиладиган жараёндир.

Ҳозирги пайтда улагичларни интеграл микросхеманинг контакт майдончаларига улаш учун пайвандлашнинг учта туридан фойдаланилади: термокомпрессияли, электроконтактли ва ультратовушли. Бундан ташқари кавшарлаш ва елимлашдан ҳам фойдаланса бўлади.

Қўлланилаётган воситаларга боғлиқ ҳолда симли ва симсиз монтаж фарқланади. Симли монтаж учун олтин, алюминийли симлар, алюминий-кремний, алюминий-магний қотишмаларидан фойдаланилади. Кристалларнинг ҳажмий улагичларга монтажи симсиз бажарилади.

Кристаллни герметизациялаш. Яримўтказгичли кристалл ориентирланиб, корпус асосига бириктирилиб ва унинг контакт майдончаларига улагичлар улангандан кейин уни ташқи муҳит таъсиридан ҳимоя қилиш керак. Бунинг учун унинг атрофида герметик ва механик мустақкам қобиқ ҳосил қилиш керак. Бундай қобиқ кристаллни беркитадиган ва ташқи муҳитдан изоляциялайдиган қопқоқни (баллон) корпус асосига бириктириб, ёки корпус асосини унда жойлашган

яримўтказгичли кристалл билан биргаликда пластмасса билан ўраб олиниб ҳосил қилинади.

Корпус асосини қопқоқ ёки баллон (яримўтказгичли асбобларнинг дискрет варианты) билан герметик бириктириш учун кавшарлаш, электроконтакт ёки совуқ пайвандлашдан кенг фойдаланилади. Корпуссиз кристаллни герметизациялаш учун эса пластмассани қуйиш, ўраш ва пресслашдан фойдаланилади.

ИМСларни корпусда герметизациялаш. Актив ва пассив элементлари бўлган яримўтказгичли кристаллни ташқи механик, об-ҳаво ва ёруғлик таъсирларидан ҳимоя қилиш учун у махсус корпусга жойлаштирилади.

Корпуснинг асосий вазифалари: асбобнинг ҳамма элементларини ягона комплексга бирлаштириш; яримўтказгичли кристаллдан иссиқликни олиб кетиш; механик кучланишларнинг кристаллга ўтишига йўл қўймаслик; ток келувчи қисмларнинг изоляцияланишини таъминлаш; намлик, газ ва агрессив муҳитлардан ҳимоялаш. Ташқи конструктив жиҳозланиши бўйича корпусларнинг таснифи 3.6-жадвалда келтирилган. Ҳар бир турдаги корпуснинг габарит ва уловчи ўлчамлари стандартга асосланган бўлади.

Қўлланилган материалга боғлиқ ҳолда корпуслар шишали, керамикали, металлкерамикали, металлшишали, пластмассали турларга бўлинади.

3.6-жадвал

Тури	Асос текислигида корпус проекциясининг шакли	Асос текислигида улагичлар проекциясининг жойлашиши	Асос текислигига нисбатан улагичларнинг жойлашаши
1.	Туғри бурчакли	Корпус проекцияси чегарасида	Перпендикуляр
2.	Туғри бурчакли	Корпус проекцияси чегараси ташқарисида	Шунинг ўзи
3.	Айлана ёки овал	Корпус чегарасида ёки ундан ташқарида	Шунинг ўзи
4.	Туғри бурчакли	Корпус проекциясидан ташқарида	Параллел
5.	Квадрат	Корпус проекцияси чегарасида	Асос текислигида ва корпуснинг ён томонида

ИМСни корпусга герметизациялашдан аввал корпуснинг деталлари ва узеллари: изоляцияланган улагичли асос, корпус қопқоғи, ёрдамчи деталлар тайёрлаб қўйилади.

Корпусга ИМСни герметизациялашда ҳам йиғиш операциясининг бошқа турларида қўлланилган усуллардан: кавшарлаш, пайвандлаш ва елимлашдан фойдаланилади (3.45-расм).



3.45-расм. ИМСларни корпусларда герметизациялаш усуллари таснифи.

Микросхемалар тайёрлашнинг якуний операциялари. ИМСлар герметизациялангандан сўнг якуний технологик операциялардан олдин улар иқлим, электрик ва механик синовлардан ўтказилади. Технологик синов жараёни давомида яширин нуқсонли ИМСлар аниқланади ва чиқариб ташланади. Шу билан ИМСларни фойдаланиш шароитида ишончлилиги кафолатланади.

Технологик синовлар ўтказилгандан ва параметрлар ўлчангандан сўнг якуний технологик операциялар бажарилади ва ИМСлар истеъмолчиларга жўнатилади.

Якуний технологик операцияларга ИМСларни ташқи таъсирлардан ҳимоялашни таъминлайдиган ташқи жиҳозлаш, аппаратурага улаш учун қулайликлар, ИМС тури тўғрисида маълумотлар ҳамда ташқи эстетик безаш каби операциялар киради.

IV БОБ ЮПҚА ҚАТЛАМЛАР ФИЗИКАСИ ВА ТЕХНОЛОГИЯСИ

Замонавий техник тизимлар ва воситаларни бошқариш ҳамда фан ва техниканинг ривожланиши электрониканинг етакчи тармоқларидан бири бўлган микроэлектроника соҳасида фаолият кўрсатадиган малакали мутахассисларни тайёрлаш билан узвий боғлиқдир.

Микроэлектроника маҳсулотлари бўлмиш қуёш элементлари, интеграл микросхемалар, микропроцессорлар, ўта юқори частотали детекторлар, интеграл схемалар, лазерлар, мини- ва микро- ЭХМ ва бошқаларни яратиш янги хусусиятга эга юпқа ва ўта юпқа қўп компонентли қатламлар тизимларини яратишни тақозо қилади. Шу боисдан ҳам кейинги йилларда юпқа ва ўта юпқа қатламлар ҳосил қилиш технологияси ва физикасига бўлган эътибор кескин ортиб кетди.

Дарсликнинг IV-V бўлимларида микро- ва наноэлектроника соҳасида ишлатиладиган юпқа қатламлар олишнинг замонавий технологиялари, уларнинг имкониятлари, қатламларнинг таркиби, тузилиши ва хусусиятларини ўрганиш усуллари ҳамда қатлам ҳосил бўлишида рўй берадиган физик жараёнлар билан қисқача танишасиз.

4.1. ЮПҚА ҚАТЛАМ ТЕХНОЛОГИЯСИ ҲАҚИДА УМУМИЙ ТУШУНЧАЛАР

1960-65 йилларгача электрониканинг ҳамма соҳаларида (радиотехника, телевидение, радиоалоқа, электрон асбоб-созлик) асосан ҳар хил турдаги радиолампаранинг ишлатилишида қуйидаги камчиликлар мавжуд эди:

- уларнинг ўлчамлари нисбатан жуда катта;
- уларни ишлатиш учун қўп қўшимча манбалар ва элементлар керак бўлади (масалан, катодни қиздирувчи манба);
- шовқини жуда катта, демак, паст қувватли сигналлар билан ишлаш қийин;
- сигналларни ростилаш учун қўлланиладиган қўп турдаги пассив элементларнинг (қаршилик, конденсатор, дроссель, трансформатор) ўлчамлари ҳам катта.

70-йиллардан бошлаб юқорида айтилган соҳаларда асосан яримўтказгичли асбоблар ишлатила бошланди. Бу соҳа ривожланиб актив элементлар ҳосил қилишда қалинлиги 100-200 мкм дан ошмайдиган плёнкалардан фойдаланиш мумкинлиги аниқланди. Бунга асосланган электроникани эса микроэлектроника деб атала бошланди.

Ҳозирги пайтда наноэлектроника ривожланмоқда, яъни қалинликлари унлаб нанометр ($1\text{ нм} = 10^{-9}\text{ м}$) бўлган плёнкаларни ишлатиш устида ишлар олиб борилмоқда. Бундай плёнкалар устма-уст, қатлам-қатлам қилиб жойлаштирилиб актив ва пассив элементлар ҳосил қилишда ишлатилиши мумкин. Фан ва техника ривожланиб уч ўлчамли тизимлар ҳосил қилинмоқда. Бундай тизимларда 1 см^2 ҳажмда юз минглаб-миллионлаб юпқа плёнкаларга асосланган элементларни жойлаштириш мумкин. Улар асосида ҳосил қилинган интеграл схемалар катта ва ўта катта интеграл микросхемалар деб аталади.

Демак, керакли мақсадларда ишлатилиши мумкин бўлган юпқа қатламларни ҳосил қилиш, уларнинг таркибини, кристал ва электрон тузилишини, физик ва кимёвий хусусиятларини ўрганиш фаннинг аҳамиятини белгиласа, олинган юпқа плёнкаларнинг асбоб сифатида ишлатилиши унинг халқ ҳўжалигида ва техникада қўлланилишини акс эттиради.

Юпқа қатлам ҳосил қилиш усуллари жуда кўп ва ҳар хил. Бу усулларнинг қандай манбага боғлиқ равишдаги асосий турлари, қудайликлари ва камчиликлари, микроэлектроникада ишлатилиш даражаси 4.1 — жадвалда келтирилган.

Жадвалдан кўринадики юпқа ва ўта юпқа пленкалар олишда асосан вакуумда буғлантириш, ионли едириш усуллари қўлланилади. Бу усулларнинг асосида битта принцип ётади: керакли жисмининг (асос) юзасига ҳосил қилиниши керак бўлган плёнка материалларининг атомлари ўтказилади, кейин бу системага ҳарорат, лазер нурлари, электронлар ёки ионлар билан ишлов бериш орқали керакли плёнка ҳосил қилинади. Умуман плёнка ҳосил қилишнинг истиқболли усулларини шартли равишда қуйидаги турларга бўлишимиз мумкин: молекуляр нурли, қаттиқ фазали, реактив, ионлар имплантацияси, ион-плазмали ва бошқа усуллар. Бунда эпитаксиал пленкалар ҳосил қилиш алоҳида ўрин тутади.

Ушбу бўлимда асосан вакуумда буғлантиришга асосланган усулларнинг айримлари билан танишиб ўтамиз. Умуман

олганда юпқа плёнкаларни вакуумда ўтказиш жараёни учта жараённи ўз ичига олади: манбадаги моддани қаттиқ ёки суяқ фазадан газ (буғ) ҳолига айлантириш; модда буғларини буғлантиргичдан асос (намуна) юзига олиб келиш; асос юзасига келиб тушган модда буғларини конденсациялаш (қаттиқ фазага айлантириш). Бундан кўринадики, вакуумда буғланиш назарияси модда буғларининг мувозанатини аниқлаб берадиган фазовий ўтишлар термодинамикаси ва ўтаётган жараёнларнинг физикавий микроскопик моделини тушунтираоладиган газларнинг кинетик назарияларини ўз ичига олар экан.

Бу қисмда асосан юзаларда плёнкалар ҳосил бўлиш жараёнларига ўрганилади.

Юпқа плёнкалар олиш учун фойдаланиладиган қурилмада куйидаги шартлар бажарилиши керак:

1. Плёнка ҳосил қилиш жараёни имкон қадар юқори вакуумда амалга оширилиши керак.

2. Бундай қурилмада камида иккита тизим мавжуд бўлиши керак:

—асос тизими. Уни қиздириш, тозалаш, силжитиш ва керакли бурчакка буриш имкони бўлиши керак;

—буғлантирувчи система. У плёнка ҳосил қилиш учун керакли бўлган материалнинг атомлари (молекулалари) манбаи бўлиб хизмат қилади.

Ҳозирги замон қурилмаларида айтилганлардан ташқари ҳосил қилинаётган плёнканинг қалинлигини, таркибини, кристалл тузилишларини, ҳамда айрим хусусиятларини ўрганиш учун керак бўладиган тизимлар кўзда тутилади.

4.2. АДСОРБЦИЯ. ФИЗИК ВА КИМЁВИЙ АДСОРБЦИЯ

Плёнка ҳосил бўлиши учун керакли қаттиқ жисм(асос)нинг юзасига бошқа жисм атомлари келиб ўтириши шарт. Қаттиқ жисмнинг юзасига ҳар қандай четки атомларнинг келиб ўтириш ходисаси **адсорбция** дейилади. Бунда асос **адсорбент**, келиб ўтирган атом эса **адсорбат** деб юритилади.

Келиб ўтирган атомларнинг адсорбент атомлар билан қандай ҳолатда эканлигига қараб физик ва кимёвий адсорбциялар мавжуд бўлади.

Юпқа плёнкалар олти усуллари ва уларнинг хиссий таъсирларини

[illegible]

*М-метилат, Д-диэлектрон, Н-гидрогенизация, О-окисл.

Агар адсорбат ва адсорбент атомлари орасида электронларнинг алмашуви (ёки умумлашуви) рўй бермаса, **физик адсорбция** дейилади.

Агар адсорбция жараёнида юқорида айтилган атомлар орасида электронлар алмашинуви рўй берса, бундай адсорбция **кимёвий адсорбция (хемисорбция)** дейилади.

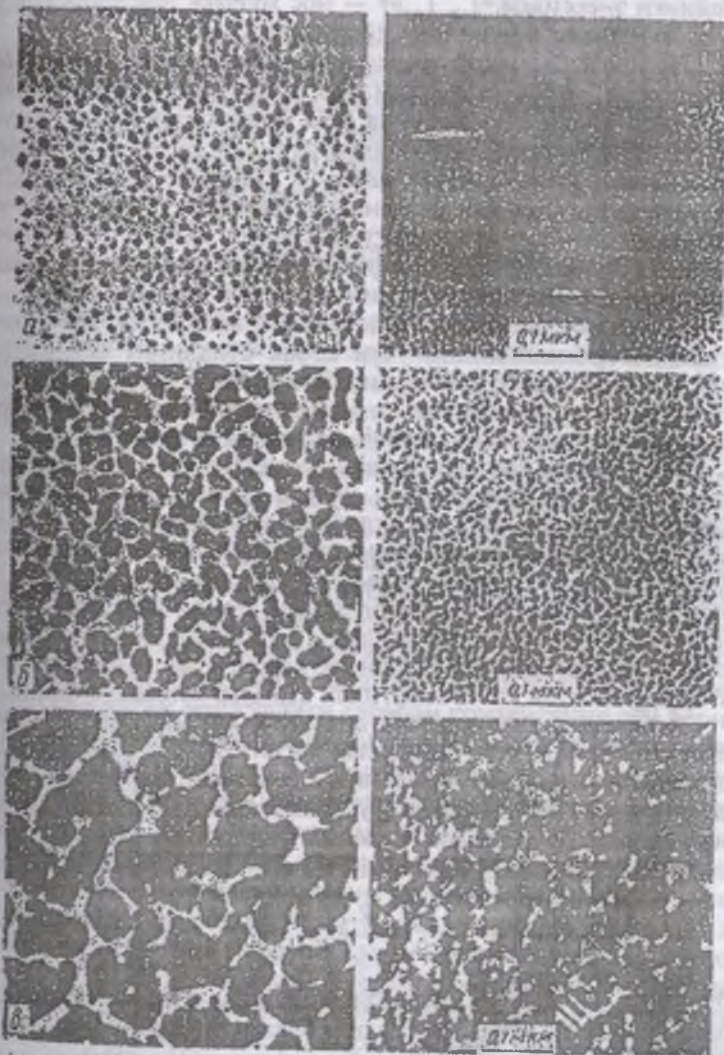
Адсорбция натижасида плёнка ҳосил бўлишининг энг умумий ҳолини кўриб чиқамиз: бунда қаттиқ жисмининг юзасида алоҳида-алоҳида атомлар ёки атомлар гуруҳлари (2-15 атом) ҳосил бўлади. Биз уларни **плёнка ҳосил бўлиш марказлари (ўсимталари)** деб атаймиз. Бу марказлар атрофида атомлар тўпланиб улар ҳам кенгайди, ҳам ўсиб боради. Агар бу кенгайиш давомида марказлар атрофидаги атомлар бошқа атрофдаги атомлар билан тез қўшилиб кетса (қалинлик 3-4 моноқатламдан, яъни 15-20А⁰ дан ошмай туриб), бундай ўсиш қатламма-қатлам ўсиш деб аталади.

Кўпинча марказлар атрофида ўсиш ҳам, кенгайиш ҳам рўй беради-ю, лекин улар анча қалинликкача (15-20 моноқатлам ва ундан катта) ёки умуман бир бирига қўшилиб кетмайдилар, яъни бир гуруҳ ўтирган атомлар билан иккинчи гуруҳ атомлари орасида очиқ жойлар (каналлар) ҳосил бўлади. Плёнкаларнинг бундай ўсиши **оролчали ўсиш** характериға эға дейилади (4.1-расм).

4.3. ЮПҚА ҚАТЛАМЛАРДА МАРКАЗЛАР (МУРТАКЛАР) ҲОСИЛ БЎЛИШ НАЗАРИЯСИ

Муртаклар ҳосил бўлишининг барча мавжуд назарияларида бугланган молекула (атом)ларнинг асос юзаси билан тўқнашуви биринчи босқич деб ҳисобланади. Бугланган атомлар асос юзасига ўтириб **совийди, яъни конденсацияланади**. Улар қайтадан яна учиб чиқиши ёки ўтириб қолиши мумкин. Юзаға келиб тушаётган атомларнинг энергияси кТ дан (Т-асос температураси) жуда катта. Бу атомлар қанчалик тез, яъни асос билан унга ўзининг барча заҳира (запас) энергиясини бериб улгурмасдан мувозанатға келиши аҳамиятлидир. Бундай мувозанатда атом адсорбцияланиши ёки қайта бугланиши мумкин. Бу ҳодиса термик **аккомодация** коэффиценти билан ифодаланади.

$$\alpha_r = \frac{E_v - E_R}{E_i - E} = \frac{T_v - T_R}{T_v - T} \quad (4.1.)$$



4.1 - расм Юқори вакуум шаронтида ўстирилган олтин плёнкасининг
 ёритилган (chapла) ва ёритилмаган (унгла) ҳолатлардаги тузилиши: а-
 24А; б-108А; в-300А.

бу ерда, E_v — асосга туширилаётган буг ҳолидаги атомларнинг энергияси, E_d — десорбцияланган атомларнинг асос билан мувозанат рўй беришидан олдинги энергияси, E — десорбцияланган атомнинг асос билан мувозанат рўй берганидан кейинги энергияси, T_v , T_d , T — мос ҳолдаги температуралар.

Бундан $a_1 < 1$ эканлиги кўринади.

Назарий тадқиқотлар асосида Кабрери, Цванциг, Мак Кэрори ва Эрлих каби олимлар “иссиқ” атом бир ўлчамли панжара билан тўқнашганда $a_1 < 1$ шарт бажарилиши учун $E_v \geq E$ бўлиши кераклигини аниқлаганлар. Бу олимлар келиб ўтираётган атомларнинг массаси кристалл панжарадаги атомларнинг массасидан қанча катта бўлса, тўлиқ термик аккомодация ($a_1 = 1$) ҳодисаси рўй бериш эҳтимоллиги шунча катта бўлишини ҳам аниқлаганлар. Уч ўлчамли панжаралар учун термик аккомодация тўлиқ рўй бериши учун $E_v \leq E$ бўлиши етарли эканлигини Гудманг аниқлаган. Масалан, атом десорбцияланиши учун керак бўладиган активация энергияси 0,5эВ бўлса, термик активация тўлиқ бўлмаслиги учун, келиб тушаётган атомнинг энергияси температура орқали ифодаланганда 6500К дан катта бўлиши керак.

Мак-Фи ва Леннард-Джонс тушаётган атом ўзининг ортиқча кинетик энергиясини йўқота бориб асосга ўрнашиб қолиши учун $2/v$ вақт кераклигини аниқлаган. Бу ерда v — асос кристалл панжарасининг тебраниш частотаси. Демак, кристаллга келиб тушган атом бир неча тебраниш жараёнида ўзининг барча ортиқча энергиясини деярли йўқотади. Шунинг учун ҳам жуда кўп ҳолларда мувозанат жуда тез (оний вақтда, бирданига) рўй беради деб қараш мумкин (жуда енгил атомлар ва жуда катта энергияли атомлар бундан мустасно).

Асосга келиб ўтираётган атомлар сони маълум миқдорга етгандан кейин, агар марказлар ҳосил бўлиши рўй бермаса, стационар (мувозанат) ҳолат вужудга келади, яъни тушаётган ва қайтадан учиб чиқаётган (бугланаётган) атомлар сони айнан тенг бўлади. Бу ҳолда асос юзасини тўлдираётган атом (адатом) лар сони n_1 атом келиб ўтириш тезлиги R га боғлиқ бўлади.

$$n_1 = \frac{R}{v_c} \exp \frac{\Delta G_{des}}{kT} \quad (4.2)$$

бу ерда, v_c — адсорбцияланган молекулаларнинг десорбцияланиш частотасига ($\sim 10^{14} \text{ с}^{-1}$) тенг бўлган тебраниш частотаси, ΔG_{des} — десорбцияни активация қилиш эркин энергияси.

Агар атомларнинг юзага келиб ўтириши тўхтаса ва $R \rightarrow 0$ бўлса, у ҳолда асоснинг адсорбатлар билан тўлиши ҳам нолга

интилади. Адсорбатнинг қайта бугланишига қадар юзада ўтириш вақти (τ_n).

$$\tau_n = \frac{1}{\nu_0} \exp \frac{\Delta G_{des}}{kT} \quad (4.3)$$

Умуман, бир текис плёнкалар атомлар тушиш тезлиги катта бўлганда ҳосил бўлади. Юпқа плёнкаларда марказлар ҳосил бўлишининг икки хил назарияси (моделли) мавжуд: 1) капилляр модел ва 2) атом модели. Бу моделлар бир - бири билан марказлар ҳосил бўлиш энергиясини ҳисоблаш усули билан фарқ қилади.

КАПИЛЛЯР МОДЕЛИ

Буг фазасидан гетероген равишда марказлар ҳосил бўлишининг бир неча таърифлари мавжуд. Хирс ва Паунд монографияси, Зигзби ва Паунднинг кейинги мақолалари бу жараёнларга бағишланган.

Асоснинг таъсири мавжудлигини ҳисобга олиш учун Фальмер ва Вебер, Беккер ва Дёринг томонидан яратилган буг фазасидан гомоген равишда марказлар ҳосил бўлиш классик капилляр моделини биров ўзгартиришга зарурият туғилади. Бу модель тўйинган бугдан конденсирланган фаза ҳосил бўлиши учун (конденсирланган фазанинг турғун оролчалари) активацион тўсиқни енга оладиган (баъзан у «марказ ҳосил бўлиш тўсиғи» деб аталади) эркин энергиянинг мусбат флуктуациялари зарур деган фикрга асосланган. Бундай тўсиқ мавжудлиги сабабли конденсация рўй бериши учун тўйинишнинг қиймати бирдан катта бўлиши керак.

1) Критик марказ. Капилляр моделга асосан марказ ҳосил бўлиш пайтида эркин энергиянинг ўзгариши максимумга эга бўлади, яъни марказ ўсиб «критик» ўлчамдан ўтишида унинг турғунлиги буг фазасига диссоциацияланишга нисбатан минимумига эга. Эркин энергиянинг максимуми икки параметрнинг рақобати натижасида вужудга келади: а) кичик марказларда юзанинг ҳажмга нисбатининг жуда катталиги туфайли уларнинг турғунлиги камаяди б) марказлар ўлчамлари катталашган сари конденсацияланиш энергияси кўпаяди ва натижада марказларнинг турғунлиги ошади.

Бундай марказнинг критик радиуси r^* ни ҳисоблаш учун биз буг фазаси билан чегараланувчи сирт юзини a, r^2 га

марказнинг асос билан контакт юзини $-a_2 r^2$ га ва ҳажм $-a_1 r^3$ га тенг деб фараз қиламиз, бу ерда a - константа, r - марказнинг ўртача чизикли ўлчами. Марказ ҳосил бўлиш эркин энергиясининг ўзгариши (ΔG) унинг буғ фазасига диссоциацияла-нишидаги эркин энергиясига нисбатан ўзгариши марказ ўлча-мига боғлиқ равишда қуйидаги формула билан ифодаланеди:

$$\Delta G = a_3 r^3 \Delta G_v + a_1 r^3 \sigma_{v-c} + a_2 r^2 \sigma_{s-c} - a_2 r^2 \sigma_{s-v} \quad (4.4)$$

Бу ерда, $\Delta G_v (< 0)$ - айти тўйиниш шароитида берилган материалнинг массив кристалдаги эркин энергиясининг ўзгариши; u эрг/см³ ларда ифодаланеди ва қуйидаги формула билан ҳисобланади:

$$\Delta G_v = (kT/V) \ln[R/R(b)] \quad (4.5)$$

$\sigma_{v-c} (> 0)$ ва $\sigma_{s-c} (< 0)$ - мос ҳолда, марказдаги конденсат - буғ ва конденсат - асос чегаралари юзаларининг эркин энергиялари, σ_{s-v} - асоснинг юза энергияси; бу катталиклар-нинг ҳаммаси эрг/см² да ифодаланган. V - плёнка материа-ли битта молекуласининг ҳажми. $a_2 r^2 \sigma_{s-v}$ ифода катталиги $a_2 r^2$ га тенг бўлган асоснинг эркин сирт юзаси марказ ҳосил бўлишида йўқолиб кетганлиги учун (4.4) тенгламага кира-ди. Марказ ўлчами бўйича (4.4) тенгламани дифференци-аллаб қуйидагини оламиз:

$$\sigma \Delta G / \Delta r = 3a_1 r^2 \Delta G_v + 2a_1 r \sigma_{v-c} + 2a_2 r \sigma_{s-c} - 2a_2 r \sigma_{s-v} \quad (4.6)$$

Бунда, марказнинг шакли унинг ўлчами ўзгариши билан ўзгармайди ва ΔG_v , σ_{v-c} ва σ_{s-c} марказ ўлчамига боғлиқ эмас.

Марказнинг эркин энергияси u критик ўлчамга эга бўлганда максимал бўлади, яъни

$$r^* = [-2(a_1 \sigma_{v-c} + a_2 \sigma_{s-c} - a_2 \sigma_{s-v}) / 3a_3 \Delta G_v] \quad (4.7)$$

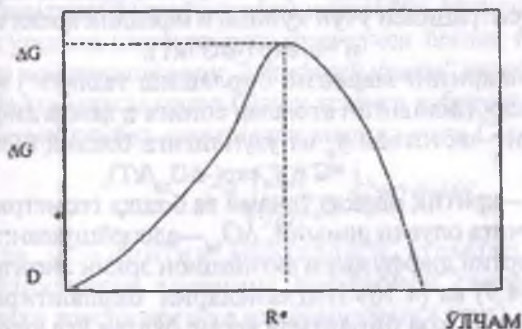
$\frac{\partial \Delta G}{\partial r} = 0$ бўлади. Бу ўлчамга мос келувчи эркин энергия.

$$\Delta G^* = [4(a_1 \sigma_{v-c} + a_2 \sigma_{s-c} - a_2 \sigma_{s-v})^3] / 27a_3^2 \Delta G_v^2 \quad (4.8)$$

Марказ эркин энергиясининг унинг ўлчамига боғлиқ-лик графиги 4.2-расмда келтирилган.

Эркин энергия максимуми марказнинг турғунлик ми-нимумига мос келади ва унинг r^* ўлчамига ўринли бўлади. Агар $r > r^*$ бўлса, а (4.4) ифодага асосий ҳиссани r^3 га про-порционал бўлган хад қўшади. Бу манфий эркин энергиянинг вужудга келишига, яъни катта радиусли марказларнинг турғунлигига олиб келади. Агар критик радиусли марказга (критик марказ деб номланадиган), яна бир атом қўшилса, у биров турғунроқ бўлиб қолади ва ўртача

алоҳида атомларга бўлинмайди, балки ўсишда давом этади ва тургун оролча ҳосил бўлади. Бошқа томондан, агар критик марказдан бир атом кетса марказ бўлиниб кетади. Шунинг учун, тургун плёнка



4.2-расм. Плёнкада марказ ҳосил бўлиш эркин энергиясининг унинг ўлчамига боғлиқлик графиги

конденсацияланиши учун биринчи навбатда критик ўлчамдаги ёки ундан катта марказлар ҳосил бўлиши шарт. Агар марказ r радиусли сфера шаклида бўлиб унинг контакт бурчагини θ деб белгиласак, (4.7) ва (4.8) тенгламалар қўйидаги кўринишга ўтади:

$$r^* = -2\sigma_{x-c} / \Delta G_x \quad (4.7a)$$

$$\Delta G^* = (4\pi\sigma_{x-c}^3 / 3\Delta G_x^2) (2 + \cos\theta) (1 - \cos\theta) \quad (4.8a)$$

Агар марказнинг сирт эркин энергияси анизотроп бўлса, ΔG^* баландлиги h бўлган доиравий диск шаклига эга бўлади. Критик марказдаги атомлар сони қуйидаги ифода билан аниқланади:

$$i^* = \pi h \delta_{c-v}^2 / v(\Delta G_x + \Sigma \delta / h)^2 \quad (4.7b)$$

бу ерда, δ_{c-v} - дискнинг чегаравий солиштирма энергияси, $\Sigma \delta = \delta_{c-v} + \delta_{s-c} - \delta_{s-v}$ (4.8) тенглама юмалоқ диск учун қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$\Delta G^* = \pi h \delta_{c-v}^2 / (\Delta G_x + \Sigma \delta / h). \quad (4.8b)$$

2) Марказ ҳосил бўлиш тезлиги. Марказ, унинг юзасига бевосита газ фазасидан тушаётган атомлар билан бирикиши ҳисобига ёки асос юзасидаги диффузияланаётган адатомлар билан тўқнашиши ҳисобига ўта юқори критик ўлчамларга-ча ўсиши мумкин.

Агар критик марказлар асос юзининг кичик қисмини қопласа, иккинчи механизм муҳимроқ ҳисобланади ва у адатомлар диффузияси коэффициентига боғлиқ бўлади. Бу

ҳолда критик марказнинг ўсиш тезлиги юза бирлигидаги дастлабки марказлар сонининг уларга адсорбцияланган атомларнинг бирикиш тезлиги кўпайтмасига тенг бўлади. Ада-томлар ва турли ўлчамлардаги марказлар орасидаги метастабиль мувозанат мавжуд деб фараз қилиб, критик марказларнинг концентрацияси учун қуйидаги ифодани ҳосил қиламиз:

$$n^* = n_i \exp(-\Delta G^*/kT). \quad (4.9)$$

Ада-томларнинг марказга бирлашиш тезлиги j юза бирлигига адсорбцияланган атомлар сонига n ҳамда диффузион сакрашнинг частотаси y_0 ва узунлигига боғлиқ бўлади:

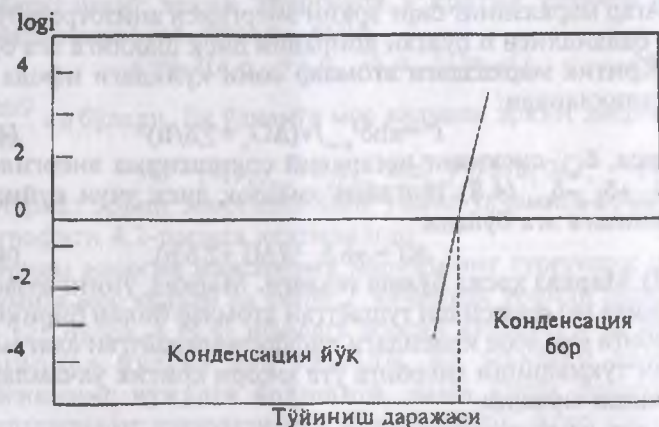
$$j = C n_i y_0 \exp(-\Delta G_{ad}/kT), \quad (4.10)$$

бу ерда, C —критик марказ ўлчами ва бошқа геометрик омилларни ўз ичига олувчи доимий, ΔG_{ad} —адсорбцияланган атомларнинг сиртий диффузияси активацион эркин энергияси (>0)

(4.2), (4.9) ва (4.10) тенгламаларни бирлаштириб, бирлик вақт ичида юза бирлигида ҳосил бўлган ўта юқори критик марказлар сонини (частотасини) қуйидаги кўринишда ифодалаймиз:

$$I^* = j n^* = C R \exp [(\Delta G_{ad} - \Delta G_{ad}^* - \Delta G^*)/kT]. \quad (4.11)$$

(4.11) тенгламадан кўринадики, марказ ҳосил бўлиш частотаси I^* марказ ҳосил бўлиш жараёни энергетикасига, яъни атомларнинг юзага ўтқишиш параметрларига боғлиқ. Мисол сифатида 4.3-расмда марказ ҳосил бўлиш частотасининг қайта тўйиниш даражасига жуда кучли боғланиши кўрсатилган.



4.3-расм. Марказ ҳосил бўлиш частотасининг тўйиниш даражаси билан сифат боғланиши.

Бошқа томондан (4.11) тенгламадан кўринадик, маълум миқдордаги марказларнинг мавжуд бўлиш эҳтимоллиги плёнкани ихтиёрий чекли ўтқазиш тезлигида, у қанчалик кичик бўлмасин нолга тенг бўла олмайди.

Бироқ бу марказларнинг сони шунчалик кам бўлиши мумкинки, уни тажрибада кўришнинг иложи йўқ. Марказ ҳосил бўлиш тезлиги ўтқазиш шароитларига жуда кучли боғлиқ бўлгани учун, кўпинча конденсациянинг “чегаравий шarti” қилиб секундига 1 см² да битта марказ ҳосил бўлиш тезлиги қабул қилинади.

Сферик гүмбаз шаклидаги марказ учун С доимий

$$C = \frac{\sqrt{\Delta G^*}}{\sqrt{3kT} \cdot a_0^2} a_0^2 \pi \sin \Theta N_0, \quad (4.12)$$

бу ерда, i^* —критик марказдаги атомлар сони, a_0 —адсорбцияланган атомнинг диффузион сакраш узунлиги (тахминан асоснинг панжара доимийсига тенг), N_0 —атомлар адсорбцияланиши мумкин бўлган жойлар зичлиги (10¹⁵см²). Квадрат илдиз остидаги ифода кичик мувозанатланмаган тузатма (Зельдович омили).

АТОМ МОДЕЛИ

Уолтон ва Родиннинг кичик марказлар модели. Бирламчи марказларнинг ўлчамларини капилляр модел доирасида ҳисоблаганда кўпинча уларнинг радиуслари учун $\leq 5A$ қийматини беради, баъзида эса бир ёки икки атом радиусларидан кичик қийматни беради. Уолтон ва Родин ишларида кичик ўлчамдаги томчилар учун, қатъий айтганда, массив намуналар учун ўринли бўлган юза энергиялари қийматларини қўллаш мумкин эмаслиги кўрсатилган. Агар марказ ҳосил бўлиш жараёнини статистик физика усуллари ёрдамида талқин қилинса ва ҳар хил марказлардан таркиб топган адсорбцияланган газнинг тақсимланиш функцияси марказлар ва алоҳида адсорбцияланган ва атомларнинг потенциал энергияларига боғлиқ ҳолда ҳисобланса, бу қийинчиликларни бартараф қилиш мумкин. Бу усул тақрибий равишда Уолтон томонидан ёритилган. Бундай талқин қилишнинг асосий ўзига ҳослиги унга потенциал (ички) энергия E_i киритилишидир. E_i — i атомлардан иборат марказнинг диссоциацияланиб i та алоҳида атомларга ажралиб кетиш энергияси. Бу энергия капилляр моделдаги ΔG га мос келади. аммо бу ерда ΔG марказ ҳосил бўлиши ва газ фазасига диссо-

иацияланиш энергияларининг нисбатига боғлиқ бўлган эркин энергиянинг ўзгаришидир. Критик марказнинг диссоциация энергиясини E_i^* га тенг деб олсак, критик марказларнинг ҳосил бўлиш тезлиги i^* (Зельдович омилини ҳисобга олмаган ҳолда) қуйидаги қўринишга эга бўлади:

$$i^* = R_{a0} y N_0 \frac{R}{v_1 N_0} i^* \exp \left\{ \frac{(i^* + 1) E_0 - E_i^* - E_d}{kT} \right\}. \quad (4.13)$$

бу ерда, y —буғ фазасидан атомлар келиб қўшилиши мумкин бўлган марказни чегараловчи айлананинг узунлиги, v_1 —адсорбцияланган атомнинг десорбция частотаси, i^* —критик марказдаги атомлар сони, E_0 —десорбцияланиш активация энергияси, E_d —диффузияланиш активация энергияси ($E_0, E_d > 0$). Кичик марказлар моделида эркин энергия ўрнига потенциал энергия қўлланилиши (4.13) тенгламада энтропик аъзо $e^{u/k}$ мавжудлигини назарда тутати (Гиббс-Гелмголтц тенгламаси). Бу экспонентани киритиш учун кичик марказлар моделида десорбция частотасини y_1 капилляр моделдаги десорбция частотаси y_0 орқали ифодалаш керак:

$$1/y_1 = (1/y_0) \times e^{u/k}. \quad (4.14)$$

Капилляр моделда марказларнинг сирт энергияси ноаниқлиги бу ерда i^* ва E_d даги ноаниқликлар билан алмаштирилади. (4.13) тенгламани эксперимент билан солиштиришда одатда i^* нинг энг кичик қиймати қаралади. Масалан, жуда катта тўйинишларда критик марказда фақат бир атом бўлиши мумкин. Бу эса икки атомдан тузилган марказ (муртак) турғунлиги энг кичик бўлган бирикма эканлигини билдиради, биров кичикроқ тўйинишларда $i^*=2$ (уч атомли марказ энг кичик турғунликка эга бўлган марказ ҳисобланади), кейин $i^*=3$ ва ҳоказо. Бу критик марказларга мос келувчи марказ ҳосил бўлиш тезлиги қуйидагиларга тенг:

$$i^*=1: \quad i_1^* = R_{a0} y N_0 \frac{R}{v_1 N_0} \exp \left(\frac{2E_0 - E_d}{kT} \right); \quad (4.14a)$$

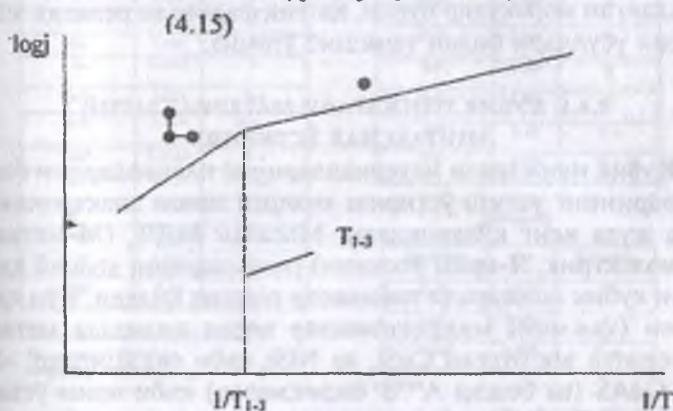
$$i^*=2: \quad i_2^* = R_{a0} y N_0 \left(\frac{R}{v_1 N_0} \right)^2 \exp \left(\frac{3E_0 + E_2 - E_d}{kT} \right); \quad (4.14b)$$

$$i^*=3: \quad i_3^* = R_{a0} y N_0 \left(\frac{R}{v_1 N_0} \right)^3 \exp \left(\frac{4E_0 + E_3 - E_d}{kT} \right). \quad (4.14b)$$

бу ерда, E_2 ва E_3 —мос ҳолда икки ва уч атомли марказларнинг диссоциация энергиялари.

Агар тўйиниш даражаси ўзгартирилса, масалан, асос ҳароратини ўзгартириб, бир критик марказдан бошқасига ўтиш ҳароратини аниқлаш мумкин. Масалан, икки атомли марказ критик ҳолатга ўтиш ҳарорати (4.14а) ва (4.14б) тенгламалардан аниқланади ва қуйидагига тенг:

$$T_{1,2} = -(E_1 + E_2) / k \ln(R/y_1 N_2).$$



4.4-расм. Марказ ҳосил бўлиш тезлигининг ҳароратга сифатий боғланиши

4.4-расмда марказ ҳосил бўлиш тезлигининг тескари ҳароратига боғлиқлик графиги синишга эгалиги кўрсатилган, бунда критик марказнинг ўлчами $i^*=1$ дан $i^*=3$ гача ўзгаради. Марказ ҳосил бўлиш жараёнининг жуда кичик ўлчамлари критик марказлар ёрдамида ёритиш кичик марказлар моделининг асосий ютуғи ҳисобланади.

4.4. ЭПИТАКСИАЛ ПЛЁНКАЛАР ОЛИШ УСУЛЛАРИ

Плёнкали материалларнинг электроника соҳасида ишлатилишида энг асосий ўринни эпитаксиал плёнкалар эгаллайди. Бундай плёнкалар катта ва ўта катта интеграл схемалар ишлаб чиқаришда, лазер асбобларини яратишда, юқори ва ўта юқори частотали резонаторлар олишда, қуёш элементлари олишда, умуман энг замонавий ва энг ноёб микроэлектрон асбоблар ишлаб чиқаришда алоҳида рол ўйнайди. У келажак электроникаси, яъни наноэлектрониканинг ҳам асосини ташкил этиши табиий.

Асос ва плёнканинг электрон тузилиши (тақиқланган зонанинг кенглиги) бири-биридан фарқ қилса бундай тизим гетероструктура (гетеротузилма) деб аталади.

Кристалл панжарасининг тузилиши асоснинг кристалл панжараси тузилиши билан бир хил бўлган монокристалл плёнкалар эпитаксиал плёнкалар дейилади. Плёнканинг кристалл тузилиши асосники билан бир хил бўлсаю, аммо электрон тузилиши фарқ қилса, бундай плёнка гетероэпитаксиал плёнка дейилади. Бу ерда биз вакуумда булантириш асосланган молекуляр нурли, қаттиқ фазали ва реактив эпитакия усуллари билан танишиб ўтамиз.

4.4.1. КУБИК ПАНЖАРАЛИ МАТЕРИАЛЛАРНИ ЭПИТАКСИАЛ ЎСТИРИШ

Кубик панжарали материалларининг плёнкаларини бир-бирларининг устига ўстириш ҳозирги замон электроникасида жуда кенг қўлланилади. Масалан МДЯ, (М-металл, Д-диэлектрик, Я-ярим ўтказгич) тизимларнинг асосий қисмини кубик панжарали плёнкалар ташкил қилади. Кўп қатламли (ҳажмий) микротизимлар ҳосил қилишда металл хусусиятга эга бўлган CoSi_2 ва NiSi_2 каби силицидлар, -Si, Ge, GaAs (ва бошқа A^{III}B^V бирикмалар) каби ярим ўтказгичлар, CaF_2 , BaF_2 каби диэлектрик материаллар кубик панжарага эга бўлганлиги учун жуда аҳамиятлидир.

Асоснинг юзасида бирор плёнкани ўстиришда уларнинг кристалл тузилишлари бир хил бўлишидан ташқари плёнканинг ва ўтиш қатламининг сифати қуйидаги асосий омилларга ҳам боғлиқ бўлади:

1. Плёнка ва асоснинг кристалл панжаралари доимийларининг қийматларига. Уларнинг панжара доимийси қийматлари бир-бирларига жуда яқин бўлиши (фарқ $\sim 0,07\%$ ошмаслиги) керак.

2. Плёнка ва асоснинг чизиқли кенгайиш температура коэффициентларига (ЧКТК). Улар ҳам катта фарқ қилмаслиги керак.

3. Юзаларнинг ва чегаравий қатламининг энергетик параметрларига.

4. Ўтказилаётган атомларнинг диффузия қобилиятига.

5. Асос ва плёнкадаги атомларнинг боғланиш турига.

6. Асос ва плёнканинг ўзаро таъсирлашув характериға.

4.2 - жадвалда гетероэпитаксия тизимларида ишлатиш мумкин бўлган материалларнинг панжара доимийлари ва физик хусусиятлари келтирилган.

4.2-жадвал

Кубик панжарали материалларнинг панжара
доимийлари қийматлари

Ярим уткагичлар

Материал	а, А	Ҳисобини
C	3.563	0
Si	3.431	0
Ge	3.646	0
Sn	6.4892	0
GaAs	3.653	A. ш
InP	3.869	A. ш
GaP	3.4512	A. ш
SiC	6.479	A. ш
CdTe	6.482	A. ш
SiC	5.407	A. ш
PbTe	6.461	T. т
PbSe	6.14	T. т

A ш-алданма цикли ((Z)-F43m).

O - олмос ((D-Fd3m)

Ф-флюорит ((F-Fm3m).

T т-теш тузи((R-Fm3m)

Диэлектриклар

Материал	а, А	Ҳисобини
CdF ₂	5.388	Ф
CaF ₂	3.464	Ф
SrF ₂	5.789	Ф
BaF ₂	6.200	Ф
SrO	5.10	T. т
TiO	4.235	T. т

Металлар

Материал	а, А	Ҳисобини
CoSi ₂	5.363	Ф
NiSi ₂	5.406	Ф
ZnN	4.778	T. т

Демак, плёнка ўстиришда асос бўлиши асосий шарт экан. Асос ва плёнканинг панжара доимийси ва ЧКТК лари бир-бирларидан сезиларли фарқ қилса, эпитаксиал плёнка кристалл тузилишининг мукамаллиги камаяди. Агар уларнинг энергетик параметрлари фарқ қилса, плёнканинг морфологияси ва қўп ҳолларда юза қатламларнинг стехиометрик таркиби бузилади.

Ўсиш механизми эпитаксиал тизимнинг қуйидаги термодинамик параметрлари орқали аниқланади: “плёнка-вакуум” сиртий солиштирма эркин энергиялари - γ_{nb} ; “асос - вакуум” сиртий солиштирма эркин энергиялари - γ_{ab} ; “плёнка - асос” сиртий солиштирма эркин энергиялари - γ_{na} ; ҳамда “адсорбат - сирт (юза)” тизимининг кимёвий потенциали μ (Ферми сатҳи):

$$\mu = K T \ln(R_p/R_d), \quad (4.16)$$

бу ерда, R_p ва R_d —ўтқазилаётган материал заррачаларининг адсорбцияланиш ва десорбцияланиш тезлиги.

“Плёнка-асос” тизимининг сиртий солиштирма энергияси γ_0 қуйидагига тенг:

$$\gamma_0 = \gamma_{na} + \gamma_{na} - \gamma_{nb}. \quad (4.17)$$

Плёнка қандай режимда ўсаётганлиги қуйидаги шартлар орқали аниқланади:

а) $\Delta\mu \leq 0$; $\gamma_0 = 0$; $\Delta a = |a_n - a_s| \approx 0$ бўлса, қатламма-қатлам (2Д) ўсиш рўй беради. Бундай ўсиш механизми Франк-ван дер Мерве механизми деб аталади.

б) $\Delta\mu > 0$; $\gamma_0 > 0$; $\Delta a \neq 0$ бўлса, оролчали (3Д-) ўсиш рўй беради ва Фольмер-Вебер механизми деб аталади.

с) $\Delta\mu \geq 0$; $\gamma_0 \approx 0$; $\Delta a \neq 0$ бўлса, қатламма-қатлам ўсишдан оролчали ўсишга (2Д > 3Д) ўтиб боради. Бу механизм Сгранский-Крастанов механизми дейилади.

Гетероэпитаксиал материаллар ўстиришда плёнка ва асоснинг солиштирма сиртий энергиялари катта фарқ қилса, керакак морфологияли плёнка олиш муаммо бўлиб қолади. Масалан $\gamma_2 \ll \gamma_1$ бўлса, плёнка якка-якка оролчалар ҳолида ўса бошлайди эки плёнкада каналлар, чуқурликлар ҳосил бўлади. Бу ҳолда кўпинча фасетланган (қирралари бошқа йўналишга ориентирланган) сиртлар ҳосил бўлиши ва стехиометрик таркиб кескин ўзгариши мумкин.

Юқорида кўрсатиб ўтилган физик жиҳатлар эпитаксиал ўсиш жараёнида ва янги эпитаксиал тизимларни ҳосил қилишда ҳисобга олиш шарт бўлган асосий омиллардир.

4.2-жадвалдан кўринадики, М-Д-Я тизимини ҳосил қилишда CoSi_2 (металл), Si (ярим ўтказгич), CaF_2 (диэлектрик) энг қулай материаллардир. CaF_2 -Si- CoSi_2 эпитаксиал қатламлар "М-Д-Я" тизими учун ланжара параметрлари жуда яқин бўлган ва яхши сифатли гетеротузилма қатламлар ҳосил қиладиган ягона тизимдир (4.3-жадвал). Иккинчи томондан уларнинг физик хусусиятлари ноёб техник кўрсаткичга эга бўлган асбоблар яратишга имкон беради.

4.3-жадвал

CaF_2 , Si ва CoSi_2 нинг кристал тузилиши ва физик хусусиятлари

Материал	Si	CoSi_2	CaF_2
Нуқтавий гуруҳ	M3m	m3m	m3m
Фазовий гуруҳ	Fm 3m	Fm 3m	Fm 3m
Тупилиши	Олма	Флюрит	Флюрит
α , Å @ 20°C	3.531	3.365	3.464
$(\Delta\alpha/\alpha)_T$ %	-	-1.21	+0.61
ЧКТК $\times 10^6$ Вт/смК	2.5	15.4	19.1
Эриш т-си, °C	1415	1326	1360
Физик хусусияти	Я	М	Д
Ушга ҳос каттиқлик тари	$E_f = 1.12$ эВ	$\rho = 15$ экиОм см	$E_f = 12.1$ эВ

Si, CoSi₂, CaF₂ (BaF₂, SrF₂) эпитаксиал комбинацияларнинг қаттиқ жисм электроникасида ва микроэлектроникада мустақил қўлланилиши мумкин бўлган соҳалари устида қисқача тўхталиб ўтамиз.

1. CaF₂, SiF₂, BaF₂ буфер қатламлари билан қопланган кремний монокристаллари замонавий электрониканинг ярим ўтказгичли материаллар эпитаксияси учун универсал таглик (асос) бўлиб хизмат қилади. Ҳозирги пайтда A₃B₅, A₂B₃, A₄B₆ каби бирикмаларни ўстиришда таглик энг асосий муаммо бўлиб қолмоқда. Таглик сифатида фторидларнинг юлқа қатламлари билан қопланган кремнийдан фойдаланиш жуда истиқболли бўлиб, қуйидаги афзалликларга эга:

а) кремнийли монокристаллар жуда арзон, кристаллик мукамиллиги жуда юқори, юқори механик мустаҳкамликка эга, юқори иссиқлик ўтказувчанликка эга (масалан, GaAs дан уч марта катта) бўлиб, ҳозирги кунда диаметри 200 мм. гача бўлган кремнийли асослар олинмоқда;

б) кремнийли планар технология — энг самарали бўлиб, унинг бугунги кунда конкуренти йўқ;

в) 3-ўлчамли интеграл тизимлар олиш имконини беради;

г) сезгир элементни юқори эпитаксиал қатламда монокристалл интеграция қилиш ва сигналларни қайта ишлаш тизимини кремнийли асосда амалга ошириш имконияти мавжуд.

Фторидлар иккита мақсад бўйича буфер қатламлар сифатида ишлатилиши мумкин:

а) плёнкани электр асосдан изоляциялаш;

б) плёнка ва асос панжара доимийларининг мос келмасликларини камайтириш, мувофиқлаштирувчи ўтиш қатлам ҳосил қилиш.

Шундай қилиб буфер қатламли кремнийлар уч ўлчамли ИС олишда опто ва фотоэлектрон қурилмаларда, лазер асбоблари ва ИК-детекторлар олишда қўлланилади.

2. Металл — эпитаксиал диэлектрик — кремний вертикал МДЯ — транзисторлар ишлаб чиқаришнинг асосини ташкил қилади. МДЯ тизими металл базали ва сизувчи базали транзисторларни ишлаб чиқариш имконини беради. Бу транзисторлар айниқса ўта юқори частоталарда (150 ГГц) барқарор ишлаши катта аҳамиятга эга.

3. Ўта юқори частотали асбоблар яратишда. Кўп қатламли CoSi₂/Si/CoSi₂/Si/CoSi₂/Si тизимлар куюн-пролет диодлар, Шотткининг ЎЮЧ диодларини олишда ишлатилмоқда.

4. Умумлашган монокристалл нурланиш детекторлари яратилганда Si , CoSi_2 , CaF_2 эпитаксиал комбинациялари ультраби-нафша ва рентген нурлари детекторларининг асосий эле-ментлари бўлиб хизмат қилади.

5. Қўшимча йўналишлар. CoSi_2 Шоттки барьерли асбоб-лар, омик контактлар, ўзаро уловчи тизимлар олишда кенг қўлланилади. CoSi_2 нинг Si даги юпқа қатламлари ҳарорат датчикларининг актив қисми бўлиб хизмат қилади. CaF_2 плёнкалари субмикрон литографияда (электрон резистор сифатида), оптик қабул қилувчи қурилмаларда, опто ва фотоэлектроника асбобларида интерференцион манзара ҳосил қилувчи қатламлар сифатида ишлатилади.

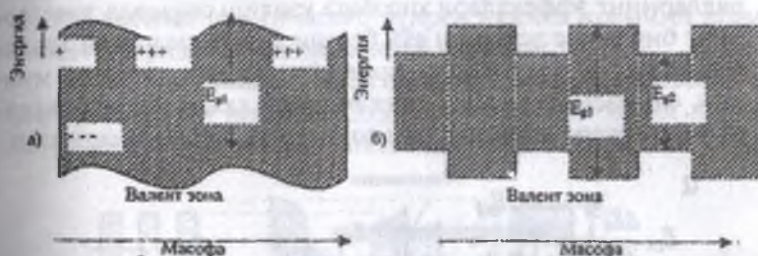
4.4.2. МОЛЕКУЛЯР-НУРЛИ ЭПИТАКСИЯ (МНЭ)

МНЭда ҳосил бўлаётган плёнка берилган асоснинг юза-сида ўсади ва у бу юза билан аралашиб кетмайди. МНЭда керакли атомлар асоснинг юзасига келиб ўтиради ва юзада қатламма-қатлам ўсиб бораверади.

Юпқа қатламлар олиш ва юпқа қатламлар асосида кўп компонентли тизимлар ҳосил қилишнинг энг замонавий усулларидан бири молекуляр нурли эпитаксиядир. МНЭ усулини плёнкалар ва улар орасидаги қатламларнинг энг юқори сифатда тайёрлаш имконини беради. Бу эса ўз навбатида мукамал ярим ўтказгичли гетеротизимлар (якка гетероўтишлар, яккаланган потенциал ўралар, даврий ва кўп қатламли тизимлар) ҳосил қилишнинг барча талабларини бажаради. Пуркаладиган (юзага ўтказиладиган) материалларнинг ўта тоза манбаларидан фойдаланиш, ўта юқори вакуум ($P \leq 10^{-7}$ Па), асос температурасини хатосиз назорат қилиш, ўсиш жараёнларини компьютерли бошқариш тизимини қўллаган ҳолда турли усуллар билан ўрганиш (диагностика қилиш) ҳаммаси биргаликда сифат жиҳатдан янги технологияни вужудга келтирди.

Бундай ўлчамли тизимларни суюқ фазали эпитаксия ёки газларни ташиш ҳамда бошқа усуллар билан олиш жуда қий-ин ва амалга ошириб бўлмайдиган вазифадир. МНЭ эса ҳар қандай қалинликдаги (1 нм дан то юзлаб мкм гача) плёнка-ларни керакли кимёвий таркиб ва керакли концентрацияли аралашмалар билан тайёрлаш имконини беради. Кўп компо-нентли, бир ўлчамли ўта юпқа плёнкалар даврий тизимла-

рининг юқори панжарасини ҳосил қилиш ғояси 1969 йилда Эсаки ва Цу томонидан ишлаб чиқилган. Бунда юқори панжара олишнинг икки хил тури таклиф қилинган: ўзгарувчан легирланган ва ўзгарувчан таркибли (4.5-расм).



4.5-расм. Икки турдаги ўта юқори панжариларда зоналар чегаралари фазовий йулининг кўриниши: а-кетма-кет п ва р қатламли легирланган ўта юқори панжара, б-ўзгарувчан таркибли яримўтказгичнинг композицион ўта юқори панжараси. Тяъқиқланган зона-штрихланган.

Куйида ўзига хос ноёб хусусиятли эпитаксиал плёнкалар олиш учун ҳал қилиниши керак бўлган вазифаларни санаб ўтамиз.

1. Ўта юқори вакуум ва ўта юқори тозаликдаги модда атомлари оқимидан фойдаланиш ҳисобига юқори тозаликдаги монокристаллар олиш.

2. Нисбатан кичик ҳароратда ўстириш ҳисобига ўзаро диффузияни кескин камайтириб, чегарада таркиби кескин ўзгарадиган ўта юпқа қатламли тизимларни ҳосил қилиш.

3. Кичик-кичик марказлар ҳосил бўлишини йўқотадиган поғонали ўсиш механизмидан фойдаланиш ҳисобига гетероэпитаксия учун силлиқ нуқсонсиз сиртларни (юзаларни) олиш.

4. Ўсиш жараёнини нисбатан кичик тезликда олиб бориш ҳисобига олинаётган ўта юпқа қатламларнинг қалинлигини назорат қилиш (бошқариш).

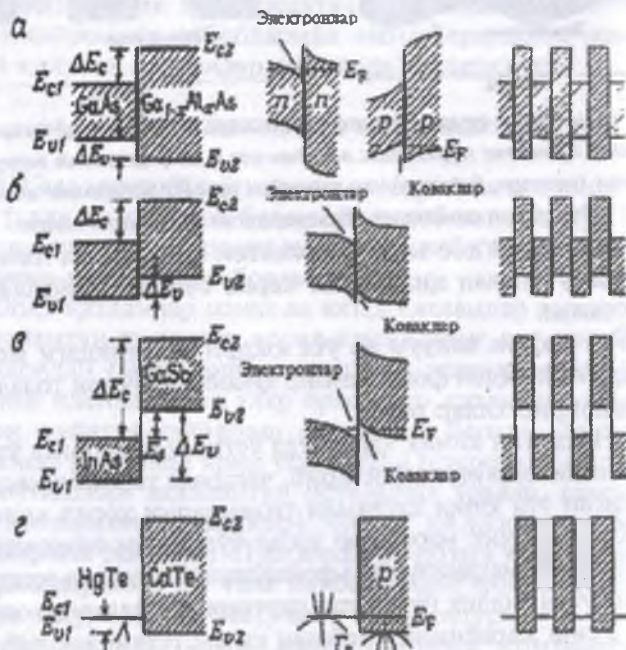
5. Мураккаб таркибли профилга ёки легирланишга эга бўлган тизимлар олиш.

6. Керакли (бошқариладиган) зонавий тизимга эга бўлган тизимлар ҳосил қилиш.

Ҳозирги пайтда гетероўтишлар ва юқори панжаралар $\text{GaAs-Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ тизими учун тўлароқ ўрганилган. Амалий аҳамиятини ҳисобга олган ҳолда куйидаги тизимлар ҳам ҳар томонлама ўрганилмоқда: InAs-GaSb , InAs-AlSb , InAlAs .

InGaAs, Ge-CaAs, Ge-CaAs, CdTe-HgTe ва купгина ҳар хил панжара доимийсига эга бўлган $A^{III}B^V$ бирикмалари.

Яримўтказгичларнинг гетерочегараларида локал зонавий тузилишлари кескин узилишга эга. Реал ҳолда фазавий зарядларнинг эффектлари ҳисобига узилиш соҳасида зоналарнинг бир текис эгилиши рўй беради. Узилишларнинг характериға қараб гетерочегараларни тўртта турға ажратиш мумкин. 4.6-расмда идеал ва реал ҳол учун ҳамда юқори панжара учун гетерочегаралардаги зоналар йўллари кўрсатилган.

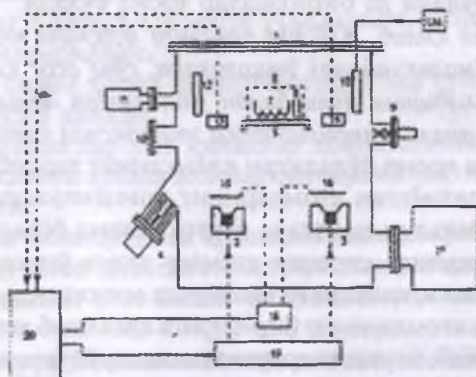


4.6-расм. Гетерочегараларнинг тўртта тури учун зоналар чегараларнинг йўли ўзгариши: зоналарнинг узилиши (чапда), зоналарнинг эгилиши ва заряд тишувчиларнинг локализация соҳалари (ўртада), юқори панжара(ўнгда): а-I турдаги гетероўтиш; б-II турдаги гетероўтиш: зоналарнинг поғонали йўли; в-III тур гетероўтиш тақиқланган зоналари кесишмайдиган; г-III тур гетероўтиш.

Молекуляр нураи эпитаксия усулини кремнийнинг юза-сида кобўлт кремний ($CoSi_2$) плёнкасини ҳосил қилиш жараёни орқали кўриб ўтамиз (4.7-расм): юқорй вакуум ша-

роитида юзаси жуда яхши тазаланган кремний монокристалининг сиртига кобальт (Co) ва кремний (Si) манбаларидан уларнинг атомлари келиб ўтира бошлайди. Бунда эффузион манбаларнинг режими Ҳар бир моментда юзага битта кобальт атоми келиб ўтирса иккита кремний атоми келиб ўтирадиган қилиб танлаб олинади.

Асоснинг температураси шундай танланадики, юзага келиб ўтираётган атомлар CoSi_2 бирикмасини ҳосил қилади ва уларнинг плёнкаси эпитаксиал ўса бошлайди.



4.7-расм. МНЭ ўстириш қурилмаси: 1-вакуум камераси; 2,3-электрон нурли буглаттич (ЭНБ); 4-эффузион манба; 5-намуна; 6-манипулятор; 7-қиздиргич; 8-термопара; 9-катта энергияли электронлар түпи; 10-люминисцентли экран; 11-газоанализатор; 12-криопанель; 13,14-ўсиш тезлигини аниқловчи кварцли датчиклар; 15,16-ёпқич (заслонка); 17-ион насоси; 18-ёпқични бошқариш тизими; 19-ЭНБ манбаси; 20-ЭХМ.

Ҳосил қилинаётган плёнкаларнинг қалинлиги ва ўсиш тезлиги кварцли датчиклар ёрдамида аниқланади. Плёнкаларнинг кристалл тузилиши, панжаранинг тури ва параметрлари катта энергия электронларнинг дифракцияси усули билан аниқланади. Ўсиш жараёни ЭХМ ёрдамида бошқариб борилади.

4.4.3. ҚАТТИҚ ФАЗАЛИ ЭПИТАКСИЯ (ҚФЭ) ВА РЕАКТИВ ЭПИТАКСИЯ (РЭ)

Қаттиқ фазали эпитаксия ҳам МНЭ каби ўта юқори вакуумда амалга оширилади. ҚФЭни учта босқичга ажратиш мумкин:

1) асос юқори даражада аралашмалардан тозаланада ва юзаси силлиқланади, келиб ўтирадиган атомлар манбаи ҳам қиздириш йўли билан аралашмалардан тозаланади;

2) хона ҳароратида (ёки паст температураларда) асос юзасига керакли атомлар пуркалиб (ўтқазилиб) қатламлар ҳосил қилинади.

3) асос секин-аста керакли температурагача қиздирилади, бунда юзадаги қатлам атомлари асос ичига ва асосдаги атомлар қатлам ичига кириб боради, улар орасида кимёвий реакция бўлади ва бирикмалар ҳосил бўлади.

Шундай қилиб, ҚФЭда аввалига асоснинг юзига керакли атомлар (малекулалар) ўтказилади, сўнг асос керакли ҳароратгача қиздириш йўли билан ўтқазилган атомлар ва асос атомлари аралаштирилиб юпқа эпитаксиал қатлам олинади.

ҚФЭда ҳосил бўладиган плёнканинг таркиби ва қалинлиги ўтказилаётган атомларнинг концентрациясига, ҳароратига ва маълум пайтгача вақтга боғлиқ бўлади.

ҚФЭ усулида керакли атомлар юзага ўтқазилиб, аморф плёнка ҳосил қилинади ва қиздириш натижасида плёнка-асос чегарасида атомларнинг бир-бирига аралашиб кетиб бирикма ҳосил бўлиши ва унинг кристалланиши рўй беради. Натижада янги таркибли эпитаксиал плёнка ҳосил бўлиши мумкин. Бу плёнканинг таркиби ва қалинлиги ўтқазилган атомларнинг концентрациясига, асос ҳароратига, юзага қандай монокристалнинг қайси қирраси ориентацияланганлигига (йўналганлигига) ва сиртнинг тозалигига боғлиқ бўлади.

ҚФЭ усулини $\text{CoSi}_2/\text{Si(III)}$ плёнкасини ҳосил қилиш жараёни орқали кўриб ўтамиз. ҚФЭ билан бундай плёнка ҳосил қилишнинг икки усули мавжуд. Биринчи усулга биноан Si нинг тоза юзасига Co атомларининг қатламлари хона ҳароратида ўтқазилади ва кейин қиздирила бошланади. Натижада Co ва Si атомлари аралашиб ва бирикмалар ҳосил бўлади. $T=300^\circ\text{C}$ гача қиздирилганда CoSi_2 нинг полиаморф плёнкаси, $T=400-450^\circ\text{C}$ нинг поликристал плёнкаси ва $T=500-550^\circ\text{C}$ - CoSi_2 нинг монокристал плёнкаси ҳосил бўлади. Бу усулда ҳосил қилинган плёнкада қуйидаги нуқсонлар мавжуд: микротешиклар вужудга келади; юза нотекис ва кам зичликка эга бўлади; CoSi_2 нинг монокристали иккита ориентацияга эга бўлиши мумкин.

Иккинчи усулда Si(III) юзасига Co ва Si атомлари бир хил миқдорда кетма-кет ўтқазилади ва бу тизимни 400°C қиздирилганда CoSi_2 эпитаксиал плёнкаси ҳосил бўлади. Бу плёнка атом даражасида силлиқ минимал микротешикларга ($\sim 10^5 \text{ см}^2$) эга, текис ва бир хил таркибли мукаммал бўлади.

Айрим ҳолларда 2 ёки 3 компонентли плёнкалар олишда ҚФЭнинг бошқача усули ҳам қўлланилади. Масалан, кобальт-кремний (CoSi_2) ҳосил қилиш учун кремнийнинг юзасида кремний плёнкаси ҳосил қилиниб, унинг юзасига кобальт ўтқазилади, ёки кремнийнинг юзасига кобальт ўтқазилиб, унинг юзасига кремний ўтқазилади, кейин керакли даражада қиздирилади.

Бу усул билан ҳосил қилинган плёнкада қуйидаги нуқсонлар вужудга келади:

- а) плёнкада ҳар хил каналлар ҳосил бўлиши мумкин;
- б) плёнканинг ҳамма жойларида таркиб бир ҳил бўлмаслиги мумкин;
- в) плёнка атомларининг аралашиб кетиши ҳисобига ҳосил бўлгани учун унинг қалинлигини тўғри назорат қилиш қийин;
- г) плёнканинг асос билан чегараси бир текис бўлмайди ва ҳоказо.

Қайси усул қўлланишидан қатъи назар ҚФЭ да қуйидаги камчиликлар мавжуд:

- а) ҳароратни хона температурасидан секун-аста $500\text{--}600^\circ\text{C}$ гача ошириб бориш керак бўлади;
- б) плёнка асос чегарасида атомларнинг аралашувида асос атомлари ҳам қатнашади.

Натижада ҳосил бўлаётган плёнка қалинлигини бошқариш ва назорат қилиш жуда қийин бўлади. Бу айниқса $\text{Si-CoSi}_2\text{--Si}$ каби кўп қатламли тизимлар олиш имкониятларини чеклаб қўяди.

ҚФЭнинг хусусий ҳоли реактив эпитаксиядир (РЭ). *Реактив эпитаксия деб асоснинг юзасига атомларнинг келиб ўтириши жараёнида асосни эпитаксиал плёнка ҳосил бўлиш температурасигача қиздириб туриш йўли билан асос ва келиб ўтирган модда атомлари бирикмасидан ташкил топган плёнка ҳосил қилиш жараёнига айтилади.* Масалан, CoSi_2 олиш учун Co атомлари асос юзасига $600\text{--}650^\circ\text{C}$ ҳароратда ўтқазилади. Бунда Co атомлари Si нинг ичига диффузия туфайли кириб боради ва CoSi_2 плёнкасини ҳосил қилади. Бу усулда кўпинча оролчали ўсиш кузатилади.

4.5. ЮПҚА ҚАТЛАМЛАРДА ФИЗИК ЖАРАЁНЛАР КЕЧИШИНИНГ ЎЗИГА ХОСЛИГИ. ЭЛЕКТРОН ҚУРИЛМА ВА АСБОБЛАРИНИ ЮПҚА ПЛЁНКАЛАР АСОСИДА КИЧИКЛАШТИРИШ ИСТИҚБОЛЛАРИ

Юпқа қатламларда рўй берадиган физик ходисалар қалин қатламларда рўй берадиган физик ходисалардан тубдан фарқ қилади. Бундай физик ходисаларга жумладан, қуйдагиларни мисол қилишимиз мумкин: электронларнинг эмиссияси, ток ташувчиларни кўчувчанлиги, оптик хусусиятлар, электр ўтказувчанлиги ва ҳоказо.

Бундай фарқ қилишнинг асосий сабаблари қуйдагилардир:

1. Ҳар қандай яхши тайёрланган, нуқсонсиз деб ҳисобланган плёнкага ҳам у ўстирилган асос таъсир қилади ва бу таъсир атомлар орасидаги масофага, уларнинг текис-нотекис жойлашишига (морфологиясига), кристалл панжара параметрларига таъсир қилади, яъни плёнка-асос чегарасида асос юзасининг нотекислиги, ҳамда асос кристалл панжара доимийларининг плёнка доимийларига мос келмаганлиги сабабли плёнка хусусиятларини (панжара катталикларини) ўзгартирувчи омиллар сабаб бўлади.

2. Плёнка-асос чегарасида албатта, ўзаро диффузия ходисаси рўй беради: плёнка ичига асос атомлари, асос ичига плёнка атомлари кириб боради.

3. Қатлам юпқа бўлганлиги сабабли физик жараёнларнинг рўй беришида қатлам билан бир вақтда асос ҳам иштирок этиши мумкин.

Шунинг учун ҳам, яъни мана шу учала ҳолни ҳисобга олганимизда юпқа қатламларда рўй берадиган физик ходисалар жуда мураккаб кечиши кўриниб турибди. Айтилганларга яна ўнлаб омиллар қўшилиши мумкин, масалан, плёнка билан асоснинг температура коэффициентлари ҳар хиллиги, уларнинг бошқа ташқи таъсирлар натижасида ўзгаришларининг ҳар хиллиги мисол бўла олади. Аммо, юқоридаги омилларни ҳисобга олган ҳолда юпқа плёнкаларнинг таркибини, кристалл тузилишини, умуман хусусиятларини керакли йўналишда ўзгартириш мумкин. Бундай плёнкалар бошқа усуллар билан олиб бўлмайдиган ўзига хос ноёб хусусиятларга эга бўлади. Кўпгина физик ходисалар, масалан, эмиссия ходисалари, электр ўтказувчанлик, p - n ўтиш жараёнлари жуда

юпқа қатламларнинг хусусиятларига боғлиқ бўлиб қолади. Шунинг учун ҳам бундай плёнкалардан фойдаланиш электрон асбоблар ва қурилмалар (ярим ўтказгичли диодлар, транзисторлар, кучайтиргичлар, интеграл микросхемалар, қуёш элементлари, юқори частотали асбоблар ва бошқалар) ўлчамларини жуда кичрайтириш имкониятини беради.

Ҳозирги пайтда электроникада ўлчамлари микрометр (мкм)ларда бўлган плёнкалар ишлатилса, келажакда нанометр (нм) ўлчамли плёнкалар ишлатилади. Si, CoSi₂, CaF₂, SiO₂, GaAs каби ярим ўтказгич ва диэлектрик плёнкалар микроэлектроника асбобларининг энг асосий компонентлари ҳисобланади. Улардан ва уларга бошқа элемент атомларини киритиб тайёрланган қўп қатламли тизимлар ҳар хил МОП, МДП — транзисторлар, ИК-фотодиодлар, лазерлар, оптоэлектрон ва электрон эслаб қолувчи тизимлар, УЮЧ асбоблар, лавино-пролёт диодлари, катта ва ультра катта интеграл схемалар тайёрлашда кенг қўлланилади.

Юқориди санаб ўтилганлар орасида металл базали (МБТ) ва сингилл базали (СБТ) УЮЧ транзисторлар алоҳида ўрин тутади.

Бу транзисторларда CoSi₂-Si-CaF₂ тизими ишлатилади. Бунда п-р-п биполяр транзисторлардаги ярим ўтказгичли база металл хусусиятга эга бўлган юпқа CoSi, қатлами билан алмаштирилади. Натижада базанинг қаршилиги кескин камаяди ва ундаги электронлар концентрацияси 10³ марта ортади (биполяр транзисторда кремнийли база учун N ≈ 10¹⁹ см⁻³, металл базада эса N ≈ 10²² см⁻³). МБТ учун ток ташиш коэффициенти α қуйидаги формуладан топилади:

$$\alpha = \alpha^* \exp\left(-\frac{d}{\lambda}\right) \approx 1 - \frac{d}{\lambda} \quad (4.18)$$

бу ерда, α* ≈ 0,9-1; d — базанинг қалинлиги, λ — электронларнинг базадаги эркин югуриш йўли узунлиги.

МБТ ва СБТ жуда юқори частоталарда f ≥ 20-30 ГГц шовқинсиз ишлаш қобилиятига эга.

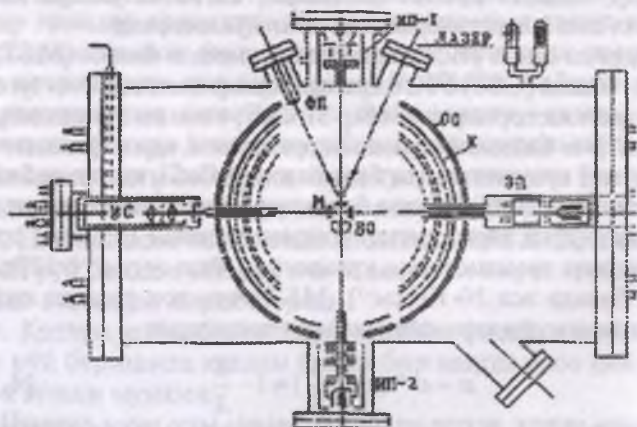
4.6. ЮПҚА ПЛЁНКАЛАР ОЛИШНИНГ БОСҚИЧЛАРИ. ЎСИШ КИНЕТИКАСИ

Юпқа плёнкалар ҳосил қилиш, аввал айтилгандек, имкони борича юқори вакуум шароитида (10⁻⁶ Па) амалга оширилади.

Фараз қилайликки, кремний монокристаллининг юзасида кремний плёнкасини ҳосил қилиш керак бўлсин, бундай плёнка ҳосил қилиш учун асоснинг юзаси юқори даражада

силлиқланади. Бунинг учун асос аввал шишада жилвирланади, кейин эса юмшоқ материал юзасида ҳар хил диаметрли зарраларга эга бўлган пасталар (гоя, олмос) ёрдамида жиллоланади. Қўшимча равишда озгина электржилланиши ҳам мумкин, кейин эса дистирланган сувда бир неча марта қайта-қайта қайнатилиб, спирт билан тозаланади ва юқори вакуумли қурилмага жойлаштирилади. Бундай қурилма тахминан қуйидаги қисмлардан ташкил топади:

- 1 - ион тўп
- 2 - фотонлар дастасини ҳосил қилувчи қурулма
- 3 - электрон тўп
- 4 - вакуум ҳосил қилувчи тизим
- 5 - атом, молекулалар манбаси
- 6 - асос
- 7 - очиб ёпиш қурилмаси



4.8-расм. Экспериментал қурилма: ИС-ёруғлик манбаи; ЭП-электрон тўп, М-нишон; ИП1 - газ (Ar^+ , O_2^+ , N_2^+) ионларнинг манбаи, ИП2 - ҳосил қилинадиган плёнка атомлари ва молекулаларининг манбаи; ФП-фото қабул қилгич; ОС-экран; БО-қиздирилиш қурилмаси.

Электрон тўп ёрдамида юзанинг морфологияси ва кристалл тузилиши ўрганилади. Ион тўп ёрдамида эса юзага ионлар билан ишлов берилади ёки плёнка тузилиши ўрганилади. Атом ва молекулалар манбаи ёрдамида нишоннинг юзасида керакли материалнинг (масалан Si нинг) плёнкаси ҳосил қилинади. Айрим ҳолларда бу атом ва молекулалар ионлаштирилади (4.8-расм).

Асосга юқори вакуум ($P \leq 10^{-6}$ Па) шаронгида ишлов берилади, яъни имкон қалар у юқори температурагача қиздирилади. Натижада юза қўшимчалардан тозаланади ва силлиқланади. Бу қиздириш водород оқими остида амалга оширилса, юза янада яхшироқ натижалар беради. Жуда тоза юзалар ҳосил қилиш учун айрим ҳолларда қиздириш жараёни юзаларга газ ионлари билан ишлов бериш билан навбатманавбат олиб борилади. Бундай усуллар билан юзадаги ноте-кисликларнинг ўлчамлари 30-50 Е гача келтирилади. Умуман, кремнийни олтингугуртдан мутлақо тозалаш мумкин (қайд қилувчи асбобларнинг имконияти қадар), углерод ва кислороддан эса тўла тозалаб бўлмайди. Асос билан бир қаторда манба ҳам юқори даражада тозаланади. Шундай тозалашлардан кейин манбалар ишга туширилади ва атомларнинг учиб чиқиш режимлари танланади. Манбадан учиб чиққан атомлар асоснинг юзига келиб ўтира бошлайди. Ўсиш жараёни тахминан қуйидагича рўй беради:

1) Асоснинг ҳар жой — ҳар жойига алоҳида атомлар келиб ўтиради (адсорбцияланади).

2) Асоснинг ҳар жойидаги алоҳида атомлар бир - бирига келиб қўшилиб кичик тўпламлар ҳосил қилади ва буларнинг айримлари критик ўлчамгача катталашиб плёнка ҳосил қилиш марказлари бўлиб хизмат қилиши мумкин. Бунда уларнинг ўлчамлари 20-30 А гача боради.

3) Кейинги атомлар келиб тушиши ва атрофдаги айрим атомларнинг келиб қўшилиши ҳисобига бу марказлар ёнига ва баландлиги бўйича критик ўлчамгача ўса бошлайди ва оролчалар ҳосил бўлади.

4) Ёнма — ён турган кичик оролчаларнинг қўшилиши натижасида ўлчами каттароқ бўлган оролчалар пайдо бўла бошлайди. Бу ҳодиса коалесценция деб аталади. Оролчалар кичик бўлган пайтда уларнинг кўриниши учбурчаксимон бўлади, улар катталашганда кўпинча олтибурчак кўринишига эга бўлади. Бу олтибурчакларнинг ўлчамлари тахминан 100 - 1000 А бўлади. Оролчалар қўшилиши натижасида юзада бўш жойлар кўпаяди, чунки иккита кичик оролчанинг умумий юзи ҳар доим улар қўшилган кейинги юзадан катта бўлади.

5) Оролчаларнинг орасида янги марказлар ҳосил бўлиб, улар ҳам ўса бошлаши мумкин. Маълум вақтдан кейин ҳамма

оролчалар бир-бирига чегарадош бўлиб қолади ва улар чегараларида каналлар ҳосил бўлади.

б) Каналлар ва очик қолган жойларга яна атомлар утира бошлайди ва **нккиламча марказлар** ҳосил бўлади, натижада нотекис бўлса ҳам узлуксиз плёнка ўса бошлайди.

Юқорида кўриб ўтилган босқичларнинг айримлари чизма тарзида 4.9 — расмда келтирилган. **Пешли ўсиш жараёнини 4 та босқичга ажратади:** марказлар ва оролчалар тизимининг ҳосил бўлиши; оролчаларнинг ўсиши ва коалесценцияси (қўшилиши); каналларнинг вужудга келиши; узлуксиз плёнканинг ҳосил бўлиши.

Кўпинча бу плёнкалар поликристалл ҳолда бўлади. Улардаги оролчаларни йўқотиш учун “плёнка — асос” тизими юқори температурагача қиздирилади.



4.9-расм. Юпқа плёнкалар ҳосил бўлишининг схематик тасвири: а) айрим атомларнинг юзага ўрнашиб қолиши; б) марказлар ҳосил бўлиши; в) марказлар ўсиб алоҳида оролчаларнинг ҳосил бўлиши; г) оролчаларнинг бир-бирига қўшилиб кетиши.

4.7. ПОЛИКРИСТАЛЛ ПЛЁНКАЛАРНИНГ ЎСИШ ЖАРАЁНИДА НУҚСОНЛАРНИНГ ВУЖУДГА КЕЛИШИ

Ўсиш жараёни ва нуқсонларнинг ҳосил бўлиши ҳар хил асос ва плёнкалар учун ўзига хос ҳолда ҳар хил бўлса ҳам, бу жараёнларда умумийлик мавжуд. Қуйида поликристалл плёнкалар ўсиши жараёнида дефектлар (нуқсонлар) ҳосил бўлишининг асосий ҳолларини кўриб ўтамиз. Нуқсонларни аниқлашда катта ва кичик энергияли дифракция ҳамда растрли электрон микроскопия усуллари кўп қўлланилади.

1. Дислокациялар. Дислокациялар (чизикли нуқсонлар) ўсиш жараёнида энг кўп учрайдиган нуқсонлардан ҳисобланади. Уларнинг зичлиги кўпинча 10^{10} см⁻² дан 10^{11} см⁻² гача бўлади. Куб панжарали металл ва бошқа плёнкаларни ўсти-

ришда дислокация ҳосил бўлишининг беш турдаги механизми мавжудлиги аниқланган:

1. Ёнма-ён ўсаётган иккита оролчанинг кристалл панжалари бир-бирига нисбатан кичикроқ бурчак ҳосил қилса, улар орасида дислокациядан иборат чегара ҳосил бўлади.

2. Плёнка ва асоснинг панжара доимийлари кўпинча бир-биридан фарқ қилади. Натижада плёнка ва асос атомларининг бир-бирига нисбатан силжиши рўй беради. Битта оролчадаги атомларнинг силжиши иккинчисиникидан фарқ қилганлиги учун оролчаларнинг ўсиш жараёнида дислокациялар вужудга келиши мумкин.

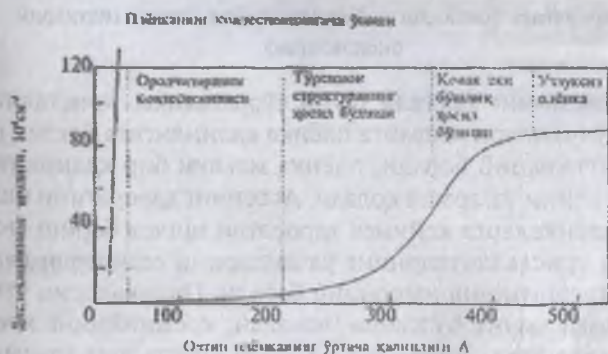
3. Плёнкалар ҳосил бўлишининг бошланғич жараёнларида вужудга келадиган тешик ва оралик (бўш жой) ларнинг қирраларида юзага келадиган кучланишлар узлуксиз плёнкаларда дислокация ҳосил қилади.

4. Асоснинг юзига чиққан дислокациялар плёнкада ҳам давом этиши мумкин.

5. Узлуксиз плёнкада оролчаларнинг бир-бирига қўшилиш жараёнида оролчаларнинг юзасига чиққан нуқсонларнинг бир-бирига қўшилиб кетиши натижасида дислокациялар вужудга келиши мумкин.

Кўп ҳолларда плёнқа-асос чегарасидаги механик кучланишларни камайтириш учун дислокациялар занжири вужудга келади.

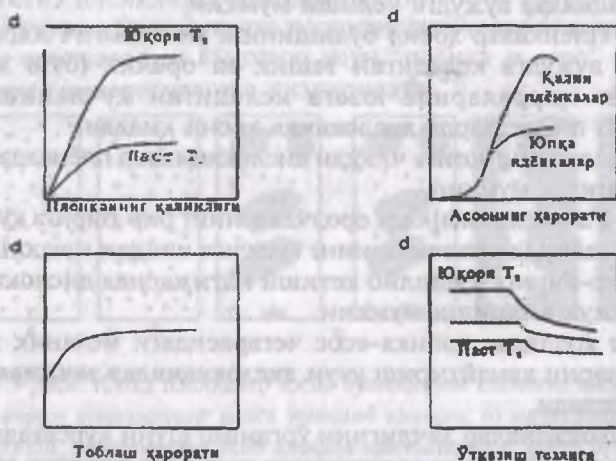
Дислокациялар зичлигини ўрганиш шуни кўрсатадики, плёнкаларда энг кўп дислокациялар каналлар занжири ва тешиклар ҳосил бўлиши жараёнида пайдо бўлади (4.10 - расм).



4.10-расм. Хона ҳароратида MoS_2 устирилаётган олтин плёнкадаги дислокацияли зичлиги плёнқа қалинлигига боғлиқлиги.

Тадқиқотлар кўрсатадики каналлар тўлгандан кейин ҳам ўсаётган плёнкада жуда кичкина тешиклар (диаметри 100-200 Å) мавжуд бўлади. Деярли ҳамма тешиклар диэлектриклар маркази бўлиб хизмат қилади.

2. Дошалар (бўлакчалар) чегараси. Ҳар қандай плёнка купгина алоҳида — алоҳида бўлакчалар — кристаллитларнинг йиғиндисидан ташкил топади. Кристаллитларнинг ўлчамлари асоснинг ҳароратига, плёнканинг қалинлигига, ўстириш тезлигига ва тоблаш (отжиг) ҳароратига боғлиқ бўлади (4.11 - расм).



4.11-расм. Кристаллитлар ўлчамларининг ўсиш шароити ва ҳароратига боғлиқлиги: d-кристаллнинг ўлчами (ихтиёрий бирликларда).

4.11-расмнинг таҳлили шуни кўрсатадики, кристаллитларнинг ўлчамлари аввалига плёнка қалинлигига боғлиқ равишда катталашиб боради, плёнка матълум бир қалинликка етгандан кейин ўз армай қолади. Асоснинг ҳароратини ошириш ва плёнкаларга кейинги ҳароратли ишлов бериш (тоблаш) ҳам кристаллитларнинг ўлчамларини сезиларли даражада катталаштириш имконини беради. Плёнкаларни ўтқизиш тезлиги кичик бўлганда (масалан, кремнийнинг кремний юзасида ўтқизишда ~2÷5 Å/с гача) кристаллит ўлчамлари ўтқизиш тезлигига боғлиқ бўлади, кейин эса ўтқизиш тезлиги ошган сари кристаллит ўлчамлари кичрайиб боради.

Умуман кристаллитларнинг бир-бирига тегиб турадиган соҳалардаги чегаралар плёнка учун нуқсонлар ҳисобланиб, унинг физик-кимёвий хусусиятларига таъсир қилади.

3. Сирт юзасининг ғадир — будирлиги. Плёнканинг тўла энергияси энг кичик қийматга эга бўлиши учун, унинг сирти мумкин қадар кичик юзага эга бўлиши, яъни сирт идеал текисликдан иборат бўлиши керак. Плёнка қалинлиги ошган сари унинг сирт юзаси мос равишда ошиб бориши, яъни ғадир-будурликнинг кўпайиб бориши тажрибалардан аниқланган. Плёнкалардаги бу каби нуқсонларни камайтириш учун уни қиздириш, электронлар, ионлар ёки лазер нурлари билан ишлов бериш усуллари қўлланилади.

4.8. МОНОКРИСТАЛЛ ПЛЁНКАЛАРДАГИ НУҚСОНЛАР

Монокристалл плёнкалар ўстиришда вужудга келадиган асосий нуқсонлар ва уларнинг келиш сабаблари (механизмлари) ҳақида қисқача тўхталиб ўтамиз. Тузилишга боғлиқ бўлган асосий нуқсонлар қуйидагилардан иборат: 1. Жойлашишга боғлиқ бўлган нуқсонлар. 2. Иккиланувчи. 3. Кичик бурчакли чегара. 4. Нуқтавий нуқсонларнинг тўпланишига боғлиқ бўлган нуқсонлар (масалан, дислокация сиртмоғи). 5. Дислокациялар.

Панжаранинг бундай нуқсонлари ҳар қандай материални (металл, қотишма, ярим ўтказгич, диэлектрик) эпитаксиал ўстиришда кузатилади.

Нуқсонларнинг ҳосил бўлиш механизмларини қуйидагича талқин қилиш мумкин:

1. Асос сиртидаги дефектларнинг плёнкада ҳам давом этиши. Бу механизм жуда катта рол ўйнамайди, чунки кўпинча эпитаксиал ўсаётган плёнкадаги нуқсонларнинг зичлиги асос сиртидаги нуқсонлар зичлигидан ўнлаб, ҳатто юзлаб марта катта бўлади. Асос сиртидаги дислокациялар плёнка аморфсимон ўстирилса, сезиларли таъсир қилиши мумкин.

2. Марказлар йўналишларининг аккомодацияси ва мос келмаслик кучланиши. Кичик оролчаларнинг ўсиши ва бир-бирига қўшилиб плёнка ҳосил қилиш жараёнида кристалл тузилишининг ҳар хил нуқсонлари вужудга келади. Дислокациялар йўналишларнинг бир хил эмаслиги маҳсули бўлганлиги учун коалесценция (қўшилиш) жараёнида йўналишларнинг разориентация (бир хил эмаслиги) даражаси дислокациялар сонини белгилайди.

Учта марказ ўсиб, бир-бирига қўшилишида уларнинг йўналишлари ҳар хиллиги туфайли мос келмаслик кучланиши вужудга келади ва улар орасидаги майдонда ҳам дислокация вужудга келади.

3. Нуқтавий нуқсонларнинг тўпланиши. Нуқтавий нуқсонларнинг дислокацияларни вужудга келтиришдаги роли яхши ўрганилмаган. Плёнкаларни ўтқозиш жараёнида буғланиш туфайли қўплаб бўш жойлар вужудга келиши мумкин. Бу айниқса, кичик ҳарорат ва катта тезликли ўстиришда сезиларли бўлади. Бўш жойларни тўлдириб бориш жараёнида ҳосил бўладиган нуқтавий нуқсонлар тўплами дислокация сиртмоғи ва бошқа нуқсонлар занжирини вужудга келтиради.

4. Пластик деформация (шакл ўзгариш). Пластик деформация ҳисобига эпитаксиал плёнкалар юқори кучланишли ҳолатда бўладилар. Пластик деформациялар ҳисобига ўсаётган оролчаларнинг қирралари ҳар хил кўринишдаги дислокацияларни вужудга келтириши мумкин.

5. Сиртнинг тоза эмаслиги. Чет элементлар атомларининг мавжудлиги жойлашишга боғлиқ бўлган нуқсонларни вужудга келтиради.

Ҳозирги пайтда монокристалл плёнкаларни ўстириш жараёнида ҳосил бўлиши мумкин бўлган нуқсонлар ва уларнинг механизмлари тўлиқ ўрганилган эмас. Бу бўлимда берилган ахборотлар умумий тушунчалар мажмуидан иборатдир.

4.9. Кремний эпитаксиал қатламларида кристаллографик нуқсонлар

Кремнийнинг эпитаксиал қатламларини ҳар хил монокристаллларнинг юзасида ҳосил қилиш мумкин. Кремнийнинг панжараси куб шаклида бўлгани учун асоснинг панжараси ҳам куб бўлиши керак. Бундай куб панжарага эга бўлган материаллар қуйидагилар: Si, CaF_2 , CoSi , GaAs ва бошқалар.

Агар кремний плёнкаси кремний юзасида ҳосил қилинса, *автоэпитаксия* дейилади, яъни бунда *гомоген система* ҳосил бўлади.

Кремнийнинг эпитаксиал плёнкаси бошқа материалнинг (CaF_2 , GaAs) юзасида ҳосил қилинса, *гетероэпитаксиал плёнка* дейилади.

Кремний плёнкасини ёки умуман ҳар қандай эпитаксиал плёнкаларни олганда унда нуқсонлар камроқ ҳосил бўлишида қуйидаги омиллар асосий рол ўйнайди:

- 1) жуда юқори вакуумда ўстириш,
- 2) асоснинг юқори даражада силлиқланганлиги ва тозаллиги,

3) атомлар манбаининг тозаллиги.

Агар вакуум юқори бўлмаса, камерада мавжуд бўлган газ атомлари кремний билан бирга ўтириб (SiC , SiO_2 , SiS), кремнийникидан фарқ қиладиган марказлар ҳосил қилиши мумкин. Худди шу каби нуқсонлар кремний манбаи тоза бўлмаса ҳам пайдо бўлиши мумкин.

Асоснинг юқори даражада силлиқ ва тоза бўлишидан ташқари унга яна қуйидаги талаблар қўйилади:

- кристалл тузилишининг мослиги, панжара катталикларининг яқинлиги;

- юзада нотекисликларнинг йўқлиги, яъни юзада кристалл панжара бузилиши йўқ бўлиши;

- температуравий кенгайиш коэффициентлари деярли бир хил ёки жуда яқин бўлиши керак.

Демак, юқоридаги шартларнинг бажарилиши нуқсонларни имкони борича камайтиришга ёрдам беради. Умуман, эпитаксиал плёнкаларда қуйидаги турдаги нуқсонлар мавжуд бўлиши мумкин:

- а) жойлашишга боғлиқ бўлган нуқсонлар;
- б) иккиланишларнинг пайдо бўлиши;
- в) оролчаларнинг чегаралари қўшилганда ҳосил бўладиган кичик бурчакларнинг пайдо бўлиши;
- г) нуқтавий нуқсонларнинг тўпланиши;
- д) дислокациялар.

4.10. КОБАЛЬТ КРЕМНИЙ (CoSi)НИ КРЕМНИЙ ЮЗАСИДА ЭПИТАКСИАЛ УСТИРИШ

Ҳозирги пайтда катта ва ўтакатта интеграл схемалар олишда металл базали транзисторларнинг янги турларини яратиш алоҳида аҳамиятга эга. Аммо, куб панжарали ва параметри кремнийникига яқин бўлган металл плёнкаларни амалда ҳосил қилиш мумкин эмас. Шунинг учун ҳам хусусиятлари металлникига яқин бўлган силицидларни (кремнийнинг бирон бир металл билан бирикмасини) ишлатиш мақсадга мувофиқдир. Бундай силицидлар 2та: NiSi_2 ва CoSi_2 .

Аммо CoSi_2 панжара доимийси кремнийникига жуда яқин бўлгани учун металл базали транзисторларда уни ишлатиш қулайроқ бўлади. Шундай қилиб, металл базали транзисторларда $\text{Si} - \text{CoSi}_2 - \text{Si}$ тизими ишлатилиши мумкин.

Si ва CoSi_2 ларнинг физик параметрлари ва кристаллографик параметрлари 4.3 - жадвалда келтирилган.

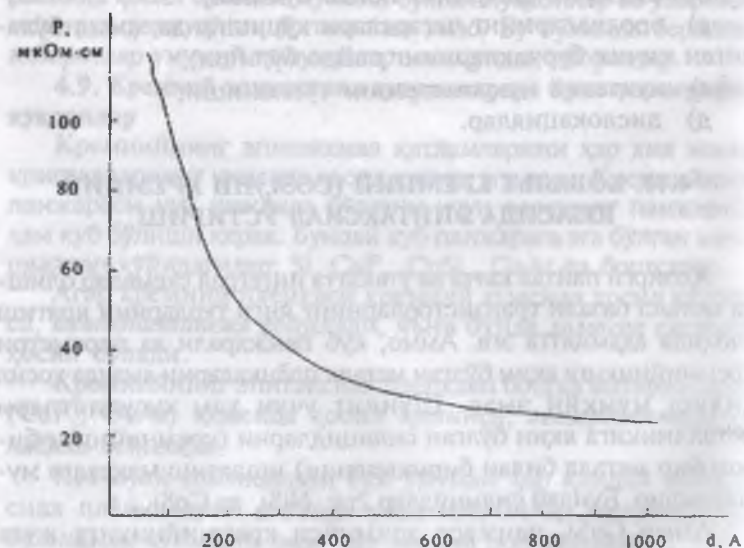
CoSi_2 ни МНЭ ва ҚФЭ усуллари билан олишни юқоридаги параграфларда кўриб чиққанмиз.

4.3-жадвал

Si ва CoSi_2 учун кристалл панжара параметрлари

Кристалл, плёнка	Панжара тури	Панжара доимийси, E	ρ, мкОм·см Ом·см, м
CoSi_2	кубик	5,38	20-50
Si	кубик	5,43	$\geq 10^4$

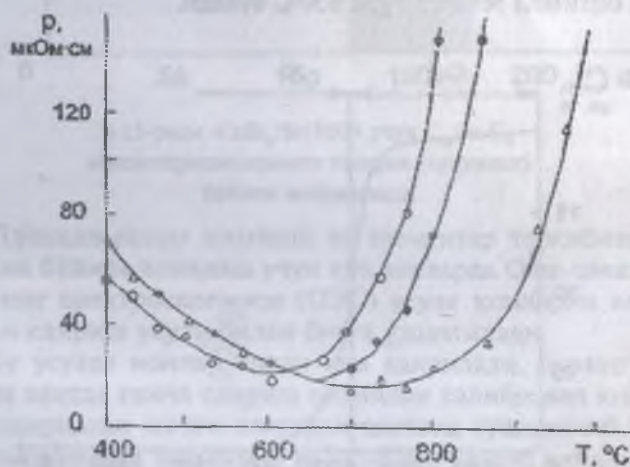
CoSi_2 плёнкасининг физик хусусиятлари плёнканинг қалинлигига кичик қалинликларда боғлиқ бўлади, чунки кичик қалинликларда плёнканинг хусусиятларига асоснинг таъсири катта бўлади. Масалан, 4.12 - расмда солиштирма қаршилиқнинг плёнка қалинлигига боғлиқлиги келтирилган.



4.12-расм. CoSi_2/Si тизими учун солиштирма қаршилиқнинг плёнка қалинлигига боғлиқлиги.

Демак, плёнка қалинлиги 400-500 Å дан катта бўлганда унга асоснинг таъсири деярли сезилмайди.

Плёнка мукамаллиги (бир жинслилиги, силлиқлиги, кристалл панжарада дефектларнинг камлиги) ўстириш температурасига жуда ҳам боғлиқ бўлади. 4.13-расмда солиштирма қаршилиқнинг температурага боғлиқлик графиги келтирилган. Илмий тадқиқотларнинг кўрсатишича, солиштирма қаршилиқ энг кичик бўлганида плёнка эпитаксиал ва энг мукамал булар экан. 300-350°C гача ҳосил қилинган плёнка аморф бўлади; 450-500°C да поликристалл бўлади; 500-600°C оралигида монокристалл бўлади-ю, аммо ориентацияси бир хил бўлмайди (текстура) ва унда ҳар хил нуқсонлар кўп бўлади; 600-700°C да плёнка монокристалл ва нуқсонлари энг кам ҳолда бўлади; 700-750°C дан кейин асосдан кремний атомлари плёнка таркибига кириб боради ва стехиометрик тартиб бузилади, бу эса қаршилиқнинг ортишига олиб келади; 800-900°C ва ундан катта ҳароратларда плёнкалар оролча-оролча бўлиб ажралиб кетади; кейинги қиздиришлар CoSi_2 нинг парчаланиб кетишини ва юзадан Co ҳамда Si атомлар ҳолида учиб чиқишини вужудга келтиради.

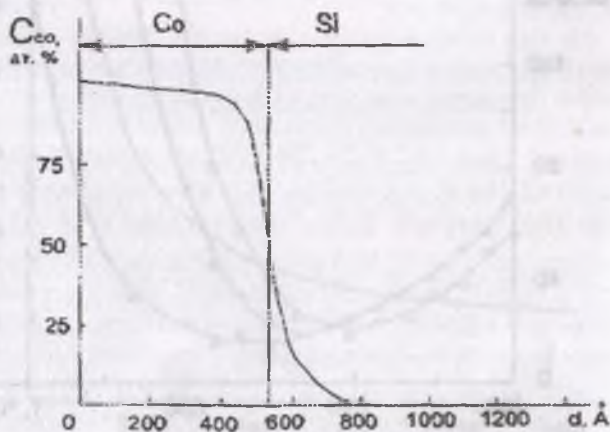


4.13-расм. МНЭ усули билан ўстирилган CoSi_2 <100> плёнкаси солиштирма қаршилигининг ҳароратга боғлиқлиги.

4.11. ЭПИТАКСИАЛ ҚАТЛАМЛАРНИНГ ПРОФИЛ БЎЙИЧА КИМЁВИЙ ТАРКИБИ

Бирор монокристаллнинг юза қисмида плёнкалар ҳосил қилганимизда маълум бир оптимал температурагача қиздирмагунча плёнканинг чуқурлик бўйича таркиби ҳар хил бўлади. Масалан, ҚФЭ усули билан CoSi_2 плёнкасини ҳосил қилиш учун Si нинг юзасига Co ўтказилади. Аммо, хона ҳароратидаёқ диффузия ҳисобига плёнкада ҳам, асоснинг юза ва юза ости қисмларида ҳам элементар ҳамда кимёвий таркиб ҳар хил бўлиши мумкин.

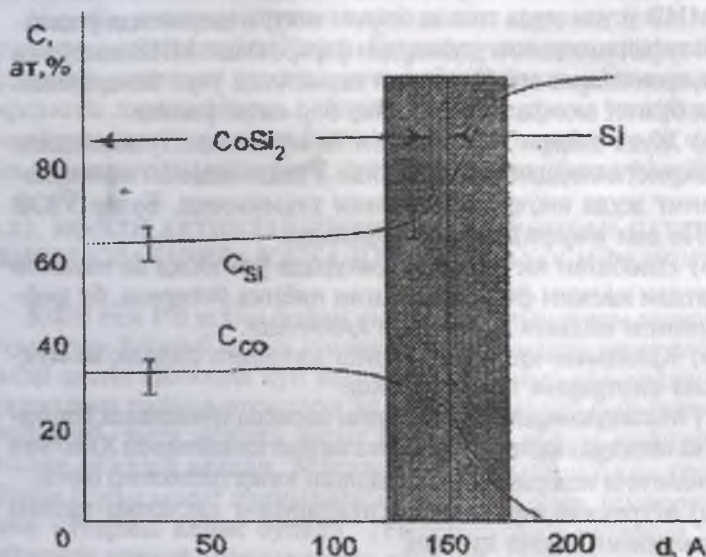
4.14-расмдан кўринадики, идеал ҳолда 500 Å гача фақат Co бўлиб, кейин унинг концентрацияси тезда 0 га тенг бўлиши керак. Реал ҳолда эса плёнкадаги Co атомлари ўрнининг бир қисмини Si атомлари эгаллайди, асоснинг бир қисмини эса Co атомлари эгаллайди. Бунда атомлар аралашиб кетган қисмда кимёвий таркиб ҳам ҳар хил бўлиши мумкин. Масалан, Co_3Si , Co_2Si , CoSi , CoSi_2 , CoSi_3 , ... Қиздирилган ҳолда эса, кимёвий бирикмаларнинг ҳосил бўлиши кўпаяди. Фараз қилайлик, маълум ҳароратда эпитаксиал плёнка ҳосил бўлсин. Масалан, CoSi_2 эпитаксиал плёнкасини ҳосил қилиш учун оптимал температура 650°C бўлади.



4.14 – расм. Хона температураси шароити учун Co/Si чегаравий қатламида Co атомлари концентрациясининг чуқурлик (профил) бўйича ўзгариши.

4.15-расмдан кўринадикки, энг идеалга яқин ҳолатда кимёвий таркиб уч қисмдан иборат бўлади:

- 1) маълум бир қалинликдаги мукаммал эпитаксиал плёнка,
- 2) ўтиш қатлами (у ҳам эпитаксиал, аммо таркиби ўзгариб боради),
- 3) асос, яъни Si.



4.15-расм. $\text{CoSi}_2/\text{Si} < 100 >$ учун C_{Co} ва C_{Si} концентрацияларнинг профил (чуқурлик) бўйича жойлашиши.

Плёнкаларнинг кимёвий ва элементар таркибини чуқурлик бўйича аниқлаш учун кўп ҳолларда Оже-электронларнинг спектроскопияси (ОЭС) усули юзаларни ионлар билан едириш усули билан бирга ишлатилади.

Бу усулда ионлар билан юза едирилади, бунинг учун қанча вақтда қанча едириш олдиндан калибровка қилинади, едирилган жойга электрон дастаси туширилиб, ОЭС усули ёрдамида элементар ва кимёвий таркиб аниқланади. Бу ҳолда тўғри ахборот олиш учун едирилган юзанинг катталиги электрон дастасининг диаметридан камида 5—6 марта катта бўлиши керак.

4.12. МНЭ ТЕХНОЛОГИЯСИНИНГ АСОСИЙ АФЗАЛЛИКЛАРИ

МНЭ усули 70-йиллардан бошлаб йўлга қўйила бошлади. Бу вақтда келиб юзори вакуум олиш (10^{-5} - 10^{-10} Па) ва юзаларни юқори даражада тозалаш (ионлар билан, лазерлар ёрдамида) имкониятлари пайдо бўлди.

МНЭ усули жуда тоза ва юқори вакуум шароитида ўтказилиши туфайли олдинги усуллардан фарқ қилади. МНЭнинг ўзига хос хусусиятларга эга бўлишини таъминлаш учун бажарилиши керак бўлган вазифаларни яна бир бор санаб ўтамиз:

а) Жуда юқори тозаликдаги ва мукамал тузилишдаги монокристаллардан фойдаланиш. Ўтказиладиган молекулаларнинг жуда юқори тозалигини таъминлаш. Булар $УЮВ$ (10^{-8} Па дан юқори)да олиб борилади.

б) Нисбатан кичик температурада ўта юпқа ва таркиби жиҳатдан кескин фарқ қиладиган плёнка ўстириш, бу диффузиянинг олдини олиш учун қилинади.

в) Қатламма-қатлам ўстириш ҳисобига силлиқ ва нуқсонсиз сиртларни ҳосил қилиш.

г) Молекулаларнинг тушишини керакли йўналишда бошқариш ва молекулаларнинг оқими тезлигини камайтириш. Ҳисобига қалинлигини назорат қилиб буладиган юпқа плёнкалар олиш.

д) Мураккаб таркибли плёнкаларнинг қатламма-қатлам тизимларини ҳосил қилиш.

Бошқа (ҚФЭ, РЭ, ион-активация, ион имплантация) усулларга нисбатан, аввал қайд қилганимиздек, МНЭ усули қуйидаги асосий афзалликларга эга:

1) асос ва атом (молекула) лар манбаларини юқори даражада тозалаш ва экспериментни жуда юқори вакуумда ўтказиш ҳисобига эпитаксия температурасини жуда пастга тушириш мумкин (500-600K);

2) ҳар хил турдаги (металл, яримўтказгич, диэлектрик) материалларни бир бирининг устига қатламма-қатлам керакли қалинликда ўтқазиш мумкин;

3) бундай қатламларни (масалан: металл-диэлектрик-яримўтказгич, металл-оксид-яримўтказгич, яримўтказгич-диэлектрик-яримўтказгич ...) даврий равишда бир хил устма-уст ўтқазиб бориш, яъни ҳажмий структуралар олиш мумкин;

4) бундай ўстиришда битта турдаги қатлам иккинчи турдаги қатлам билан кескин чегара ҳосил қилиши мумкин;

5) плёнкалар ҳосил қилиш жараёнида уни легирлаш учун легирловчи модданинг таркибини ва концентрациясини ўзгартириш йўли билан хусусияти ўзгариб боровчи тизимларни ҳосил қилиш мумкин.

Юқорида кўрсатилган афзаликлар туфайли МНЭ плёнкалар микроэлектрониканинг ривожланишида асосий рол ўйнаган бўлса, наноэлектрониканинг пайдо бўлишига сабаб бўлади.

Умуман юпқа эпитаксиал плёнкалар алоҳида, ўзига хос бўлган хусусиятларга эга бўлади. Бундай хусусиятларнинг пайдо бўлишида асоснинг таъсири ҳам, плёнка ўсиш давомидида легирланиш даражаси ҳам, плёнкага тушган, ундан ўтаётган ва чиқаётган электронлар ва фотонларнинг таъсирлари ҳам массив плёнкалардан кўра фарқ қилишлари асосий рол ўйнайди.

4.13. ИОНЛИ АКТИВЛАШТИРИШ УСУЛИ БИЛАН ҚАТТИҚ ЖИСМ ЮЗАЛАРИДА ЮПҚА ПЛЁНКАЛАР ҲОСИЛ ҚИЛИШ

ҚФЭ ёки РЭ усули билан умуман, қаттиқ жисм юзасига атомларни ўтказиб кейин ишлов бериш усуллари юпқа плёнкалар ҳосил қилишда кўп ишлатилади. Аммо кўп ҳолларда ўтқазилган плёнка атомлари ва асос атомлари бир-бирига аралашиб, янги плёнка ҳосил бўлишида айрим қийинчиликлар вужудга келади. Масалан: ҳосил қилишимиз керак бўлган плёнканинг қалинлигини ошириш учун температурани кўтариш керак бўлади. Температурани кўтариш эса қуйидаги асосий муаммоларни вужудга келтиради:

- плёнканинг қалинлигини назорат қилиб бўлмайдиган ва текис чегаравий қатлам олиб бўлмайди;

- керакли бир хинсли таркибни ҳосил қилиш қийин бўлади;

- юқори температураларда плёнканинг устки қатламлари буғланиб кетиши мумкин;

- юқори температураларда асоснинг таркибидаги четки аралашмалар активлашиши мумкин. Улар диффузия ҳисобида плёнка ичига ёки чегаравий қатламга тўпланади.

Бу муаммоларни маълум бир миқдорга ҳал қилиш учун ион-активацион усул ишлатилади. Бу усулга асосан асоснинг юзаси плёнка ўтқазилган олдин ионлар билан урилади. Бунда икки ҳолни кўриб чиқиш мумкин: 1. Агар ионлар энергияси унча катта бўлмаса ($E_{\text{ион}} \leq 400-500$ эВ) улар асоснинг юзасида кўнраб кристалланиш марказларини ҳосил қилади. Бу марказлар нисбатан кичик температураларда асос юзасида мукаммал плёнкалар олиш имконини беради.

2. Агар ионларнинг энергияси катта бўлса ($E_i > 500-1000$ эВ), бу ионлар кристалларнинг ичида юриб бориб атомларнинг ҳаракати учун маълум бир йўллар очади (говаклар ҳосил қилади), кейин бу юзага керакли материалнинг атомлари ўтказилади. Унча катта бўлмаган маълум бир температурада юзага ўтказилаётган атомлар бу говаклар орқали асоснинг ички қисмига кириб боради ва унинг атомлари билан интенсив аралашади. Демак, бу усул билан кичик температураларда асос ва плёнка атомларининг аралашиб кетишини ва керакли бирикма ҳосил қилинишини таъминлаш мумкин. Ионларнинг энергиясини ўзгартириш йўли билан ҳосил қилиниши керак бўлган плёнканинг қалинлигини керакли миқдорда ўзгартиришимиз ва назорат қилишимиз мумкин.

Ионли активлаштириш усулининг хусусий ҳоли ион — молекуляр усул деб ҳам юритилади. Бу усулга асосан, юзага тушириладиган атомларнинг маълум бир қисми ионлаштирилади ва уларга энергия берилади. Бу тушаётган ионлар асос ва ўтказилган атомларнинг аралашиб кетишини тезлаштиради ва нисбатан кичик температураларда керакли плёнкалар олишни таъминлайди.

Плёнкаларни ионли ўтқазиш жараёнини умумий изоҳлаш учун энергетик активация (фаоллик) даражасини баҳолаш керак бўлади. Ионлар таъсири билан боғлиқ бўлган энергетик активация энергия коэффициенти (ε) деб аталувчи катталиқ билан аниқланади:

$$\varepsilon = \frac{E_i + E_n}{E_n} = 1 + \frac{n_i \cdot e_i}{n_n \cdot e_n}$$

Бу ерда, $E_i + E_n$ — ионлар таъсири бор пайтда асос юзасига тушиб конденсацияланаётган барча зарраларнинг кинетик энергияси, E_n — ионлар таъсири йўқ пайтида барча зарраларнинг кинетик энергияси, n_i/n_n — ионлар тезлигининг ўтқазиш тезлигига нисбати, e_i/e_n — ионлар оқими энергиясининг ионлар таъсири йўқ пайтидаги зарралар оқими энергиясига нисбати.

Ионли активация усули билан плёнкалар олишда асос юзасида рўй берадиган жараёнлар ионларнинг энергиясига боғлиқ бўлади. Ионлар энергиясининг катталигига қараб ионлар таъсири эффектини шартли равишда бешта ораликқа бўлишимиз мумкин:

1. $E \approx 10^{-2} - 10$ эВ. Бу ораликда ионлар конденсацияни термик активлаштиради ва миграцияни кучайтиради.

2. $E \approx 10^{-1} \div 5 \cdot 10^2$ эВ. Асос юзасидаги четки атомлар учиб кетади, адгезия яхшиланади ва анча мужассам қатламлар ҳосил бўлади.

3. $E \approx 5 \div 5 \cdot 10^2$ эВ. Зарядланган нуқсонларнинг марказлари вужудга келади, кристалл тузилишда нуқсонлар ҳосил бўлади.

4. $E \approx 5 \cdot 10^4 \div 10^6$ эВ. Кристалл тузилиш бузила бошлайди, иккиламчи едириш рўй беради.

5. $E \approx 5 \cdot 10^3 \div 10^5$ эВ. Ионларнинг ва кетма-кет атомларнинг асоснинг ички қатламларида жойлашиб қолиши (имплантацияси) рўй беради.

4.14. ИОН ИМПЛАНТАЦИЯ УСУЛИ

Бу усулда керакли элемент атомлари тўлалигича ионларга айлантирилади ва уларга электр майдони ёрдамида энергия берилиб, асоснинг юзасига туширилади. Бу энергия ҳисобига ионлар асоснинг ичига кириб бориб жойлашади. Кўпинча, жараённинг ўзида керакли бирикмалар ҳосил бўлади. Масалан, $BaSi$ ёки $BaSi_2$ бирикмасини олиш учун кремнийнинг юзасига барий ионлари билан урилади. Бунда барийнинг кўп қисми кремнийнинг юза ости қатламларига жойлашиб, керакли бирикмаларни ҳосил қилади. Ион имплантация усулида монокристаллларнинг юзаси бузилади, кўп ҳолларда ҳосил бўлаётган плёнка аморф бўлади, уни кристалл ҳолга айлантириш учун қиздириш керак бўлади. Ион имплантация усулининг энг асосий афзаллиги шундан иборатки, бу усул билан ҳар қандай материалга турли хил атомларни киритиш мумкин.

Ионли легирлаш учун асбоб-ускуналар. Ионли легирлаш қурилмаларининг турли-туман хиллари мавжуд. Адабиётларда E_0 энергиянинг 10кэВ дан 300кэВ гача оралигида ишлаши учун мўлжалланган тезлатгичларнинг тафсилоти мавжуд, лекин расмий жиҳатдан бу соҳа мазкур шарҳнинг муҳокама доирасига қирмайди.

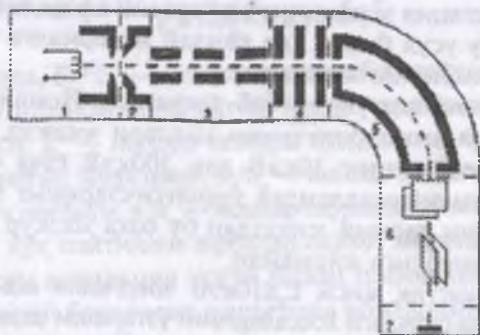
Бу ерда қаттиқ жисм $E_0 \leq 10$ кэВ энергияли ионлар билан легирланганда сиртдаги хоссаларнинг ўзгариши ва янги хусусиятли қатламлар (плёнкалар) ҳосил бўлиши муҳокама қилинади. Бироқ ҳамма тезлатгичларнинг ишлаш принципи бир хил.

Тезлатгичлар қуйидаги асосий қисмлардан ташкил топган: ион манбаи, манбадан ионларни тортиб олувчи, тезлаштирувчи ва фокусловчи электродлар, ионларни массалари бўйи-

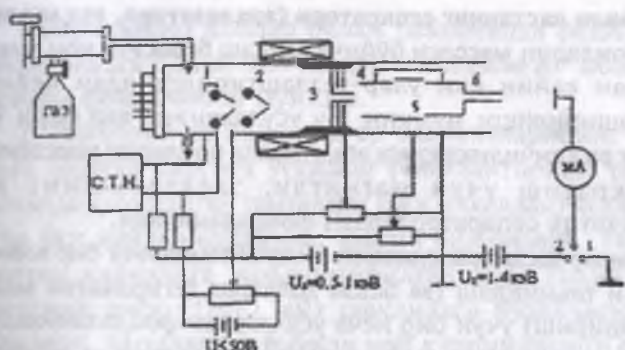
ча тақсимловчи (сепаратор- танловчи), сканлаш (ёйиш) қурилмаси. Улар бир-биридан одатда фақат тезлатиш ва фокуслаш усуллари билан фарқ қиладилар. Ионли легирлаш қурилмасининг тузилиш схемаси 4.16-расмда тасвирланган.

1. **Ионли манба.** Ион манбаида атомлар аралашмасининг ионлашиши амалга оширилади. Газсимон моддалардан ҳам, қаттиқ моддалардан ҳам ион дасталарини олиш имконини берувчи манбалар кенг қўлланилади. Қўлланиш мақсадига қараб қуйидаги манба турларининг биридан фойдаланилади: чўғланувчи катодли манба, юқори частотали манба, Пеннинг разрядли манбаи, дуаплазматрон плазма генератори - плазма оқими олинадиган разрядли қурилма, чангланишдан фойдаланиладиган манба ва атомларнинг сиртий потенциал ионлашишига асосланган манба.

Ион турига нисбатан универсальниги ҳамда интенсив ион дастаси олиш имконияти туфайли ҳозирги вақтда чўғланувчи катодли манбалардан илмий изланишларда ҳам, саноат қурилмаларида ҳам кенг фойдаланилмоқда. Катод ва анод орасидаги фазода зарур газ ёки қаттиқ жисм буғларининг юқори босими (одатда $10^{-3} + 10^{-1}$ Па) ҳосил қилинади. Ионларни олиш принципи атомларнинг тезлаштирилган электронлар билан тўқнашиши натижасида ионлашишига (электрон қабул қилиши ёки йўқотиши) асосланган. Разряд вольфрамдан ясалган катод ва анод ўртасида ёнади. Электронларнинг разрядда бўлиш муддатини узайтириш, яъни ионлашиш интенсивлигини кучайтиришга ташқи магнит майдони ёрдамида эришилади.



4.16-а расм. Металл ионлари тўпининг қурилмаси: 1-ионлари манбаи; 2-ионларни тортиб чиқарувчи диафрагмалар тизими; 3-фокусловчи линза; 4-ионларни тезлатиш тизими; 5-ионларни нейтрал заррачалардан ажратиш қурилмаси; 6-ионларни сканлаш (ёйиш) тизими; 7-нишон.



4.16-б расм. Газ ионлари тупининг қурилмаси: 1-чўғлантириш толаси; 2-анод; 3-диафрагмалар тизими; 4-6-фокусловчи ва тезлаштирувчи диафрагмалар тизими; 7-электромагнит; С.Т.Н.-чўғланиш токининг стабилизатори.

Ишқорий ва ишқорий-ер металлрининг бир зарядли ионларини олиш учун одатда сиртдаги мусбат ионлашиш ҳодисасига асосланган манбалардан фойдаланилади. Қайд этилган металллар атомларининг ионлашиш энергияси кичик ($E_{и} \leq 6$ эВ) бўлганлиги туфайли бу атомлар чўғланган вольфрам симининг сирти билан тўқнашганда ионлашади ва шунинг учун ҳам анод ва вольфрам сим орасида разряд ҳосил қилишнинг ва магнит майдонларидан фойдаланишнинг зарурати қолмайди. Ҳосил бўлган ионлар тортувчи электродлар ёрдамида манбадан чиқарилиб, сўнгра фокусловчи электродлар майдонида туширилади.

2. Фокуслаш ва тезлатиш. Ионлар дастасини фокуслаш ионларни тезлаштиришдан олдин амалга оширилади. Фокуслаш фокусловчи ва тортувчи электродлардан тузилган электростатик линза ёрдамида бажарилади. Сўнгра бу ионлар тезлатувчи электрод майдонида тезлаштирилади. Ионларни қуйи (10-15 кэВ) энергия олгунча тезлатишга мўлжалланган қурилмаларда одатда битта тезлатувчи электроддан, анча юқори энергиялар учун эса бир нечта электродлардан (тезлатувчи секцияли бўлимлардан иборат найдан) фойдаланилади.

3. **Ионли дастанинг сепаратори (анализатори, таҳлиллагичи).** Ионларни массаси бўйича танлаш бевосита ион манбаларидан кейин ёки улар тезлаштирилганидан кейин амалга оширилиши мумкин. Бу усулларнинг ҳар бири ўз устунлик ва камчиликларига эга. Амалда ионларни массасига кўра ажратиш учун магнитли, электромагнит ва электростатик сепараторлардан фойдаланилади.

4. **Ионлар дастасини сканлаш.** Имплантациянинг бир жинслилигини таъминлаш (ва баъзи ҳолларда легирланган майдонни ошириш) учун бир неча усуллардан фойдаланилади: ионлар дастасини сканлаш, намунани силжитиш ва дастани фокуслаш. Сўнгги икки усул унча катта аниқлик талаб қилмайдиган изланишлар учун ярайд.

Имплантацияланувчи ионларнинг етарли бир текис (нотекислиги $\leq 1\%$) тақсимланишини таъминлаш учун X ва Y йўналишлардаги электростатик сканлаш энг кўп қўлланилади. Бунда $0,002 \div 10 \text{ кГц}$ ораликдаги частотали аррасимон кучланиш генераторларидан фойдаланилади.

Тажрибалар ўтқазиш вақтида амалга ошириладиган технологик жараёнлар. Тажрибалар жараёнида ионли имплантация билан бир қаторда кўпгина технологик операциялар амалга оширилади: намуналарни вакуумда қиздириш, лазер нурлари билан ишлов бериш, намуна сиртига бегона атомларни ўтқазиш (чанглантириш), электронлар билан узоқ вақт “ўққа тутиш”, оксидлаш. Электрон тўп ва анализатор электродлари сиртларининг ифлосланишига йўл қўймаслик мақсадида бу операцияларни қурилманинг асосий камерасида эмас, балки қўшимча (ишлов бериш) камерасида бажариш мақсадга мувофиқдир.

1. Намуналарни тозалаш 10^{-6} Па дан юқори бўлган вакуумда юқори температурали қиздириш йўли билан, зарур бўлганда эса ионли ишлов бериш ва кейинги қиздириш йўли билан бажарилиши зарур.

$T \approx 1000 \text{ К}$ ҳароратгача қиздириш иситгичнинг вольфрам толасининг иссиқлик нурланиши ҳисобига, ундан юқори температурагача қиздириш эса (орқа томондан) электронлар оқимини йўналтириш билан амалга оширилади.

Намуналарни ионлар билан тозалаганда $8\text{мкА}\cdot\text{см}^{-2}$ ток зичлигига эга бўлган $0,5\div 1,5\text{кэВ}$ энергияли Ag^+ ионлар дас-тасидан фойдаланиш мумкин.

2. Ишқорий ва ишқорий-ер элементларининг атомла-рини намуна сиртига ўтқазиш (чанглангириш) ток ўтка-зилганда қизийдиган танталдан (ёки никелдан) ясалган қай-икча ёки найлар ёрдамида амалга оширилади. Танталдан ясалган қайикчага жойлаштирилган BaTi таблеткасидан (кичкина диск ($D\leq 10\text{мм}$) шаклидаги бўлакчасидан) Ва атомлари, капилляр туйнукли най кўринишидаги стандарт натрий ва цезий манбаларидан Na ва Cs атомлари олинади. Намуна сиртининг барий ва ишқорий металллар атомлари билан қопланиш тезлигини аниқлашда чангланиш жараёнида намуна чиқиш ишининг ўзгаришидан фойдаланиш мумкин. Бунда $e\phi(t) = e\phi_{\text{min}}$ бўлгандаги қалинлик $\theta\approx 1$ монокатлам деб қабул қилинади. Бундан ташқари чангланиш тезлигини қа-либшлаш (таққослаш, баҳолаш), ёки оже-электрон спект-роскопияси усуллари билан аниқлаш мумкин.

3. Сиртга кислородли ишлов бериш асбобда зарур босим ораликларидagi динамик мувозанат барқарорлашгунича чи-қарувчи камерага кислородни узлуксиз юборилиши билан амалга оширилади. Қиздириладиган шиша найчага жойлаш-тирилган KMnO_4 кукунни кислород манбаи бўлиб хизмат қилади. Газсимон кислород оқими суяқ кислородли қопқон орқали ўтади. Найчанинг исиш температурасини ўзгартириб, турли босимдаги кислородни олиш мумкин.

4. Ўрганилаётган намуналарнинг сиртига электронлар дастаси билан ишлов бериш кўп электродли электрон тўпдан фойдаланиб бажарилади. Тўп $10\div 100\text{мА}\cdot\text{см}^{-2}$ ораликдаги электрон токи зичлигини таъминлайди. Дастанинг нишон-даги диаметри $\sim 3\text{мм}$. ни ташкил қилади.

1. Лазерли ишлов бериш асосан импульсли лазер нур-лари билан амалга оширилади. Бу мақсадда кўпинча қаттиқ жисмли (Nd^{3+}) ЛТИ туридаги лазер қурилмасидан фойда-ланиш мумкин. Лазер нурлари нишон юзасига кварц ойна орқали туширилади (4.8-расмга қаранг).

4.15. МЕТАЛЛООРГАНИК БИРИКМАЛАР АСОСИДА ГАЗ ФАЗАЛИ ЭПИТАКСИЯ УСУЛИ

Бу усулнинг энг асосий афзаллиги у қатъий бир жинсли ва кескин чегарали бирикмаларнинг мукамал плёнкаларини олиш имконини беради. Бу усул аввалига Si ва Ge ларнинг эпитаксиал плёнкаларини ҳосил қилиш учун ишлатилган, аммо асосан $A^{III}B^V$ турдаги бирикмаларни ва уларнинг бошқа атомлар билан бирикиб, 3-4 компонентли плёнкаларини ҳосил қилишда ҳам ишлатилади. Масалан, GaAs плёнкасини олиш учун галлийнинг металлоорганик бирикмаси ва арсин (AsH_3) бугга айлантирилади ва улар асос юзасида ўзаро реакцияга киришади. 4.4-жадвалда $A^{III}B^V$ мисолида GaAs, InP ва уларнинг қаттиқ фазали кўп компонентли бирикмаларини олиш учун ишлатиладиган материаллар келтирилган.

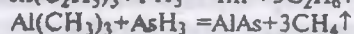
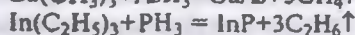
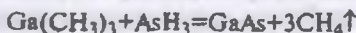
4.4 - жадвалдан $A^{III}B^V$ ҳосил қилишда унинг металл компоненти олишда органик бирикмалар (таркибида углерод бўлган бирикмалар, масалан: $Ga(CH_3)_3$, $In(C_2H_5)_3$, $Al(CH_3)_3$, ...) муҳим аҳамиятга эга эканлиги кўринади.

4.4—жадвал

GaAs ва InP ҳамда уларнинг бирикмаларини олиш учун ишлатиладиган материаллар

Ўстирилувчи яримўтказгич	Керакли материаллар		Асос
	III гуруҳ элементлари	V гуруҳ элементлари	
GaAs GaAlAs GaInAs GaInAsP InP	$Ga(CH_3)_3$ $Ga(CH_3)_3$, $Al(CH_3)_3$ $Ga(C_2H_5)_3$ $In(C_2H_5)_3$ $Ga(C_2H_5)_3$ $In(C_2H_5)_3$ $In(C_2H_5)_3$	AsH_3 AsH_3 AsH_3 AsH_3 , PH_3 PH_3	GaAs GaAs InP InP InP

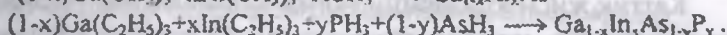
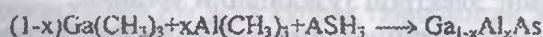
Масалан, GaAs, InP, AlAs яримўтказгичли бирикмаларни ҳосил қилиш учун қуйидаги реакциялардан фойдаланамиз:



Бу учала реакцияда ҳам икки компонентли тизим ҳосил қилинган, бунда металлоорганик бирикманинг ёки металло-водород бирикманинг қай бири қўп, қай бири озлиги катта аҳамиятга эга бўлмаслиги мумкин. Аммо металлоорганик бирикмаларнинг парциал босимини водородли бирикма босимидан 5-10 марта катта қилиб олинса, плёнкалар жуда силлиқ ва бир хил турда бўлади.

Аммо, 3 ёки 4 ва ундан ортиқ компонентли бирикмалар ҳосил қилишда юзага келиб реакцияга киридаётган моддаларнинг миқдори ҳосил бўлаётган бирикманинг таркибига, улардаги концентрацион нисбатларга жуда катта таъсир қилади.

Қуйида 3 ва 4 компонентли системалар ҳосил бўлиш реакцияларининг схематик кўриниши кўрсатилган:



Плёнкаларни олиш жараёнида уларни керакли аралашма билан легирлаш мумкин. Бунинг учун легирловчи материал бугта айлангирилади ва асосий компонентларнинг бугларига аралаштирилади.

Металлоорганик бирикмаларни газ фазали эпитаксияси усули билан олинадиган плёнкаларнинг асосий ишлатилиш соҳаларини кўриб ўтамиз:

1. GaAlAs/GaAs гетеротизими асосида квант ўрали лазерлар олишда;

2. Модуллаштириб легирланган GaAlAs/GaAs гетеротизимини олишда;

3. GaInAs/InP гетеротизими чегарасида икки ўлчамли электрон газини олишда;

4. 1,3 мкм тўлқин узунлиги кичик ток зичлигида ишлайдиган гетеролазерлар олишда;

5. GaInAs/InP нинг квант ўрали гетеротизимини олишда.

V БОБ

ҚАТТИҚ ЖИСМ ЮЗАЛАРИНИ ВА ЮПҚА ҚАТЛАМЛАРНИ ЎРГАНИШ УСУЛЛАРИ

5.1. УМУМИЙ МАЪЛУМОТЛАР

Юпқа қатламларни ўрганиш усуллари қаттиқ жисмларнинг юзаларини текшириш усуллари каби бўлади. Юпқа қатламларни ўрганиш деганда асосан қуйидагиларни аниқлашни тушунамиз:

- а) плёнканинг таркибини аниқлаш;
- б) плёнка юзасининг морфологиясини ва кристалл тузилишини ўрганиш;
- в) плёнканинг электрон тузилишини ўрганиш.

Қаттиқ жисм юзаларини (юпқа қатламларни) ўрганиш учун жуда кўп усуллар қўлланилади. Бу усуллар юзаларга электронлар юбориш, ионлар ёки нейтрал атомлар юбориш, фотонлар юбориш ва улар таъсирида юзадан учиб чиққан электронлар, фотонлар, ионлар, нейтрал атомлар оқимини таҳлил қилишга асосланган.

Хозирги пайтда электронларнинг учиб чиқишига асосланган усуллар кўп қўлланилади. Умуман олганда, қандай усул билан ҳосил қилинишидан қатъи назар қаттиқ жисмдан учиб чиққан электронлар асосан юзадан ва юзаости қатламлардан учиб чиқади. Жуда пастки қатламлардан, яъни ҳажмдан электронларнинг учиб чиқиш эҳтимоли жуда кам, чунки улар юзага ҳаракатланганда ўз энергиясини йўқотиб қўяди. Шунинг учун ҳам юпқа қатламларнинг ҳолатини аниқлаш учун электронлар эмиссиясига асосланган усуллар нисбатан кўпроқ қўлланилади.

Плёнканинг таркибини аниқлаш учун қўлланадиган асосий усуллар:

- а) ожэ-электрон спектроскопия (ОЭС);
- б) иккиламчи ионларнинг масспектроскопияси (ИИМС).

Бу усуллар плёнканинг элементар ва кимёвий таркиби тўғрисида зарур сифатий ва миқдорий маълумотлар беради.

Юзаларнинг морфологиясини ўрганиш учун қуйидаги усуллардан фойдаланиш мумкин:

а) растрли электрон микроскопия,

б) репликацион ва трансмиссион микроскопия.

Плёнкаларнинг юза ва юзаости қатламлари кристалл тузилишини ўрганиш усуллари:

а) кичик энергияли ($E \leq 200 + 300 \text{ эВ}$) электронларнинг дифракцияси (ДМЭ). Бу усул юзанинг 3-5 Å қалинлиги ҳақида маълумот беради;

б) катта энергияли ($E \geq 5 + 10 \text{ кэВ}$) электронларнинг дифракцияси (ДБЭ). Бу усул юзанинг 10-100 Å чуқурлиги ҳақида маълумот беради.

Плёнканинг электрон тузилишини ўрганиш усуллари:

а) фотоэлектрон спектроскопия (ФЭС):

- инфрақизил ва кўзга кўринадиган нурларнинг спектроскопияси (бу усул кўпроқ тақиқланган зонадаги акцептор ва донор сатҳлар тўғрисида информация беради);

- ультрабинафша нурларнинг электрон спектроскопияси (бу усул кўпроқ валент зонадаги электронларнинг тақсимотини ўрганишга хизмат қилади);

- рентген нурларнинг ФЭСи (бу усул негиз сатҳларнинг жойлашиши ва айрим ҳолларда валент зона тузилиши ҳақида маълумот беради);

Нурларнинг тахминий энергиялари:

инфрақизил нурлар - $E \approx 0,01 + 1,5 \text{ эВ}$

кўзга кўринадиган нурлар - $E \approx 1,5 + 4 \text{ эВ}$

ультрабинафша нурлар - $E \approx 4 + 50 \text{ эВ}$

рентген нурлар - $E \geq 50 \text{ эВ}$

б) эластик қайтган электронларнинг спектроскопияси (ЭҚЭС). Юзага тушган электронлар энергиясини йўқотмасдан орқага қайтса, *эластик қайтган* электронлар дейилади;

в) ноэластик қайтган электронларнинг спектроскопияси (НҚЭС). Бунда асосан характерли энергиясини йўқотган электронларнинг спектроскопияси ишлатилади. Энергиясининг бир қисмини йўқотиб чиққан электронлар *ноэластик қайтган* электронлар дейилади.

Юқоридаги усулларнинг энг асосийлари билан қисқача танишиб ўтамиз.

5.2. ОЖЕ-ЭЛЕКТРОНЛАР СПЕКТРОСКОПИЯСИ

ОЭС кейинги пайтларда қаттиқ жисм сиртларининг кимёвий таркибини таҳлил қилишда энг кўп тарқалган усуллардан бири бўлиб қолди. Бу усулнинг асосий афзалликлари қуйидагилардан иборат: қалинлиги $5+20\text{Å}$ бўлган юза қатламларни катта аниқлик билан жуда тез (бир неча минут) фурсатда таҳлил қила олади. Менделеев даврий жадвалидаги (H ва He дан бошқа) ҳамма элементлар тўғрисида миқдорий маълумот бера олиши билан бирга, атомлар орасидаги кимёвий боғланишларни ҳам аниқлаш имконини беради.

Ҳозирги пайтда ОЭС фақатгина илмий изланишлардагина эмас, балки стандарт таҳлил усули сифатида электрон асбобсозликда кенг қўлланилмоқда. У, айниқса, ярим ўтказгичлар технологиясида, металлшуносликда, катализда, минералогияда ва фойдали қазилмаларни таҳлил қилишда, кристалларни ўстиришда кенг қўлланилмоқда.

ОЭС билан бир пайтда юзаларни ионлар ёрдамида емириш усулини қўллаб жисмларнинг юза ости қатламларини (ҳажмини) ҳам таҳлил қилиш мумкин.

ОЭС усулининг яратилиши, принципи, турлари, имкониятлари ва олинган натижалар тўғрисида рус ва инглиз тилларида жуда кўп илмий монография ва мақолалар эълон қилинган. Биз бу ерда фақатгина оже-жараён, ЭОС усулининг принциплари ва қурилмалар тўғрисида қисқача тўхталиб ўтамыз.

5.2.1 ҚАТТИҚ ЖИСМНИНГ ЭЛЕКТРОН ТУЗИЛИШИ. ЭЛЕКТРОН САТХЛАРИНИНГ БЕЛГИЛАНИШИ

Қаттиқ жисм бир-бирига жуда яқин жойлашган $(1+3)\text{Å}$ атомлар тўпламидан иборат тизимдир. Бундай система атомларнинг ташқи, яъни валент электронларини умумлаштириш туфайли вужудга келади. Қаттиқ жисмда нечта атом бўлса (1см^3 да тахминан 10^{23} атом бўлади) шунча атомларнинг валент электронлари умумлашган бўлади. Паули принципига асосан битта электрон сатҳда (қаватда) 2 тадан ортиқ электронлар жойлаша олмайди. Шунинг учун валент электронлар бир-бирига жуда яқин жойлашган

сатҳларда иккитадан бўлиб жойлаша бошлайди. Ёнма-ён жойлашган сатҳлар орасидаги энергетик масофа $\sim 10^{-12}$ эВ атрофида бўлганлиги учун қаттиқ жисмнинг валент электронлари ўзаро бир-бирига ёпишиб турган сатҳлардан иборат бутун бир зонани ташкил қилади деб қараш мумкин. Масалан, Pd учун валент зона кенглиги ~ 6 эВ, Si учун эса ~ 12 эВ ни ташкил қилади.

Алоҳида атомларда валент электронлари ўтиши мумкин бўлган буш сатҳлар мавжуд. Қаттиқ жисмда бу сатҳлар қўшилиши натижасида ўтказувчанлик зонаси вужудга келади. Агар валент зонанинг юқоридаги ва ўтказувчанлик зонасининг пастки чегаралари бир-бирига жуда яқин жойлашган (ёки қўшилиб кетган) бўлса, бундай жисмлар ўтказгич бўлади. Агар бу атомлар орасида бирор E_g энергетик фарқ бўлса, бундай моддалар ярим ўтказгич (шартли равишда $E_g \leq 2,5$ эВ) ёки диэлектрик ($E_g \geq 2,5$ эВ) бўлади.

Атомлардаги валент электронлар жойлашган сатҳлардан пастки сатҳлардаги электронлар қаттиқ жисм таркибига кирганда ҳам шу атомга тегишли бўлиб қолаверади, яъни умумлашмайди. Уларни негиз ёки ўзақ электронлар деб атаймиз. Аммо уларнинг энергетик ҳолати бироз ўзгариши мумкин. Албатта бу ўзгариш валент зонага яқин сатҳларда кўпроқ бўлиб, ундан узоқлашган (яъни атом ядросига яқинлашган) сари камайиб боради.

Қаттиқ жисмларда сатҳлар атомлардаги каби ҳарфлар ёки сонлар билан белгиланади. Қаттиқ жисмда электронларнинг энергия бўйича тақсимланиши ва сатҳларнинг белгиланиши (германий мисолида) 5.1-расмда келтирилган. Энди бу расмга изоҳ берамиз.

1. Ядрога энг яқин жойлашган сатҳ K ҳарфи ёки 1 рақами билан белгиланади. Бу сатҳда 2 тагача электрон жойлашиши мумкин. Уни $1S_{1/2}$ деб белгилаш мумкин.

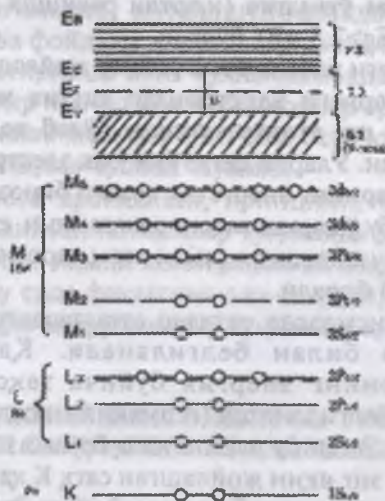
2. K дан кейинги сатҳлар тўпламини L ёки 2 деб белгиланади. Бу тўпламдаги 4 та сатҳда 8 тагача электрон жойлашади. Бу сатҳлар L_1 ёки ($2s_{1/2}$), L_2 ($2p_{1/2}$), L_3 ($2p_{3/2}$) деб белгиланади. L_3 яъни ($2p_{3/2}$) сатҳ бир-бирига жуда яқин жойлашган 2 та сатҳдан иборат бўлганлиги учун унда 4 тагача электрон бўлади.

3. Кейинги бир неча сатҳлар тўплами M ёки 3 деб белгиланади. Бу тўпламда 9 та сатҳ бўлиб, уларда 18 тагача элект-

ронлар жойлашиши мумкин. Бу сатҳлардаги белгилашлар: $M_1 - 3s_{1/2}$ (2 та электрон), $M_{1,1} - p_{1/2}$ (2 та), $M_2 - 3p_{1/2}$ (4 та), $M_3 - 3d_{3/2}$ (4 та), $M_4 - 3d_{5/2}$ (6 та).

4. M дан кейинги сатҳлар тўплами N ёки 4 деб белгиланади. Бу тўпланда 32 тагача электрон бўлиши мумкин. Бизнинг мисолимиз (5.1-расм) шартли равишда Ge га тўғри келгани учун бу сатҳлар тўпламида 4 та электрон бўлади. Бу электронлар умумлашиб валент зонани ташкил қилади.

Сатҳларни ҳисобга олганда Ge атоми учун электрон конфигурацияларни қуйидагича ёзиш мумкин: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^2$. s , p ва d ларнинг даража кўрсаткичлари шу сатҳлардаги электронларнинг сонига тенг бўлади. Ge атоми учун $4s^2 4p^2$ валент электронларга тўғри келади. Каттиқ жисмда бу электронлар валент зонани ташкил қилгани учун V деб белгиланади. Бошқа белгилашлар атомдагидан фарқ қилмайди.



5.1-расм. Каттиқ жисмда электрон зоналар ва сатҳларнинг белгиланиши.

5.2.2. ОЖЕ - ЖАРАЁН

Энергияси етарли даражада катта бўлган бирламчи электрон жисм атомларининг ички сатҳларининг биттасидан, масалан, K дан электрон уриб чиқариши мумкин. Бу бўли қолган жой тезда (10^{-12} - 10^{-13} с ичида) юқори сатҳлардан биридаги (масалан, L_1 даги) электроннинг ўтиши билан тўлади. Бу ўтиш

натихасида $E_x - E_L$ энергия ажралиб чиқади. Бу энергия характерли рентген нурланиш ҳолида ажралиши мумкин ёки бошқа (масалан, L_1) сатҳдаги электронга берилиши мумкин. Агар айтилган энергия электронга берилиб, уни вакуумга чиқарса, кўриб ўтилган жараён **оже - жараён**, учиб чиққан электрон эса **оже-электрон** дейилади. Бу ўтишлар KL, L_2 каби белгиланади. Демак оже-жараён учта босқичдан иборат бўлар экан:

1) ички сатҳларнинг бирида вакант(бўш) жой ҳосил бўлади;

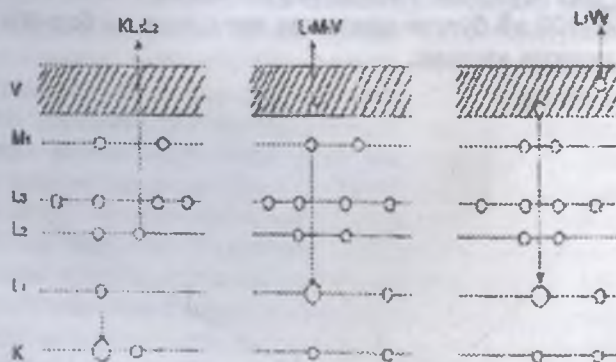
2) юқоридаги сатҳлардан биридаги (ёки валент зонадаги) электрон билан вакант жой тўлдирилади;

3) ажралиб чиққан энергия юқори сатҳлардаги ёки валент зонадаги электронлардан бирига берилиб, уни вакуумга чиқаради. (Ажралиб чиққан энергия албатта тўлдирувчи электрон жойлашган сатҳдаги ёки ундан юқоридаги сатҳлардаги электронга берилади.)

5.2-расмда оже-ўтишларга айрим мисоллар келтирилган. Оже-электронларнинг энергияси $E_{\text{оже}}$ умумий ҳолда тахминан қуйидагига тенг бўлади:

$$E_{\text{оже}} = E_w - E_x - E_y,$$

бунда, w — вакансия ҳосил бўлган сатҳ, x — вакансияни тўлдириш учун электрон берган сатҳ, y — оже-электрон учиб чиққан сатҳ.



5.2-расм. Оже ўтишлар. KL, L_2 -K сатҳда вакансия ҳосил бўлади, L_2 даги электрон уни тўлдиради, L_2 дан оже-электрон учиб чиқади; LM, V -Lдаги вакансия Mдан тўлдирилади. Vдан оже-электрон чиқади, LV, V -Lдаги вакансия Vдан тўлдирилади ва Vдан оже-электрон чиқади.

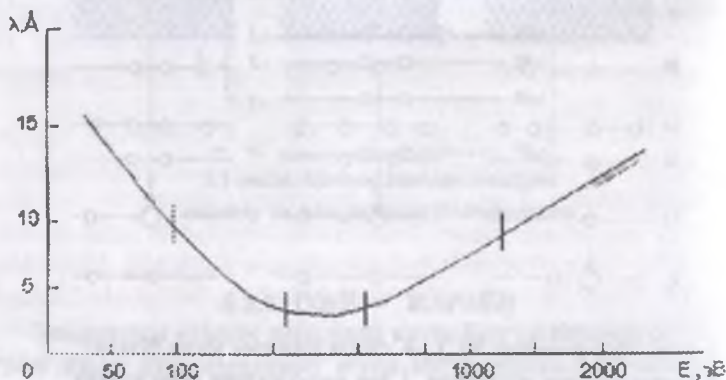
Оже-электронларнинг энергиясини аниқроқ ҳисоблаш учун қуйидаги эмпирик формуладан фойдаланиш мумкин:

$$E_{\text{оже}} = E_{\text{о}}(z) - E_{\text{н}}(z) - E_{\text{н}}(z) - 1/2(E_{\text{н}}(z+1) - E_{\text{н}}(z) + E_{\text{н}}(z+1) - E_{\text{н}}(z)) - \phi, \quad (5.2)$$

Бу ерда, z - текширилаётган элементнинг тартиб номери, ϕ - оже-электронларни қабул қилиб олаётган электрод (анализатор)нинг чиқиш иши.

Демак, оже-жараён учун камида 2 та электрон сатҳ бўлиши керак экан. Шунинг учун ҳам H ва He атомлари учун оже-ўтиш руй бермайди. Элементнинг тартиб номери ошиб борган сари унда руй берадиган оже-ўтишларнинг сони ҳам ортиб боради, яъни ҳар хил энергияли оже-электронлар ҳосил бўлади. Ҳар қандай элементдаги бир неча оже-ўтишлар энергияси, бошқа элементдаги оже-ўтишларнинг энергияси билан ҳеч қачон бир хил бўлмайди. Яъни оже-электронларнинг энергиясини таҳлил қилиб ҳар қандай элементни аниқлаш мумкин.

Оже-электронларнинг чиқиш чуқурлиги λ иккиламчи электронларнинг эркин йўл узунлигига тенг бўлиб, уларнинг энергиясига боғлиқ бўлади. Бу чуқурлик элементнинг турига унчалик боғлиқ эмаслиги тажрибада аниқланган. 5.3-расмда барча элементлар учун универсал бўлган оже-электронлар энергияси ва чиқиш чуқурлиги орасидаги боғланиш $E_{\text{оже}}(\lambda)$ берилган. Расмдан кўринадики λ нинг қиймати $E_{\text{оже}}$ - 50 - 100 эВ бўлган ораликда энг кичик ва бор-йўғи 5-6 Ани ташкил қилади.



5.3-расм. Оже-электронлар чиқиш чуқурлиги ва энергияси орасидаги боғланишини ифодаловчи эгри чизик.

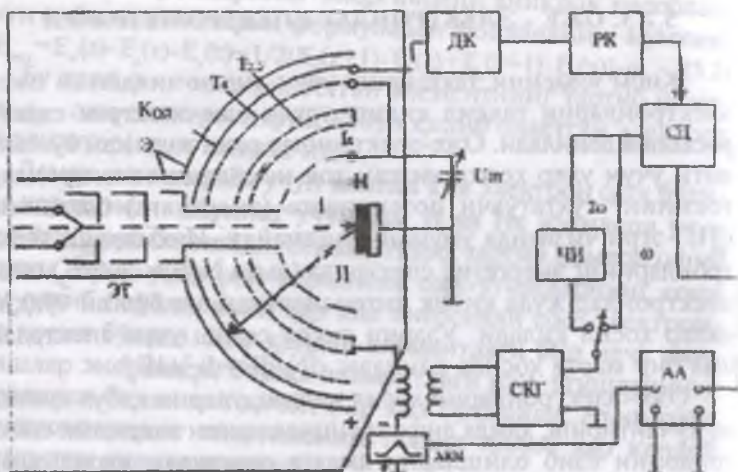
5.2.3. ОЖЕ - ЭЛЕКТРОНЛАР СПЕКТРОМЕТРЛАРИ

Жисм юзасини текшириш учун ундан чиқаётган оже-электронларни таҳлил қилиш усули оже-электрон спектроскопия дейилади. Оже-электронлар сони жуда кам бўлганлиги учун улар ҳосил қилган ток иккиламчи электронлар токининг тўхтатувчи потенциалга (энергияга) боғланиш $i_2(U)$ эгри чизигида умуман сезилмайди. Иккиламчи электронларнинг энергетик спектрида (яъни $N(E)=di_2/dE_2$) оже-электронлар жуда кичик интенсивликка эга бўлган чуққичалар ҳосил қилади. Уларни яққол сезиш учун спектрдан яна бир марта ҳосил олинади: $dN/dE=di_2^2/dE_2^2$.

Оже-электронларни ҳосил қилиш, уларни қабул қилиш ва кучайтириш, ҳамда дифференциалланган энергетик спектрларини ёзиб олишларни амалга оширувчи қурилмалар оже-электрон спектрометрлар деб аталади. Анализаторининг (таҳлиллагичнинг) тузилиши ва ишлаш принципига қараб спектрометрларнинг турлари ҳар хил бўлади. Биз шулардан энг кўп тарқалган икки турини кўриб ўтамиз. Бошқа турдаги анализаторлар ҳам моҳият жиҳатдан булардан тубдан фарқ қилмайди.

1. Тўхтатувчи (тормозловчи) майдонли анализаторга эга бўлган спектрометрлар. Энг оддий кўринишдаги ОЭС қурилмаси куйидагилардан иборат бўлади: юқори вакуумли ($P=10^{-6}$ Па) камера, электрон тўп, нишон (текширилаётган жисм) ва электрон анализатор (спектрометр). ОЭС юзанинг ҳолатига катта даражада боғлиқ бўлганлиги учун текширишлар ўта юқори вакуум шароитида олиб борилиши керак. Электрон тўп юқори даражада фокусланган (нишондаги ўлчами 100-150 мкм), интенсивлиги керакли даражада ($i_1=10^3+10^5$ мкА/см²) катта бўлган бирламчи электронлар оқимини ҳосил қилади. Кўпинча бу электронлар энергияси $E_1=1-5$ кэВ оралигида бўлади. Анализатор эса иккиламчи электронларни энергия бўйича тақсимланишини таҳлил қилишга хизмат қилади.

Тўхтатувчи майдонли анализатор сферик (ярим сферик) кўринишдаги тўрлар (2 тадан 4 тагача) ва коллектордан иборат бўлади. Тўртта тўрга эга бўлган анализаторли спектрометрнинг чизмаси 5.4-расмда келтирилган. Бу ерда, T_1 тўр нишондан учиб чиқаётган иккиламчи электронларнинг майдонсиз фазода ҳаракатланишини таъминлашга хизмат қилади.



5.4-расм. Тўхтатувчи майдонли анализаторга эга бўлган спектрометр: ЭТ — электрон тўп, Э — экран, Кол. — коллектор, T_1+T_2 — тўрлар, Н — нишон, ДК ва РК — дастлабки ва резонанс кучайтиргич, СД — синхрон детектор, ЧИ — частотани иккилантитувчи, СКГ — синусоидал кучланишлар генератори, АКМ — аррессимон кучланиш манбаи, АА — автоматик ёзувчи асбоб.

Бунинг учун нишон билан тўр T_1 тахминан бир хил потенциалга эга бўлиши керак. (Улар орасидаги контакт потенциаллар фарқи $U_{нт}$ манба ёрдамида компенсация қилинади.) Шунинг учун иккиламчи электронлар T_1 гача ўз йўналишларини ўзгартирмай етиб келади. Иккиламчи электронларни тўхтатувчи потенциал (майдон) T_1 ва T_2 оралиғида берилади. Тўхтатувчи U_1 потенциалнинг тўр катакчалари ўртасида ҳам бир хилда қолишини таъминлаш учун T_2 га жуда яқин қилиб T_2 тўр жойлаштирилади. Энергияси тўхтатувчи майдон энергиясидан катта бўлган иккиламчи электронлар коллекторга тушади. Коллектор ва T_{23} тўрлар орасидаги сифимни кескин камайтириш учун улар орасига T_2 тўр жойлаштирилади. Тўхтатувчи потенциални секин-аста 0 дан U_1 гача монотон ўзгартира бориб $i_2(U_1)$, яъни $i_2(E_2)$ боғланиш эгри чизигини ёзиш мумкин. Бу боғланишнинг ҳосиласини олиш учун T_{23} тўрга U_1 билан биргаликда ω частотали озгина кучланиш ($\Delta U = K \sin \omega t$) берилади. Бу ерда $K=0,5+3B$ атрофида бўлади. Натижада коллекторга ўтаётган иккиламчи ток ω частота

билан модуляцияланган (тебранган) бўлади, яъни уни қуйидагича ёзиш мумкин: $I_2(U, +DU)$. Бу ифодани Тейлор қаторига ёйиб чиқамиз:

$$I_2(U_2 + K \sin \alpha x) = I_{20}(U) + I_2' K \sin \alpha x + I_2'' K^2 \frac{\sin^2 \alpha x}{2} + \dots + \quad (5.3)$$

Маълум алмаштиришлардан кейин (5.3) ни қуйидагича ёзиш мумкин:

$$I_2(U_2 + K \sin \alpha x) = I_{20}(U) + (I_2' K + \frac{I_2''}{2} K^2 + \dots) \sin \alpha x - (\frac{I_2''}{2} K^2 + \frac{I_2'''}{6} K^3 + \dots) \cos \alpha x$$

Бу ерда, $I_{20}(U)$ — вақтта боғлиқ бўлмаган ҳамма ҳадларни ўз ичига олади. $K \ll U$ бўлганлиги учун K^3 ва ундан юқори даражали ҳадларни ташлаб юборсак:

$$I_2(U + K \sin \alpha x) = I_{20}(U) + I_2' (K \sin \alpha x) - \frac{I_2''}{4} K^2 \cos 2\alpha x \quad (5.4)$$

Қабул қилувчи системадаги дастлабки ва резонанс қучайтиргичларни ҳамда синхрон детекторни ω частотада ишлайдиган қилиб созланса, ёзиб олувчи қурилмада $N(E)$ қайд қилинади. $N(E)$ спектр иккиламчи электронларнинг биринчи гармоникасининг амплитудаси $I_2' K$ га пропорционал бўлади. Қайд қилувчи ситемани 2ω частотага созлаб $I_2'' K^2$ амплитудага пропорционал бўлган $N'(E) = dN/dE$, сигналларни ёзиб олиш мумкин.

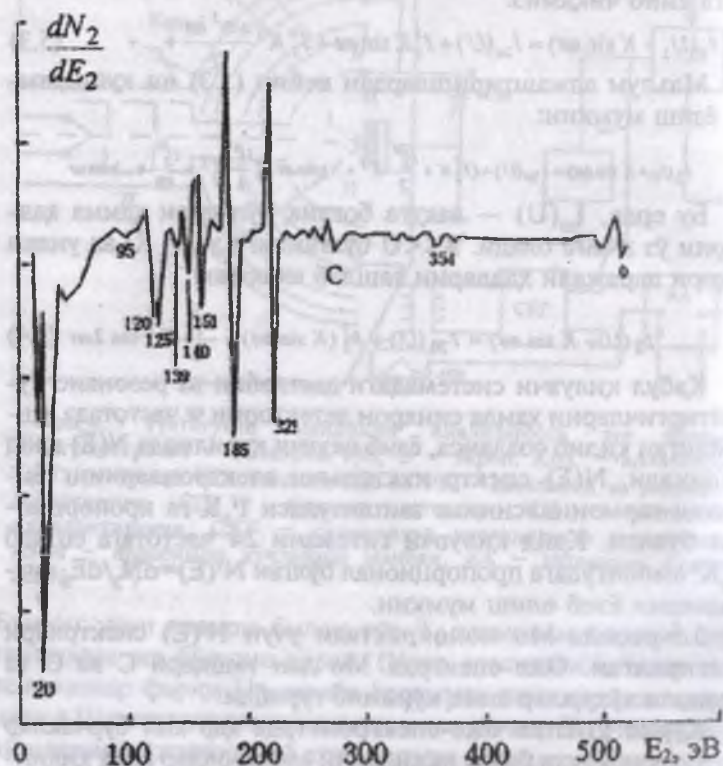
5.5-расмда Мо монокристали учун $N(E)$ спектрлари келтирилган. Оже-спектрда Мо дан ташқари С ва О га тегишли чўққилар аниқ кўриниб турибди.

Кўриб ўтилган оже-спектрометрда ҳар хил бурчаклар остида чиқаётган барча иккиламчи электронлар қайд қилинганлиги учун улар ҳосил қилган ток катта бўлади. Аммо бунда керакли оже-сигналлар билан биргаликда бошқа сигналлар (шовқин) ҳам коллекторга етиб келади ва қайд қилинади. Энг яхши ҳоллардагина сигналнинг шовқинга нисбатини 10^2 га етказиш мумкин.

Бундай анализаторларнинг ажрата олиш қobiliяти $\Delta E \sim 0,5-1\%$ атрофида бўлади. ΔE - ажратиш лозим бўлган икки ёнма-ён чўққи орасидаги энергетик оралиқ.

2. Цилиндрик кўзгул анализаторга эга бўлган спектрометрлар. Бундай анализатор битта марказий ўққа эга бўлган иккита (ички ва ташқи) цилиндрдан иборат бўлади. Ички цилиндр ичига оптик ўқи анализаторларнинг марказий ўқи билан устма-уст тушадиган қилиб электрон тўп жойлашти-

рилади. Анализатор иккита фокусга эга бўлиб, улардан би-
рига нишон, иккинчисига эса иккиламчи электронларни



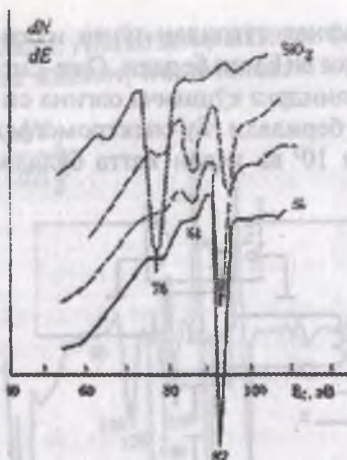
5.5-расм. Молибден монокристаллининг оже-спектри.

қабул қилувчи асбоб (электрон кучайтиргич - ЭК) ўрнати-
лади (5.6-расм). Нишондан эмиттерланган электронлар ра-
диал йўналишлар бўйлаб ҳаракатланиб, ички цилиндр-даги
ҳалқасимон тирқиш орқали ўта бошлайди. Ташқи цилиндрга
берилган манфий потенциал маълум энергияли электрон-
ларни орқага қайтариб, иккинчи ҳалқасимон тирқиш орқа-
ли ЭК га йўналтиради. Таҳлил қилинаётган электронлар-
нинг энергияси ташқи цилиндр потенциалига пропорцио-
нал бўлади. Майдоннинг эквипотенциаллигини сақлаш учун
ҳалқасимон тирқишларга тўрлар қопланади. Электронлар
ички цилиндр орқали ЭК га тушмаслиги учун электронлар
тўпининг (ЭТ) орқа томонига тўсиқ қўйилади.

Бу усулда ёзиб олинган сигнал туғридан-туғри иккиламчи электронларнинг спектри $N(E)$ ни беради. Оже-сигналларни ёзиш учун ташқи цилиндрга қўшимча озгина синусоида кучланиш $\Delta U = K \sin \omega t$ бериледи. Бу спектрометрда сигналнинг шовқинга нисбати 10^1 ва ундан катта бўлади.

5.6-расм. Цилиндрик кутгули анализатор спектрометри: ЭК-электрон кучайтиргич. ЭТ-электронлар туپи, Т-тусиқ, 1 на 2-ички ва ташқи цилиндрлар.

5.3 СИФАТ ТАҲЛИЛИ. КИМӨВІЙ СИЛЖИШЛАР



5.7-расм. Кремнийнинг оксидланиш жараёнида $L_{2,3}VV$ – оже-чўққининг ўзгариши.

мумкин. Аммо уларнинг концентрацияларини аниқлаганимизда тескари-си бўлиши ҳам мумкин.

Жисм юзасидаги атом-лар ўзаро кимёвий бирик-малар ҳосил қилса, оже-чўққиларнинг энергетик ўрни ва шакли ўзгариши мумкин. Бу ўзгаришлар асо-сан XVV туридаги оже-чўққиларда сезиларли бўлади, шунинг учун улар атомларнинг кимёвий ҳолатини аниқлаш учун кенг қўлланилади. 5.7-рас-мда оксидланиш жараёни-да кремнийнинг $L_{2,3}VV$ чўққисининг ўзгариши

кўрсатилган. Оксидланиш давомида янги чўққининг ҳосил бўлиши, унинг силжиши ва шаклининг ўзгаришига қараб янги бирикма ҳосил бўлаётганлигини яққол билиш мум-кин. Юқори оксидланиш рўй берганда кремнийга тегишли $L_{2,3}VV$ чўққи бутунлай йўқолади. Бу ҳолда SiO_2 нинг плён-каси ҳосил бўлди деб (адабиётлардаги маълумотларга су-янган ҳолда) айтиш мумкин. Аммо бу ерда ҳам махсус усул-лар қўлламай туриб юзадаги атомларнинг концентрация-ларини ва кимёвий бирикманинг типини тўғри аниқлаш мумкин эмас.

Сифат таҳлили электрон техниканинг ҳамма соҳаларида (жумладан микроэлектроникада) жуда кўп қўлланилади. Чунки кўп ҳолларда жисмда қандай чет элементлар бор эканлигини, улар кимёвий бирикма ҳосил қиладими- йўқми эканлигини аниқлаш етарли бўлади.

5.4 МИҚДОРИЙ ТАҲЛИЛ

ОЭСни амалий қўллашда кўпгина ҳолларда ярим миқдо-рий таҳлил билан чегараланиш мумкин. Аммо янги техноло-гияни амалга оширишда, ҳамда янги ҳосил қилинаётган ма-

териаларнинг кимёвий таркибини ўрганишни юқори аниқликдаги миқдорий маълумотлар зарур бўлади.

Миқдорий таҳлил қилишда текшириладиган элементнинг оже-электронлар токи билан унинг концентрацияси орасидаги боғланишни аниқлаш зарур бўлади. Оже-электроннинг токи сифатида оже-чўққининг амплитудаси (интенсивлиги) ёки чўққи ости юзаси олинishi мумкин. Бу боғлиқликни бирор γ элементнинг WXY оже-жараёни учун қуйидаги соддалаштирилган кўринишда ёзиш мумкин:

$$I_{\gamma}(wxy) = I_1 T N_{\gamma} \gamma(wxy) \sigma_{\gamma}(E_1, E_w) \lambda (1 + R_B). \quad (5.5)$$

Бу ерда, R_B — электронларнинг орқага қайтиш коэффиценти, I_1 — бирламчи электронларнинг токи, T — анализаторнинг ўтказиш қobiliяти, N_{γ} — γ -элементнинг атом зичлиги, $\gamma(wxy)$ — WXY -оже-ўтишнинг эҳтимолиги, λ -оже-электронларнинг чиқиш чуқурлиги, E_1 — бирламчи электронларнинг энергияси, $\sigma_{\gamma}(E_1, E_w)$ — ички W сатҳнинг ионлашиш кўндаланг кесими.

Биз миқдорий таҳлилнинг икки хил усулини қисқача кўриб ўтамиз.

а) Ташқи эталонлар усули

Бу усулда текшириладиган жисмнинг оже-спектрлари таркибида аниқ миқдорли бизни қизиқтираётган элемент атомлари бўлган эталон намунасининг оже-спектрлари билан таққосланади. γ элементнинг эталондаги N_{γ}^T концентрацияси маълум бўлса, унинг текшириладиган жисмдаги номаълум N_{γ}^I концентрациясини қуйидаги формуладан топиш мумкин:

$$\frac{N_{\gamma}^I}{N_{\gamma}^T} = \frac{I_{\gamma}^I \lambda^I}{I_{\gamma}^T \lambda^T} \left(\frac{1 + R_B^T}{1 + R_B^I} \right) \quad (5.6)$$

Бу усулнинг асосий афзаллиги шундаки. Бунда ионизация кўндаланг кесими ва оже-электронларнинг чиқиш эҳтимолини билиш шарт эмас. Бундан ташқари эталон ва текшириладиган жисмнинг таркиблари катта фарқ қилмаса $\lambda^I \approx \lambda^T$ ва $R_B^I \approx R_B^T$ деб олиш мумкин. Бу ҳолда концентрацияни фақатгина оже-чўққиларнинг интенсивликлари орқали аниқлаш мумкин.

Аммо керакли эталонларга ҳар доим эга бўлиш жуда қийин. Шунинг учун бу усул кам қўлланилади.

б) Элементларнинг сезгирлик коэффиценти усули

Элементларнинг сезгирлик коэффициенти усулининг аниқлик даражаси кичикроқ бўлса ҳам, аҳамияти жуда каттадир. Чунки бу усул универсал бўлиб, ҳар қандай элементнинг концентрациясини ҳеч қандай эталон қўлланмасдан аниқлаш имконини беради. Бу ерда ҳар бир элемент маълум бир сезгирлик коэффициентиға эға деб қабул қилинади. Элементларнинг сезгирлик коэффициенти бирорта ўта тоза элементға нисбатан олинган. Бундай элемент сифатида кўпинча кумуш элементи олинади.

Бирор жисм таркибидаги X - элементнинг номаълум C_x миқдори (концентрацияси) атом % ларда қуйидаги формуладан топилади:

$$C_x = \frac{I_x/S_x}{\sum (I/S)} \quad (5.7)$$

бу ерда, I_x — x элемент оже-чўққисининг баландлиги (максимум ва минимум орасидаги масофа), S_x — x элементнинг сезгирлик коэффициенти, $\sum (I/S)$ — жисмдаги барча элементларнинг I/S нисбатларининг йиғиндиси.

Ҳар хил элементлар учун S нинг қийматини махсус жалвал — каталогдан олиш мумкин. Аммо аниқликни ошириш учун элементларнинг сезгирлик коэффициентини матрица тузатмаларини ҳисобға олган ҳолда ҳисоблаш мумкин.

$$S = S_r \cdot \alpha, \quad (5.8)$$

S_r — S нинг жадвалдан аниқланган қиймати:
 α — матрица тузатмаси:

$$\alpha = \frac{\lambda_i^j \cdot N_i^j (1 + r_i^j)}{\lambda_i^i \cdot N_i^i (1 + r_i^i)} \quad (5.9)$$

Бу ерда, λ_i^j — j элементлардан ташкил топган матрица таркибидаги i элемент оже-электронларининг чиқиш чуқурлиги, λ_i^i — бир хил i элементлардан ташкил топган матрицадан i оже-электронларининг чиқиш чуқурлиги, N — атом зичлиги, r — орқаға қайтиш коэффициенти.

N , λ ва r параметрлар махсус формулалар ёрдамида ҳисобланади.

ОЭС усули ёрдамида чуқурлик бўйича маълумот олиш учун у билан биргаликда юзаларни ионлар билан емириш усулидан фойдаланилади. Бунда аввалиға юза едирилиш қалинлигининг вақтға боғлиқлиги аниқлаб олинади. Вақтнинг маълум бир қийматларида едирилиш тўхтатилиб, ОЭС

ёрдамида жисмнинг шу ердаги таркиби аниқланади. Умуман таркибни аниқлаш ионли едириш билан бир вақтда ҳам олиб борилиши мумкин.

5.5 ИККИЛАМЧИ ИОНЛАРНИНГ МАСС-СПЕКТРОСКОПИЯСИ (ИИМС)

Илгари кўриб ўтганимиздек, қаттиқ жисм юзасига ионлар келиб урилганда ундан тўрт хил турдаги зарралар учиб чиқиши мумкин. Шулардан ионлар ва нейтрал атом (молекула)ларнинг учиб чиқиши юзанинг емирилишига олиб келади. Бу зарраларни масса бўйича таҳлил қилиш жисмнинг юза таркиби ҳақида тўғридан-тўғри маълумот беради. Иккиламчи ионларни таҳлил қилиш нисбатан осон бўлгани учун ҳозирги пайтда ИИМС усули жуда кўп қўлланилади. Бу усулнинг сезгирлиги жуда юқори бўлиб, кўпгина элементлар учун $10^{-4}\%$ ни ташкил қилади. ОЭС дан фарқли равишда бу усул ёрдамида Н ва Не ни ҳам аниқлаш мумкин. Аммо учиб чиқаётган ионларнинг миқдори жуда кўп катталикларга боғлиқ бўлганлиги учун бу усул ёрдамида миқдорий таҳлил кўп қийинчиликларга олиб келади. Бундан ташқари агар жисм юзасининг таркиби жуда ҳам мураккаб бўлиб унда ҳар хил бирикмалар мавжуд бўлса, уларни масса бўйича ажратиш (айниқса катта массаларда) қийинлашади. Лекин махсус усуллар қўллаш орқали таҳлилни катта аниқликда олиб бориш мумкин.

Юзанинг едирилиш катталиги унга тушаётган бирламчи ионларнинг энергиясига, массасига ва тушиш бурчагига боғлиқ бўлади. ИИМС усулида кўпинча O_2^+ ва Ar^+ ионлари ишлатилади. Бунда уларнинг энергияси $\sim 1-20$ кэВ атрофида бўлади.

Юзаларни таҳлил қилишда тушаётган ионларнинг интенсивлигини кичик, тушиш бурчагини (нормалга нисбатан) эса каттароқ ($80-85^\circ$) қилиб олишга ҳаракат қилинади. Бунда юзанинг едирилиши анча камаяди. Ҳажмий таҳлил қилиш учун эса юзанинг едирилиш тезлиги оширилади. Умуман едирилиш тезлигини жуда катта: 10^{-5} дан 10^3 А/с гача оралиқда ўзгартириш мумкин.

5.5.1. ИОНЛАР ТАЪСИРИДА ЕМИРИШ

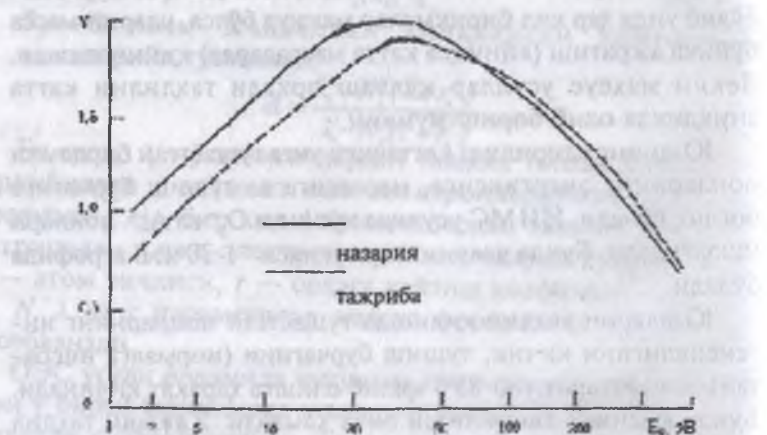
Қаттиқ жисм юзалари ионлар билан тўпга тугилганда у емирилади. Емирилиш тезлиги биринчи галда юзадаги моддаларнинг учиб чиқиш катталиги Y га боғлиқ бўлади.

$$Y = \frac{\text{учиб чиқаётган атомларнинг ўртача миқдори}}{\text{тушаётган атомлар миқдори}}$$

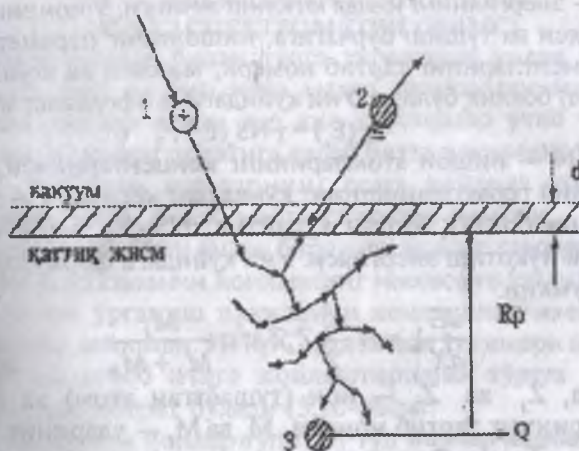
Моддаларнинг учиб чиқиш катталиги материалнинг тузилиши ва таркибига ҳамда ионлар дастасининг параметрига боғлиқ бўлади. Y нинг қиймати жуда катта диапазонда ўзгариши мумкин. Аммо чуқурлик бўйича атомларнинг тақсимланишини аниқлашда асосан энергияси бир неча килоэлектронвольт бўлган ўртача массали ионлар ишлатилади. Бундай ҳол учун Y нинг қиймати 0,5 дан 20 гача бўлади.

5.8-расмда кремнийни аргон билан тўпга тугилган ҳол учун $Y(E_0)$ боғланиш эгри чизиги келтирилган. Бунда назарий ва тажрибавий натижалар бир-бирига яхши мос келади. Назарий ҳисобларда ионлар энергиясини ядровий тўқнашувларда йўқотади ва бу йўқотиш жуда кўп атомлар иштирок этадиган каскадли тўқнашувлар учун сарф бўлади деб фараз қилинган (5.9-расм).

Ҳозирги пайтда жуда кўп ион ва қаттиқ жисм комбинациялари учун Y нинг қиймати аниқланган.



5.8-расм. Кремний атомлари учиб чиқиш катталигининг Ar^+ ионларининг энергиясига боғлиқлиги.



5.9-расм. Ионларнинг каттиқ жисм билан тўқнашувининг шаклий тасвири: 1-бирламчи ион; 2-учиб чиқаётган зарра (ион ёки нейтрал атом); 3-имплантация қилинган атом (жисмда жойлашиб қолган) ион, R_p -бирламчи ионларнинг кириш чуқурлиги, d -жисм моддаларининг учиб чиқиш чуқурлиги.

Тўқнашув жараёнида жисм атомлари юзанинг энг юқори қатламларидан учиб чиқади. Юзага келиб урилган ион ўз энергиясини жисм атомларига беради. Бу атомлар ўз навбатида бошқа атомлар билан тўқнашиб уларга ўз энергиясини беради. Натижада юзага яқин жойлашган атомлар старли даражада энергияга эга бўлса, ундан ажралиб чиқади. Тушаётган ион тўқнашувлар жараёнида энергиясининг бир қисмини йўқотиб вакуумга қайтиб чиқиши ёки каттиқ жисм ичида қолиб кетиши мумкин. Бирламчи ионлар (атомлар)нинг жисм ичида жойлашиб қолиши легирлаиши ёки имплантация дейилади.

Едирилиш катталиги жойидан қўзғатилган ва учиб чиқаётган атомларнинг сонига пропорционал бўлади. Чизиқли каскад учун қўзғатилган ва учиб чиқаётган атомлар миқдори бирлик қатламдаги ядровий энергия йўқотишга пропорционал бўлади. У ҳолда ионларнинг тик тушаётган ҳоли учун моддаларнинг учиб чиқиши:

$$Y = \Lambda F_p(E_0) \quad (5.10)$$

бўлади. Бу ерда, Λ — модданинг ҳамма хусусиятларини, шу жумладан сиртий боғланиш энергиясини ҳам ифода этади,

$F_0(E_0)$ — энергиянинг юзада ютилиш зичлиги. У ионнинг тури, энергияси ва тушиш бурчагига, нишоннинг параметрларига (элементларнинг тартиб номери, массаси ва концентрациясига) боғлиқ бўлади. Уни қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$F_0(E_0) = \gamma N S_n(E_0). \quad (5.11)$$

бунда, N — нишон атомларининг концентрацияси, $S_n(E_0)$ — ядровий тормозланишнинг қўндаланг кесими, γ — тушиш бурчагига боғлиқ бўлган қўпайтма, $NS_n(E) = (dE/dx)_n$ — ядровий йўқотиш энергияси. Уни қуйидаги формуладан топиш мумкин:

$$\frac{dE}{dx}_n = N \frac{\pi^2}{2} Z_1 Z_2 e^2 a \frac{M_1}{M_1 + M_2} \quad (5.12)$$

бу ерда, Z_1 ва Z_2 — ион (тушаётган атом) ва нишон атомларининг тартиб номери, M_1 ва M_2 — уларнинг массалари, a — Томас-Фермининг экранлаш (ҳимоя) радиуси.

(5.10) - формуладаги Λ нинг катталигини энг содда ҳолда қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$\Lambda = \frac{0.042}{NU_n} \quad (E/\text{эВ}).$$

Бу ерда, N — жисм атомларининг E^{-1} да ифодаланган концентрацияси, U_0 — сиртнинг боғланиш энергияси (эВ). U_0 ни сублимация температураси (тахминан буғланиш энергиясига тенг) орқали аниқлаш мумкин. Умуман U_0 нинг қиймати 2 дан 4 эВ гача бўлади.

Буларни ҳисобга олиб (5.10) формула ёрдамида Y ни аниқлаш мумкин. Бунда γ нинг қиймати M_2/M_1 нисбатга ва тушиш бурчагига боғлиқ эканлигини ва у 0,2 дан 0,4 гача ўзгаришини ҳисобга олиш керак. Жисм юзасига тик тушаётган ўртача массали ионлар учун γ нинг ўртача қиймати ~0,25.

Мисли Ag ионлари билан тўпга тутилаётган ҳол учун Y ни ҳисоблаймиз. 5.12 формуладан фойдаланиб NS_n ни топамиз:

$NS_n = 124 \text{ эВ/Е}$, Cu учун: $U_0 = 3 \text{ эВ}$, атомлар зичлиги $N = 8,5 \cdot 10^{23}/\text{Е}^3$,

у ҳолда
$$Y = \frac{0.042 \cdot 0.25 \cdot 1.24}{8.45 \cdot 10^{-3}} = 5,1.$$

Бу натижа тажрибада олинган қийматга жуда яқин. Тажрибада $Y = 6$.

5.5.2. ИККИЛАМЧИ ИОНЛАРНИНГ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИ (ИИМС)

Жисм ионлар билан тўпга тутилганда ундан нейтрал атомлар, бир ва бир неча марта ионлашган мусбат ва манфий ионлар ҳамда ҳар хил кластерлар учиб чиқиши мумкин. Юзанинг ҳолатига қараб битта жисмининг ўзи учун учиб чиқаётган ионларнинг сони нейтрал атомларга нисбатан ўнлаб, юзлаб марта ўзгариши мумкин.

Жисм таркибини ундан бирламчи ионлар таъсирида учиб чиқаётган иккиламчи ионларнинг массасани таҳлил қилиш йўли билан ўрганиш иккиламчи ионларнинг масс-спектроскопияси дейилади. ИИМС қурилмаси ўта юқори вакуумли ($P \leq 10^{-6}$ Па) асбоб ичига жойлаштирилган тўртта асосий қисмлардан иборат бўлади (5.10-расм):

1) бирламчи ионлар тўпи. Бу тўп ионлар манбаи ва фокусловчи қурилмадан иборат бўлади;

2) махсус ўрнатилган нишон;

3) иккиламчи ионларни тортувчи диафрагмалар ва электростатик линзалар ва анализатор;

4) ионларни масса бўйича (m/e) таҳлил қилувчи қурилма.

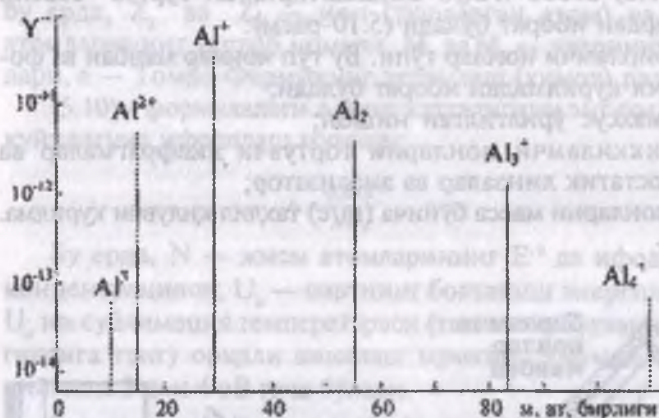


5.10-расм. Иккиламчи ионлар масс-спектрометрининг чизмаси:

1-бирламчи ионларнинг тўпи; 2-нишон; 3-электростатик
анализатор; 4-масса-анализатор

Иккиламчи зарралар ичидан мусбат ёки манфий ионлар тўртиб олинади. Бу ионлар электростатик линзалар орқали масс-анализаторларга келиб тушади. Кратернинг қирраларидан чиққан ионлар қайд қилинмаслиги учун асосан ион тушаётган юзанинг ўрта қисмидан чиққан иккиламчи ионларгина қабул қилиб олинади.

Манфий ионларнинг ҳам, мусбат ионларнинг ҳам спектри жуда мураккаб тузилишга эга бўлади. Ҳаттоки ўта тоза материалнинг спектрида ҳам жуда кўп чизиқлар (чўққилар) мавжуд бўлади. 5.11-расмда Al ни Ag ионлари билан тўпга тутиш натижасида олинган ионларнинг спектри келтирилган.



5.11-расм. Al пластинкасининг иккиламчи ион масс-спектри.

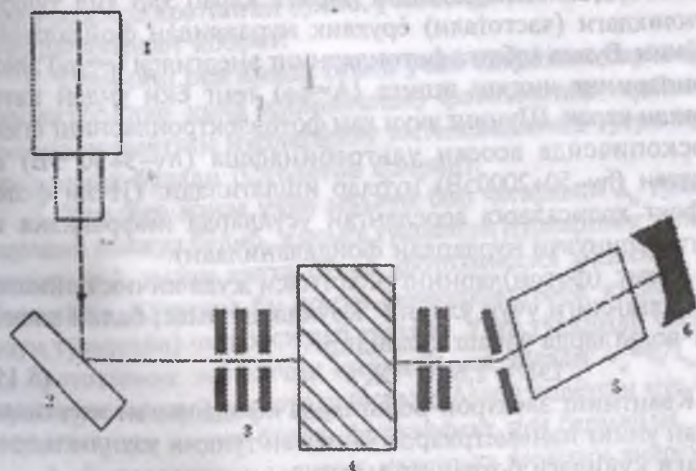
Спектр бир, икки ва уч марта ионлашган Al атомлари ҳамда икки, уч ва тўрт атомдан тузилган кластерлардан иборатдир. Аммо деярли ҳамма вақт бир марта ионлашган атомларнинг чиқиши энг катта бўлади.

5.6. ИККИЛАМЧИ НЕЙТРАЛ ЗАРРАЛАРНИНГ МАСС-СПЕКТРОСКОПИЯСИ (ИНЗМС)

Учиб чиқаётган иккиламчи ионларнинг концентрацияси юза ҳолатига боғлиқ равишда, айнан бир жисм учун 100, ҳатто 1000 мартагача ўзгариб туриши мумкин. Шунинг

учун ИИМС усули ёрдамида концентрацияларни тўғри аниқлаш мумкин эмас. Матрица юзасининг тоза эмаслигига боғлиқ бўлган эффектлардан қутилиш учун иккиламчи ионлар ўрнига учиб чиқаётган нейтрал зарраларни қайд қилиш мақсадга мувофиқдир. Бу усулда нейтрал атомлар аввалига мусбат ва манфий ионлардан ажратиб олинади, кейин эса улар ионлаштирилади.

ИНЗМС қурилмасининг чизмаси 5.12-расмда келтирилган. Бу қурилманинг ИИМС дан асосий фарқи шундаки, унда масс-анализаторнинг олдида ионлаш камераси ўрнатилган бўлади. Нишон ва ионлаш камераси орасига қўйилган тўрларга шундай потенциаллар бериладики, улар мусбат ҳамда манфий ионларнинг нишондан камерага, камерадан эса нишонга ўтишига йўл қўймайди. Нейтрал атомларни ионлаш учун циклотронларда тезлаштирилган электронлар билан ўйғотилган плазма қўлланилади. Айрим ҳолларда плазманинг ўрнига кучли лазерлардан фойдаланиш мумкин.



5.12-расм. Иккиламчи нейтрал зарраларнинг масс-спектрометри:

1-ион тўпи; 2-нишон; 3-тўрлар; 4-ионлаш камераси; 5-масс-анализатор; 6-детектор

Текшириляётган қандайдир нейтрал зарраларни A деб белгиласак, уни ионлашдан кейин ҳосил бўлган сигнални қуйидаги кўринишда ифодалаш мумкин:

$$I_A = i_p Y_A J_A I_A \quad (5.14)$$

бунда, i_p — бирламчи ионларнинг токи, Y — A зарраларнинг тўла чиқиш катталиги, J_A — учиб чиққан нейтрал зарраларнинг ионлашиши даражаси, γ_A — асбоб доимийси.

Асл металллар (Au , Pt , Pd) учун J_A нинг қиймати 10^{-1} , қийин эрийдиган металллар учун эса 10^{-2} гача бўлиши мумкин. ИНЗМС усулнинг сезгирлиги ИИМСникига яқин бўлиб, 10^3 ни ташкил қилади. Юза ҳолатига қараб учиб чиқаётган нейтрал зарраларнинг сони сезиларли ўзгармаслиги учун ИНЗМС усулини миқдорий анализ учун ҳам қўллаш мумкин.

5.7. ФОТОЭЛЕКТРОНЛАР СПЕКТРОСКОПИЯСИ

Қаттиқ жисм юзасига фотонлар оқими келиб тушганда ундан электронлар учиб чиқиши кузатилади. Бу ҳодиса ташқи фотоэффект деб аталади. Бу электронларнинг энергия буйича тақсимотини таҳлил қилиш орқали юзаларнинг ҳолати тўғрисида қимматли маълумотлар олиш мумкин. Олиниши лозим бўлган маълумотнинг турига қараб ҳар хил тўлқин узунлиқдаги (частотали) ёруғлик нурларидан фойдаланиш мумкин. Бунда албатта фотонларнинг энергияси ($\epsilon = h\nu$) электронларнинг чиқиш ишига ($A = e\phi$) тенг ёки ундан катта бўлиши керак. Шунинг учун ҳам фотоэлектронларнинг спектроскопиясида асосан ультрабинафша ($h\nu \sim 3 + 50$ эВ) ва рентген ($h\nu \sim 50 + 2000$ эВ) нурлар ишлатилади. (Ички фотоэффект ҳодисаларга асосланган усулларда инфрақизил ва кўзга кўринувчи нурлардан фойдаланилади).

Квант (фотон)ларнинг энергияси жуда кичик қийматга эга бўлганлиги учун уларни Жоулларда эмас, балки электрон-вольтларда ўлчаш қулайдир.

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Ж}. \quad (5.15)$$

Квантнинг электрон-вольтларда ифодаланган энергияси билан унинг нанометрларда ўлчанган тўлқин узунлиги орасидаги қуйидаги боғланиш мавжуд:

$$\epsilon = h\nu = hc/\lambda = 1236/\lambda. \quad (5.16)$$

Масалан, бинафша нурлар учун $\lambda = 380$ нм лиги маълум бўлса, бу нурларнинг ҳар бир квантининг энергияси $\epsilon_d = 1236/380 = 3,25$ эВ бўлади.

Электромагнит тўлқинларнинг частотаси ν ёки тўлқин узунлиги $\lambda = c/\nu$ электромагнит нурланишнинг асосий хараakterистикаси бўлиб ҳисобланади.

Бир хил частотали (тўлқин узунликли) нурлар дастаси монохроматик нурлар дейилади. Бирлик вақт ичида бирлик юзадан ўтаётган монохроматик фотонлар оқими F орқали нурланиш интенсивлиги N_q ни қуйидаги формула ёрдамида аниқлаш мумкин:

$$N_q = F/h\nu \quad (5.17)$$

Биз ушбу бўлимда асосан ультрабинафша нурларнинг электрон спектроскопиясини кўриб ўтамиз. Бу усул қаттиқ жисмнинг юза қисмида валент электронларнинг энергетик тақсимоли ҳақида бевосита маълумот бера оладиган ягона усулдир.

5.7.1. ТАШҚИ ФОТОЭФФЕКТ ҚОНУНЛАРИ

Ёруғлик таъсирида қаттиқ жисм юзасидан вакуумга учиб чиқаётган электронларнинг эмиссиясига оид қонунларни кўриб ўтамиз. Фотоэффектнинг асосий қонунлари тажрибалар асосида яратилган бўлиб, у монохроматик нурлар учун қуйидагилардан иборат:

1. Тўйиниш режимида (яъни учиб чиқаётган барча фотоелектронлар қайд қилинганда) фототокнинг қиймати жисмга тушаётган нурларнинг интенсивлигига тўғри пропорционал бўлади (Столетов қонуни).

2. Ҳар бир жисм учун маълум бир чегаравий λ_0 тўлқин узунлики мавжуд бўлиб, жисмга тушаётган нурларнинг тўлқин узунлиги λ ундан катта бўлса, фотоэмиссия ҳодисаси рўй бермайди. Купинча бу қонун фотоэффектнинг қизил (ёки узун тўлқинли) чегараси деб аталади. Узун тўлқинли чегарага частотанинг энг кичик қиймати мос келади: $\nu_0 = c/\lambda_0$. Бу ерда ν_0 чегаравий частота дейилади. Агар тушаётган нур частотаси ν_0 дан кичик бўлса, фотоэффект рўй бермайди.

3. Фотоелектронларнинг максимал кинетик энергияси частота ошиши билан ошиб боради ва фотонларнинг интенсивлигига боғлиқ бўлмайди (Эйнштейн қонуни).

Умуман, Эйнштейн фотоэффект қонунларини ўзида тўла мужассамлаштирган қонунни яратди. Бундай қонунни яратишда у ўз тажрибалари ёрдамида асослаган қуйидаги иккита мулоҳазалардан фойдаланди: биринчидан, фотон жисм элек-

тўли билан тўқнашганда унга узининг барча энергиясини тўли беради, иккинчилан, жисм электрони битта фотондан энергия олиб ҳаяжонланиш даврида ($\tau = 10^{-12} + 10^{-14}$ с) бошқа фотонлардан энергия олмайди, яъни ҳар бир учиб чиққан электрон фақатгина битта фотоннинг энергиясини олган бўлади. (Бу айтилган фикрлар юқори интенсивликдаги нурлар учун, масалан, лазер нурлари учун бажарилмайди).

Эйнштейн қонуни тўлароқ ҳолда куйидагича ифодаланиши мумкин: жисмга тушаётган фотон энергиясининг бир қисми чиқиш ишини енгилга, қолган қисми эса электронларга кинетик энергия беришга сарф бўлади:

$$h\nu = A + \frac{m\theta_{\text{max}}^2}{2} \quad (5.18)$$

бу ерда, A — фотоэлектронларнинг чиқиш иши, m — электроннинг массаси, θ_{max} — фотоэлектронларнинг максимал тезлиги, $\frac{m\theta_{\text{max}}^2}{2}$ — уларнинг максимал кинетик энергияси.

Учиб чиқаётган фотоэлектронларнинг вакуумдаги максимал кинетик энергияси (тезлиги) ҳар хил бўлиши мумкин. Бунга сабаб бу электронларнинг жисм ичида турган пайтидаги бошланғич энергияларининг ҳар хиллигидир. Фотон энергиясини олганга қадар жисм ичидаги электронларнинг энергияси қанча катта бўлса, учиб чиққандан кейин ҳам унинг энергияси шунча катта бўлади. Масалан, қаттиқ жисмининг валент зонасидаги электронлар ичида валент зонанинг тепа қисмидагилари энг катта энергияга эга бўлади. Демак, вакуумда ҳам бу зонанинг тепа қисмидан чиққан электронлар энг катта энергияга эга бўлади. Валент зонанинг пастки қисмларидан чиққан электронлар камроқ энергияга эга бўлади.

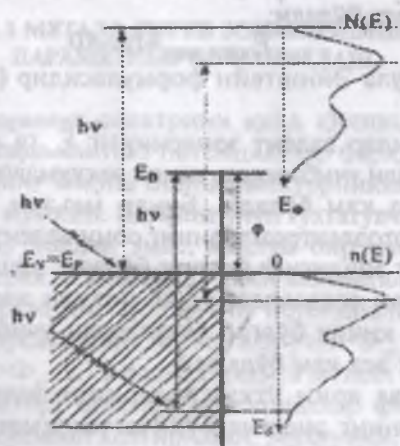
Фотоэффектни миқдорий жиҳатдан характерлаш учун фотоэлектронларнинг квант чиқиши γ деган катталиқ ишлатилади.

$$\gamma = \frac{n}{N_{\phi}} \quad (5.19)$$

n — учиб чиққан фотоэлектронлар сони, N_{ϕ} — юзага тушаётган фотонлар сони.

5.7.2 УЛЬТРАБИНАФША НУРЛАРНИНГ ФОТОЭЛЕКТРОН СПЕКТРОСКОПИЯСИ (УБЭС)

Валент зонадаги электронларнинг энергия буйича тақсимланиши тўғрисида маълумот олиш учун УБЭС усули жуда кенг қўлланилади. Бунинг учун фотоэлектронлар ҳосил қилаётган ток билан тўхтатувчи потенциал орасидаги боғланиш эгри чизигининг биринчи тартибли дифференциали (ҳосиласи), яъни фотоэлектронларнинг спектри $N_{\phi}(E) = di_{\phi}(E)/dE$ ёзиб олинади. $N_{\phi}(E)$ боғланишни ёзиб олишнинг электрон схемаси иккиламчи электронларнинг спектрини (масалан, оже-электронларни) ёзиб олиш схемасидан деярли фарқ қилмайди. Фақат бу ерда бирламчи электронлар манбаи ўрнига фотонлар манбаи ўрнатилади (5.4 – расмга қаранг). Фотонлар манбаи сифатида ультрабинафша нурлар соҳасида чизиқли спектрга эга бўлган K_2P (ксенон тўлдирилган), K_2P (криптонли) ва B_2P (водородли) стандарт газоразряд ёки симоб лампаларидан фойдаланиш мумкин. Ультрабинафша нурлар соҳасида $N_{\phi}(E)$ спектрини ёзиб олишда кўп турли сферик анализаторлар ишлатиш анча қулайдир.



5.13-расм. Металлда валент электронларнинг энергия буйича тақсимланиши $n(E)$ ва фотоэлектронларнинг спектри $N(E)$: E_0 -бошланғич энергия, E_{ϕ} -фотоэлектронлар энергияси, E_v -вакуум сатҳи, E_v -валент зонанинг энг юқори сатҳи, E_F -Ферми сатҳи.

5.13-расмда металлнинг юза қисмида валент электронларнинг энергетик тақсимоти ва шу металлдан вакуумга

тўғри билан тўқнашганда унга узининг барча энергиясини тўла беради, иккинчилан, жисм электрони битта фотондан энергия олиб ҳаяжонланиш даврида ($\tau = 10^{-12} + 10^{-14}$ с) бошқа фотонлардан энергия олмайди, яъни ҳар бир учиб чиққан электрон фақатгина битта фотоннинг энергиясини олган бўлади. (Бу айтилган фикрлар юқори интенсивликдаги нурлар учун, масалан, лазер нурлари учун бажарилмайди).

Эйнштейн қонуни тўлароқ ҳолда куйидагича ифодаланиши мумкин: жисмга тушаётган фотон энергиясининг бир қисми чиқиш ишини енгилшга, қолган қисми эса электронларга кинетик энергия беришга сарф бўлади:

$$h\nu = A + \frac{m\theta_{\max}^2}{2} \quad (5.18)$$

бу ерда, A — фотоэлектронларнинг чиқиш иши, m — электроннинг массаси, $\theta_{\max}$ — фотоэлектронларнинг максимал тезлиги, $\frac{m\theta_{\max}^2}{2}$ — уларнинг максимал кинетик энергияси.

Учиб чиқаётган фотоэлектронларнинг вакуумдаги максимал кинетик энергияси (тезлиги) ҳар хил бўлиши мумкин. Бунга сабаб бу электронларнинг жисм ичида турган пайтидаги бошланғич энергияларининг ҳар хиллигидир. Фотон энергиясини олганга қадар жисм ичидаги электронларнинг энергияси қанча катта бўлса, учиб чиққандан кейин ҳам унинг энергияси шунча катта бўлади. Масалан, қаттиқ жисмининг валент зонасидаги электронлар ичида валент зонанинг тепа қисмидагилари энг катта энергияга эга бўлади. Демак, вакуумда ҳам бу зонанинг тепа қисмидан чиққан электронлар энг катта энергияга эга бўлади. Валент зонанинг пастки қисмларидан чиққан электронлар камроқ энергияга эга бўладилар. -

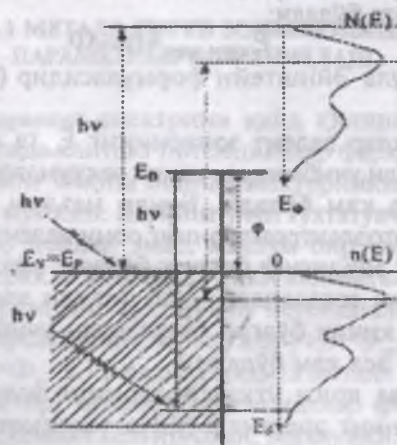
Фотоэффектни миқдорий жиҳатдан характерлаш учун фотоэлектронларнинг квант чиқиши γ деган катталиқ ишлатилади.

$$\gamma = \frac{n}{N_{\phi}} \quad (5.19)$$

n — учиб чиққан фотоэлектронлар сони, N_{ϕ} — юзага тушаётган фотонлар сони.

5.7.2 УЛЬТРАБИНАФША НУРЛАРНИНГ ФОТОЭЛЕКТРОН СПЕКТРОСКОПИЯСИ (УБЭС)

Валент зонадаги электронларнинг энергия бўйича тақсимланиши тўғрисида маълумот олиш учун УБЭС усули жуда кенг қўлланилади. Вунинг учун фотоэлектронлар ҳосил қилаётган ток билан тўхтатувчи потенциал орасидаги боғланиш эгри чизигининг биринчи тартибли дифференциали (ҳосиласи), яъни фотоэлектронларнинг спектри $N_{\phi}(E) = dI_{\phi}(E)/dE$ ёзиб олинади. $N_{\phi}(E)$ боғланиши ёзиб олишнинг электрон схемаси иккиламчи электронларнинг спектрини (масалан, оже-электронларни) ёзиб олиш схемасидан деярли фарқ қилмайди. Фақат бу ерда бирламчи электронлар манбаи ўрнига фотонлар манбаи ўрнатилади (5.4 — расмга қаранг). Фотонлар манбаи сифатида ультрабинафша нурлар соҳасида чизиқли спектрга эга бўлган K_2P (ксенон тўлдирилган), K_2P (криптонли) ва B_2P (водородли) стандарт газоразряд ёки симоб лампаларидан фойдаланиш мумкин. Ультрабинафша нурлар соҳасида $N_{\phi}(E)$ спектрини ёзиб олишда кўп турли сферик анализаторлар ишлатиш анча қулайдир.



5.13-расм. Металлда валент электронларнинг энергия бўйича тақсимланиши $n(E)$ ва фотоэлектронларнинг спектри $N(E)$: E_v -бошланғич энергия, E_0 -фотоэлектронлар энергияси, E_v -вакуум сатҳи, E_F -валент зонанинг энг юқори сатҳи, E_F -Ферми сатҳи.

5.13-расмда металлнинг юза қисмида валент электронларнинг энергетик тақсимоти ва шу металлдан вакуумга

учиб чиқаётган фотоэлектронларнинг спектри схематик равишда кўрсатилган. Бу спектрларнинг кўриниши бир-бирига жуда ўхшаш. Бундан фотоэлектронлар спектрини ёзиб олиш орқали валент электронларнинг тақсимооти ҳақида тўғридан-тўғри маълумот олиш мумкин, деган ҳулоса келиб чиқади.

Расмдан кўриниб турибдики, агар электронларнинг металл ичидаги тўла энергияси E бўлса, унинг вакуумга учиб чиқиши учун қуйидаги шарт бажарилиши керак

$$E = h\nu \geq E_v + \Phi \quad (5.20)$$

Бу ерда, E_v — валент зонанинг энг юқори сатҳи. Бу сатҳ металлларда Ферми сатҳи билан устма-уст тушади. Φ — фотоэлектронларнинг чиқиш иши. У ҳолда вакуумга учиб чиққан электронларнинг энергияси қуйидагига тенг бўлади:

$$E_{\text{кин}} = (E + h\nu) - (E_v + \Phi). \quad (5.21)$$

Жисм ичидаги энг катта энергияга эга бўлган электронлар E_v сатҳда жойлашган бўлади, яъни $E = E_v$ сатҳдан учиб чиққан электронлар энг катта кинетик энергияга эга бўлади. Демак $E = E_v$ бўлган ҳол учун (5.21) қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$E_{\text{кин.мак}} = h\nu - \Phi. \quad (5.22)$$

Бу формула Эйнштейн формуласидир (5.18-формулага қаранг)

Электронлар валент зонасининг E_v га нисбатан қанча қуйи соҳасидан учиб чиқса, унинг вакуумдаги кинетик энергияси шунча кам бўлади. Бунда маълум энергия билан чиқаётган фотоэлектронларнинг сони валент зонадаги электронларнинг зичлигига боғлиқ бўлади: зичлик катта (максимум) бўлган соҳалардан учиб чиққан электронлар сони кўп, зичлик кичик бўлган сатҳлардан учиб чиққан электронлар сони эса кам бўлади.

Металл ва ярим ўтказгичларнинг валент зонасидаги электронларнинг энергия бўйича тақсимотини ўрганишда энергияси $h\nu = 10 \div 15 \text{ эВ}$ бўлган фотонлардан фойдаланиш мақсадга мувофиқдир. Фотонлар энергияси бундан катта бўлса, учиб чиқаётган фотоэлектронлар таркибида "иккиламчи" (фотоэлектронлар жисм ичида ҳаракат қилиши вақтида ҳосил қилган) электронларнинг миқдори ошиб кетиши мумкин. Натижада фотоэлектронлар спектрининг кўриниши валент электронлар спектрдан фарқ қилиши мумкин. Агар

$h\nu \leq 10 \div 15$ эВ бўлса, фотоэлектронлар валент зонанинг юқори қисмидангина чиқиши мумкин.

Диэлектрикларнинг валент зоналарини таҳлил қилишда эса фотонларнинг энергиясини $20 \div 25$ эВ гача ошириш мумкин. Чунки тақиқланган зонаси кенг бўлган диэлектрикларда чиқиш иши $8-10$ эВ ни ташкил қилади.

5.8. ФОТОЭЛЕКТРОН СПЕКТРОСКОПИЯ ЁРДАМИДА МЕТАЛЛАР ВА ЯРИМ ЎТКАЗГИЧЛАР ЗОНАЛАРИНИНГ ПАРАМЕТРЛАРИНИ АНИҚЛАШ

Фотоэлектронлар ҳосил қилган токнинг тўхтатувчи потенциалга нисбатан ўзгаришнинг вольт-ампер характеристика (ВАХ) деб аталади. ВАХ ёки унинг биринчи тартибли дифференциали (фотоэлектронларнинг спектри) ёрдамида қаттиқ жисм сирти зоналарининг айрим параметрларини аниқлаш мумкин. Бу ерда биз идеал металл ва ярим ўтказгич ($T=0K$) учун бундай параметрларни аниқлашни қисқача кўрсатиб ўтамиз.

5.8.1 МЕТАЛЛ СИРТИ ЗОНАЛАРИНИНГ ПАРАМЕТРЛАРИНИ АНИҚЛАШ

Электронларнинг спектрини қайд қилишда нишон ва коллектор орасида кантакт потенциаллар фарқи вужудга келади. Нишоннинг чиқиш иши коллекторникидан катта ёки кичик бўлиши мумкин. Шунинг учун тўхтатувчи потенциални (энергияни) нолдан эмас, маълум бир мусбат қийматдан бошлаш керак. 5.14-расмда икки хил металл учун фотоэлектронлар токининг тўхтатувчи потенциалга боғлиқлик эгри чизиғи кўрсатилган. M_1 металл учун $\Phi_{M1} < \Phi_K$, M_2 металл учун $\Phi_{M2} > \Phi_K$. 5.15-расмда иккита металл (масалан нишон ва коллектор) орасида потенциаллар фарқининг вужудга келиши схемаси келтирилган. Маълумки, контакт пайтида ҳар бир жисмларнинг Ферми сатҳлари E_F бир-бири билан мос тушади, яъни битта горизонтал чизиқда жойлашади. Энг катта энергияли электронлар валент зонанинг энг юқори E_v сатҳидан чиқади. Металларда E_v ва E_F бир-бири билан устма-уст тушади. Шунинг учун металларда фотоэлектронларнинг чиқиш иши Φ_m ва термоэлектронларнинг чиқиш

иши ϕ_M доим бир-бирига тенг бўлади. Энг тез электронлар тўхтатувчи потенциалнинг энг катта қийматида тўхтайди. Спектрнинг ўзи эса валент зонадаги электроннинг энергетик тақсироти ифодалайди. 5.15-расмга асосланиб Φ_M ни қуйидагича топамиз:

$$\Phi_M = \phi_M = h\nu - eV_{\max} = h\nu - (eV_0 + e\Delta V), \quad (5.23)$$

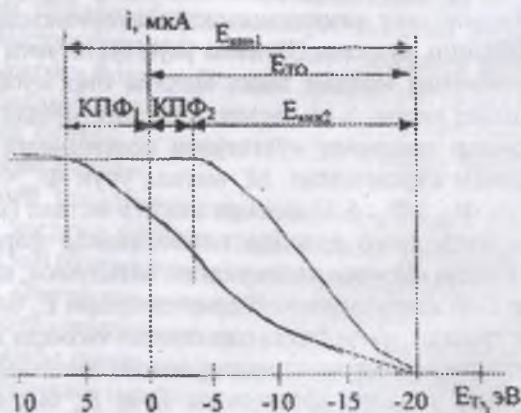
бу ерда, $eV_{\max} = \frac{mv_{\max}^2}{2}$ — металлдан учиб чиқаётган электронлар олиши мумкин бўлган энг катта энергия, $E_{\text{то}} = eV_0$ — тўхтатувчи потенциал энергиясининг энг катта қиймати, ΔV — контакт потенциаллар фарқи (КПФ). Агар $\Phi_M < \Phi_K$ бўлса, $eV_{\max} > eV_0$, агар $\Phi_M > \Phi_K$ бўлса, $eV_{\max} < eV_0$ ва агар $\Phi_M = \Phi_K$ бўлса, $eV_{\max} = eV_0$ бўлади. Бу ерда Φ нинг қиймати ўтказувчанлик зонасининг металл-вакуум чегарасигача бўлган кенглигига тенгдир.

$$e\Delta V_K = \Phi_K - \Phi_M = \Phi_K - \Phi_M \quad (5.24)$$

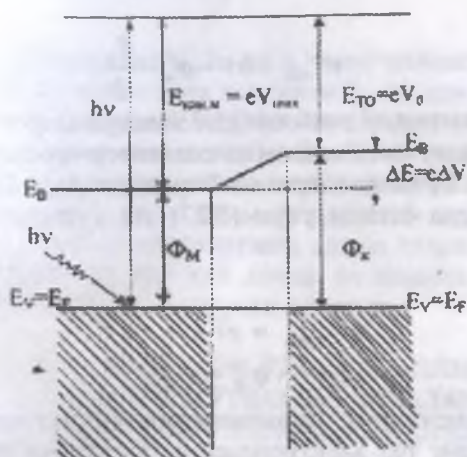
эканлигини ҳисобга олсак, қуйидаги ҳосил бўлади:

$$eV_0 = E_0 = h\nu - \Phi \quad (5.25)$$

Демак, металлларда тўхтатувчи потенциалнинг катталиги электронларнинг металллардан чиқиш ишига боғлиқ эмас, фақатгина коллекторнинг чиқиш иши Φ_K га боғлиқ бўлар экан. Бундан, $h\nu = \text{const}$ бўлганда ҳар қандай металл учун eV_0 битта қийматга эга бўлиши келиб чиқади.



5.14-расм. Чиқиш ишлари ҳар хил булган металллар учун фотоэлектронлар токининг тўхтатувчи потенциалга боғлиқлик эгри чизиги.



5.15-расм. Икки хил металл (нишон ва моллектор) учун фотоэффектнинг энергетик тасири: Φ_M -текшириляётган металл (нишон)нинг чиқиш иши. Φ_K -коллекторнинг чиқиш иши.

$h\nu$ нинг қийматини ўзгартирилса, спектрнинг кенглиги ҳам ўзгаради. Яъни $h\nu$ ни ўзгартира бориб, валент зона кенглигини топиш мумкин.

5.8.2 АРАЛАШМАСИ ЙЎҚ ИДЕАЛ ЯРИМЎТКАЗГИЧ ЗОНАЛАРИНИНГ ПАРАМЕТЛАРИНИ АНИҚЛАШ

Идеал хусусий ярим ўтказгичларда Ферми сатҳи таққиланган зонанинг ўртасида жойлашади. Абсолют нол температура деб қаралса, ярим ўтказгич юзасига тушаётган фотонлар электронларни E_V сатҳ ва ундан пастки сатҳлардан чиқара олади. E_V дан E_g (қаттиқ жисм ва вакуум чегараси) гача бўлган энергетик масофа фотоэлектрон чиқиш ишига тенг бўлади. Термоэлектрон чиқиш иши эса E_F дан E_g гача бўлган энергетик оралиқни ифодалайди (5.16-расм).

$$\Phi_d = \Phi_K + \frac{E_g}{2}. \quad (5.26)$$

Бу ерда, Φ_K — ярим ўтказгич учун фотоэлектронлар чиқиш иши, Φ_d — термоэлектронларнинг чиқиш иши, ΔE_g — таққиланган зонанинг кенглиги E_V сатҳдан чиқаётган электронлар энг катта кинетик энергияга эга бўлади ва уни қуйидаги формуладан аниқлаш мумкин:

$$eV_{\max} = h\nu - \varphi_a - \frac{E_g}{2}. \quad (5.27)$$

Яримўтказгичдан учиб чиққан электронлар коллекторга келиб тушади, яъни нишон ва коллектор орасида контакт ҳосил бўлади. Бу ҳолда уларнинг Ферми сатҳлари битта горизонтал чизиқда ётгани учун (5.27) ни қуйидагича ёзиш мумкин:

$$eV_{\max} = eV_0 + e\Delta V, \quad (5.28)$$

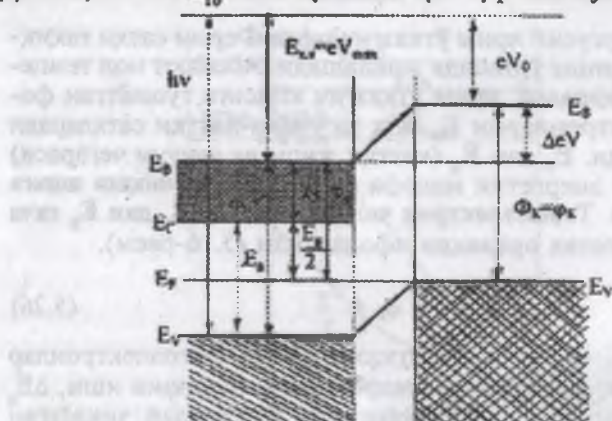
$$e\Delta V = \varphi_K - \varphi_A, \quad (5.29)$$

φ_K - коллекторнинг термоэлектрон чиқиш иши.

У ҳолда энг тез электронларни тўхтатувчи потенциал майдонининг энергияси

$$eV_0 = h\nu - \varphi_K - \frac{E_g}{2} \quad (5.30)$$

бўлади. Бу формуладан кўринадики, ярим ўтказгичларда тўхтатувчи потенциалнинг энг катта қиймати eV_0 , металлдан фарқли равишда, ёруғлиқ кванти энергияси $h\nu$ ва коллекторнинг материалдан ташқари ярим ўтказгичнинг турига ҳам боғлиқ бўлар экан. Ҳар хил ярим ўтказгич учун E_g нинг қиймати ҳам ҳар хил, демак E_{T0} нинг қиймати ҳам ҳар хил бўлади.



5.16-рasm. Идеал яримўтказгич учун ташқи фотоэффектнинг энергетик схемаси.

Бу формуладан eV_a , $h\nu$ ва ϕ_k нинг қийматларини билган ҳолда тақиқланган зона кенглиги E_k ни ҳам аниқлаш мумкин бўлади. Умуман УБЭС ёрдамида ярим ўтказгичларнинг (диэлектрикларнинг ҳам) E_v , E_f , E_c сатҳларининг энергетик ўрнини, зоналарнинг кенглигини аниқлаш мумкин. Булардан ташқари реал ярим ўтказгичлар учун юзада зоналарнинг эгилиш катталигини ҳамда тақиқланган зонада ҳосил бўладиган ҳар қил донор ва акцептор сатҳларнинг ҳолатини (ўрнини) аниқлаш мумкин.

5.8.3. АРАЛАШМАЛИ ЎТКАЗУВЧАНЛИККА ЭГА БЎЛГАН ЯРИМЎТКАЗГИЧ ЗОНАЛАРНИНГ ПАРАМЕТРЛАРИНИ АНИҚЛАШ

Радиоэлектроникада, умуман электрон техниканинг ҳамма соҳаларида ишлатиладиган яримўтказгичларнинг деярли ҳаммаси маълум бир аралашмага эга бўлади. Бу аралашманинг таркибига қараб яримўтказгич тешикли (р-типли) ёки электронли (п-типли) ўтказувчанликка эга бўлиши мумкин. Бу ўтказувчанлик ишлатиш жараёнида асосий ролни ўйнагани учун аралашмали яримўтказгичларнинг зоналар параметрларини аниқлаш ҳозирги замон электрони-каси, умуман асбобсозлик учун катта аҳамиятга эга бўлади. УБЭС усулидан фойдаланиб керакли маълумотлар олиш мумкин. 5.17-расмда п-типли яримўтказгич ва коллектор орасидаги вужудга келадиган потенциаллар фарқи ва бошқа энергетик боғланишлар кўрсатилган. Бу келтирилган схема асосида энергиялар орасидаги мувозанатларни қуйидагича ифодалаш мумкин:

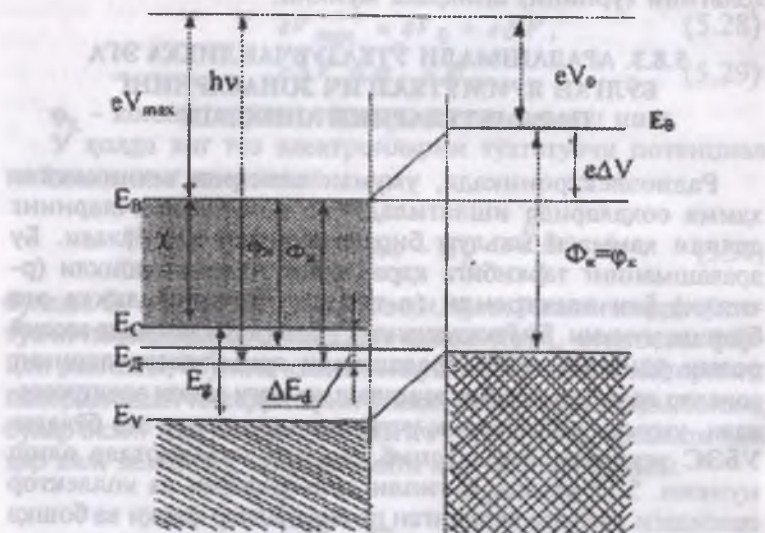
$$h\nu = eV_{\text{max}} + \phi_n = eV_{\text{max}} + \phi_n + \frac{\Delta E_d}{2} = eV_0 + e\Delta V + \phi_n. \quad (5.31)$$

$$e\Delta V = \phi_n - \phi_p = \phi_n - \phi_p + \frac{\Delta E_d}{2}. \quad (5.32)$$

Бу ерда, (5.31) дан яримўтказгичнинг фотоэлектрон чиқиш ишини аниқлаш мумкин, ундан кейин эса (5.32) дан фойдаланиб донор сатҳларнинг ўрнини (яъни E_d ни) аниқлаш мумкин.

Шуни таъкидлаш лозимки, фотоэлектронлар таркибида донор сатҳлар ёки акцептор сатҳлар борлиги туфайли вужудга келадиган фотоэлектронларнинг миқдори жуда кам

бўлади. Уларни қайд қилиш учун юқори даражадаги токни кучайтира оладиган махсус кучайтиргичли тизимлар ишлатилади. Бу сатҳларнинг ҳосил қилган фототоклари валент зонадан учиб чиқаётган фотоэлектронлар ҳосил қиладиган тоқлардан жуда кичик бўлишига қарамасдан уларни катта аниқлик билан қайд қилиш мумкин. Чунки донор сатҳлар ҳосил қиладиган чўққилар валент электронлар спектридан энергетик жиҳатдан сезиларли ($\geq 0,6$ эВ) фарқ қилади.



5.17-расм. n-типдаги яримўтказгич учун ташқи фотоэффектнинг энергетик схемаси.

Акцепторли ярим ўтказгичларда эса бу сатҳлардан чиқаётган фотоэлектронлар ҳосил қилган чўққи E_{AB} га жуда яқин жойлашган бўлади ва бу чўққини валент электронларнинг спектридан ажратиб қараш бирмунча қийинчилик уйғотади.

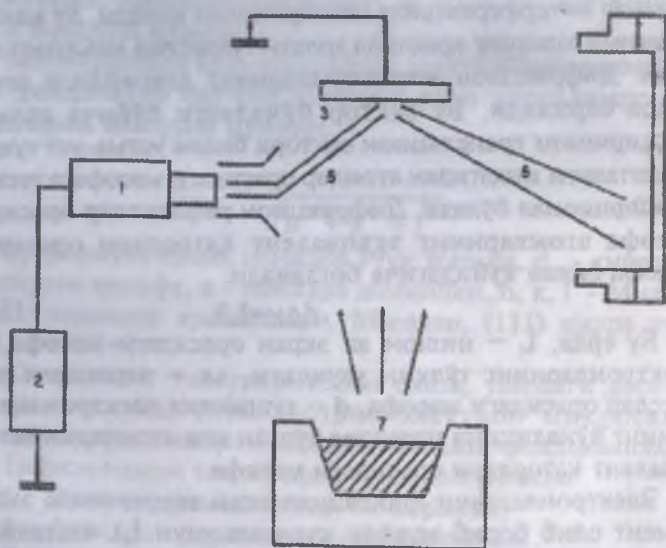
Яримўтказгичларнинг бошқа параметрлари эса аралашмасиз яримўтказгичларники каби аниқланади.

Шуни таъкидлаш лозимки, яримўтказгичларда юза қисмининг ҳолати ҳажм ҳолатидан фарқ қилгани учун зоналарнинг эгилиши рўй беради. УБЭС ёрдамида бу эгилиш катталигини ҳам аниқлаш мумкин.

5.9. КАТТА ЭНЕРГИЯЛИ ДИФРАКЦИЯ УСУЛИ БИЛАН ЭПИТАКСИАЛ ПЛЁНКАЛАРНИНГ КРИСТАЛЛ ТУЗИЛИШИ ҲАҚИДА МАЪЛУМОТ ОЛИШ ТЎҒРИСИДА УМУМИЙ КЎРСАТМАЛАР

Юпқа плёнкалар олишда, айниқса, эпитаксиал плёнкалар олишда, уларнинг таркибидан ташқари кристалл тузилиши ҳақида ахборот олиш энг асосий масаладир. Қалинлиги 10-20 Å дан 100-200 Å гача бўлган плёнкаларнинг кристалл тузилиши ҳақида катта энергияли электронлар дифракцияси (КЭЭД) усули энг қулайдир.

КЭЭД усулида қандай қалинликни аниқлашга қараб электронларнинг энергияси 10-15 кэВ дан 90-100 кэВ гача ўзгариши мумкин. 5.18 - расмда КЭЭД қурилмасининг чизмаси келтирилган. Қурилма қуйидаги асосий қисмлардан ташкил топган: электронлар тўти, люминафорли экран, нишон, нишон юзасида плёнка ҳосил қилиш учун бўғлангирадиган материаллар манбаи.



5.18-расм. Катта энергияли электронларнинг дифрактометри:

- 1-электрон тўти, 2-электрон токи таъминлашчи тизим; 3-нишон;
- 4-люминафорли экран; 5-электронлар дастаси; 6-эластик қийтган электронлар; 7-бўғлангирувчи модда.

Яхши фокусланган моноэнергетик электронлар электрон тўпдан нишоннинг юзасига $2 \cdot 10^6$ бурчак остида сирпаниб тушади, юза ва юза ости қатламлардаги панжара атомларида сочилади. КЭЭД усулида электронларнинг де-Бройль тўлқини узунлиги $\left(\lambda \left(\frac{a}{\lambda} \right) - \frac{12.4}{\text{эВ}} \right)$ қаттиқ жисм панжараси доимийларига ($a \approx 1 \text{ \AA}$) яқин бўлганлиги учун Лауэнинг электронларнинг панжарадаги дифракцияси шarti бажарилади. Уч ўлчамли дифракция учун Лауэ тенгламалари қуйидагича ёзилади:

$$\begin{aligned} a_x \cdot \sin \theta_n &= n\lambda, \\ a_y \cdot \sin \theta_m &= m\lambda, \\ a_z \cdot \sin \theta_k &= k\lambda, \end{aligned} \quad (5.33)$$

Бу ерда: a_x, a_y, a_z — панжара доимийси; q_n, q_m, q_k — электронларнинг сочилиш бурчаклари; n, m, k — бутун сонлар.

Дифракцияланиб сочилган электронлар люминафорли экранда интерференцион манзара ҳосил қилади. Бу манзара ёрдамида юзанинг кристалл ҳолати тўғрисида маълумот олинади. Дифракцион максимумларнинг даврийлиги вектор ҳолда берилади. Бу вектор йўналиши бўйича атомлар занжирининг трансляцион вектори билан устма-уст тушади ва катталиги жиҳатидан атомлар орасидаги масофага тесқари пропорционал бўлади. Дифракцион рефлекслар орасидаги масофа атомларнинг эквивалент қаторлари орасидаги масофа билан қуйидагича боғланади:

$$d\Delta x = L\lambda. \quad (5.34)$$

Бу ерда, L — нишон ва экран орасидаги масофа, λ — электронларнинг тўлқин узунлиги, Δx — экрандаги рефлекслар орасидаги масофа, d — тушаётган электронлар нурунинг йўналишига параллел бўлган юза атомларининг эквивалент қаторлари орасидаги масофа.

Электронларнинг фиксацияланган энергиясида эксперимент олиб бориб муайян қурилма учун $L\lambda$ катталиқни панжара доимийси маълум бўлган монокристаллга нисбатан калибровқалаб олиш мумкин. Шу йўл билан панжара доимийсини 10^{-1} аниқликда ўлчаш мумкин бўлади.

КЭЭД картиналарини қуйидаги принципларга асосан ажратиш мумкин (5.19-расм):

1. Агар электронограммада (КЭЭД картинада) биттагина катта ёруғ фон кузатилса, бундай плёнка аморф бўлади;

2. Агар электронограммаларда концентрик айланалар пайдо бўлса, у поликристаллга ўта бошлайди, концентрик айланаларнинг ўзи бўлса, тўлиқ поликристал бўлади.

3. Агар концентрик айланаларда вертикал чизиқлар пайдо бўла бошласа, текстура ҳосил бўлади, яъни монокристаллга ўта бошлайди.

4. Агар концентрик айланалар тамоман йўқолиб, вертикал чизиқлар ёки нуқталар ҳосил бўлса, тўлиқ монокристалл ҳосил бўлади. Агар плёнканинг ҳамма қатламларида кристалл панжара доимийси бир хил бўлса, алоҳида нуқталар ёки чизиқлар пайдо бўлади, бир хилликдан четга чиқилса, қўш чизиқчалар пайдо бўлади.

Монокристаллар учун электронограммалардан фойдаланиб плёнка кристалл панжарасининг турини (гексогонал, тетрогонал, кубик ва бошқалар) ва панжара катталикларини аниқлаш мумкин.

Монокристалл ва поликристалл электронограммалардан фойдаланиб ҳар хил қирралар учун қирраларо масофаларни аниқлаш мумкин:

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (5.33)$$

Бу формула кубик панжара учун ўринли, d_{hkl} - қирралар орасидаги масофа, a - панжара доимийси, h, k, l - Миллер индексларининг қийматлари. Масалан, (111) қирра учун $h=1, k=1, l=1$.

Юзаларнинг топографиясини олиш, улардаги дефектларни аниқлаш учун растрли электрон микроскоп, трансмиссион электрон микроскоплардан фойдаланилади.

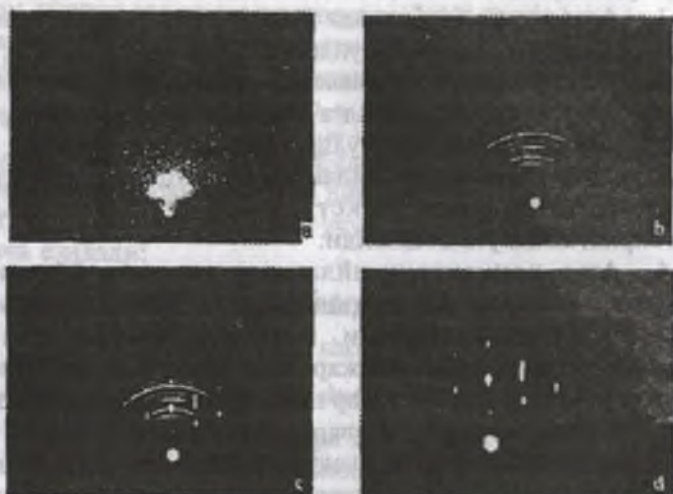
Трансмиссион топография икки хил бўлади:

1 Рентген-трансмиссион топография;

2 Электрон-трансмиссион топография.

Бу иккала усул ҳам нурларнинг плёнкадан ўтишига асосланган, бунда электронларнинг энергияси 100-200 кэВ бўлади.

Растрли электрон микроскоплар жуда яхши фокусланган нуқтавий электронлар дастасининг юза бўйлаб, яъни X ва Y ўқлари бўйича, тез ҳаракатланишига асосланган ва у юзанинг топографияси ҳақида маълумот беради.



5 19-расм. Ва⁺ ионлари билан легирланган Si(100) юзасининг ҳар хил температурада қиздирилганидан кейинги электронограммалар: а- $T=300\text{ K}$ (аморф сирт); б- $T=700\text{ K}$ (поликристалл); с- $T=900\text{ K}$ (текстуриланган); д- $T=1100\text{ K}$ (монокристалл).

5.10. СЕКИНЛАШТИРИЛГАН ЭЛЕКТРОНЛАР ДИФРАКЦИЯСИ (СЭД) УСУЛИ ЁРДАМИДА СУБМОНОСЛОЙ ҚАТЛАМЛАР ҲОСИЛ БЎЛИШ ЖАРАЁНИНИ ЎРГАНИШ

СЭД қаттиқ жисм ёки плёнка сиртининг микроскопик тузилишини ўрганишнинг энг бевосита усулларида бири ҳисобланади. У модда сиртининг кристалл тузилишини ва турли таъсирлар остида бу тузилишнинг ўзгаришини текшириш учун катта муваффақият билан қўлланилмоқда. Ҳозирги кунда СЭД усулининг қўлланиш соҳаси жуда кенг. Хусусан, СЭД турли моддаларнинг сиртига субмонокатлам (яъни деярли алоҳида қатлам) ва монокатламли плёнкалар билан чанглантириш ёки газни адсорбция (моддалар ёки газларнинг қаттиқ жисм ёки суюқлик сиртига ютилиши) қилишда монокристалл сиртида вужудга келадиган икки ўлчамли тузилиш тўғрисида маълумотлар олиш имкониятини беради.

Секинлаштирилган электронларнинг эластик сочилиши қаттиқ жисмнинг сиртига яқин қатламда содир буладиган

когерент ва некогерент сочилиш жараёнларини ўз ичига олади. СЭД қаттиқ жисм сиртида тартибли жойлашган алоҳида атомлар ёки атомларнинг сочилиш маркази томонидан электронларнинг когерент эластик қайтиши жараёнида вужудга келади. Бир каррали ва кўп каррали когерент ЭҚЭ фарқ қилинади. Одатда СЭД учун $E_e \approx 5-500$ эВ энергияли электронлар дастасидан фойдаланилади, аммо 50 эВ дан 150 эВ гача оралиқ энг қулай ҳисобланади. Шу билан бирга когерент сочилиш узунлиги L - икки атом қатламидан ошмайди, яъни СЭД рефлекслари ёки натижалари интенсивлигига амалда атомнинг энг юқори қатлами асосий ҳисса қўшади.

Дифракцион манзара алоҳида электронларнинг мушакил сочилиши ҳодисаларининг жамланиши натижасида ҳосил бўлади. Дастадаги электронлар тўлқин пакетининг ўртача ўлчами билан характерланади. Ёрганилаётган сиртнинг йўналишидаги тўлқин пакетининг ўлчами электронларнинг когерентлик кенглиги дейилади. Когерентлик кенглиги ΔX га қуйидаги омиллар таъсир қилади: электрон тўп катодининг ҳароратига боғлиқ бўлган катталик бўйича электронлар тезлигининг тарқоқлиги; асбобнинг электрон-оптик тизимининг мукамаллаштирилмаганлигига боғлиқ бўлган йўналиш бўйича тезликлар тарқоқлиги. Бу омиллар ҳисобга олинганда ΔX қуйидаги формулага кўра аниқланади:

$$\Delta X = \frac{\lambda}{[(\Delta E / 2E_e)^2 \sin^2 \theta + \beta^2 \cos^2 \varphi]^2}$$

Бу ерда, λ — электроннинг тўлқин узунлиги, ΔE — электронларнинг энергия бўйича тарқоқлиги, φ — дастанинг намунага тушиш бурчаги, θ — қайтиш бурчаги, β — турли йўналишлар бўйича электронлар тезликларининг тарқоқлигини характерловчи бурчак.

Когерентлик кенглигига иккинчи омил асосий таъсир кўрсатади, у омилни характерловчи катталик 100 А⁰ дан ошмайди. Электронларнинг когерент сочилиши жараёнида қатнашувчи соҳанинг ўлчами айнан шунча. Бу СЭД усулини сирт тузилишини улкан масштабни мукамал бўлмаган кўринишларига жуда сезгир усул эмаслигини, яъни бу усул сирт топографиясини эмас, балки айнан атом тузилишини ўргатувчи усул эканлигини англатади.

Сочилган тўлқин интенсивлигининг кучайиши содир бўладиган йўналишлар Вульф-Брегг шартидан аниқланади:

$$d \sin \varphi = n \lambda.$$

Бу ерда, d — панжара доимийси, φ — тушаётган даста ва текислик орасидаги бурчак, n — бутун сон қийматли дифракция тартиби. Агар панжара текислигидан тушаётган электронлар энергиясининг ихтиёрий қийматларида дифракция кузатилса, у ҳолда уч ўлчовли панжара Вульф-Брегг шарти қаноатлантирилганда энг ёрқин натижалар кузатилади. Амалда дифракцион максимумлар йўналиши Эвальднинг таниқли қурилмаси ёрдамида осон аниқланади.

Дифракциянинг кинематик назарияси бир каррали эластик сочилишни яхши тавсифлайди. Шу билан бирга назарий ҳисоблашлар ясси тўлқинлар асосида бажарилади. СЭДга кўп каррали сочилиш жараёнлари кучли таъсир қилади. Бу эластик сочилиш эффектив кесими гоят катта ва атомларнинг геометрик кесими билан бир хил бўлади. Шу сабабга кўра фақат бир каррали сочилиш ҳодисалари ҳисобга олинadиган дифракциянинг кинематик назариясини қўллаб бўлмаслиги аниқланди. СЭДнинг динамик назариясида кўп каррали сочилиш ва ноэластик ҳодисалар туфайли йўқотишлар мавжудлиги ҳисобга олинади. Қайд этилган жараёнлар электронограммаларда қўшимча қайтишлар ва бошқа кучли эффектлар пайдо бўлишига олиб келади.

Бирламчи даста интенсивлиги берилган қийматида E_p ва тушиш бурчаги φ нинг турли қийматларидаги дифракцион ҳодисалар интенсивлигини топиш СЭДнинг динамик назарияси бўйича ҳисоблашларнинг мақсадидир. Бу назария асосида ҳисоблашлар мураккаб ва узоқ давом этадиган бўлганлиги сабабли зарур аниқликни сақлаган ҳолда ҳисоблашларни соддалаштириш имконини берувчи йўлларни топиш учун фаол изланишлар олиб боришмоқда.

СЭДнинг ҳозирги замон динамик назарияси тажриба натижалари асосида сирт тузилиши тўғрисида тўла маълумотларни олиш имконини беради. Шу билан бирга дифракцион манзарани кузатиш билан бир вақтда сиртнинг чиқиш ишининг ўзгариши ва оже-сигнал амплитудалари тўғрисидаги маълумотлар олингани маъқул.

Иловалар

1. Хатолик функцияси ва унинг баъзи бир хоссалари

Хатолик функцияси куйидагича ифодаланadi:

$$\operatorname{erf} z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-a^2} da$$

Тулдирувчи хатолик функциясига таъриф:

$$\operatorname{erfc} z = 1 - \operatorname{erf} z$$

Уларнинг баъзи бир умумий хоссалари:

$$\operatorname{erf} 0 = 0, \quad \operatorname{erf} \infty = 1$$

$$\operatorname{erf} z \approx \frac{2}{\sqrt{\pi}} z, \quad z \ll 1 \text{ ҳол учун,}$$

$$\operatorname{erfc} z \approx \frac{e^{-z^2}}{\sqrt{\pi}}, \quad z \gg 1 \text{ ҳол учун}$$

$$\frac{d \operatorname{erf} z}{dz} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-z^2}$$

$$\int_0^z \operatorname{erfc} z dz = z \operatorname{erfc} z + \frac{1}{\sqrt{\pi}} (1 - e^{-z^2})$$

$$\int_0^{\infty} \operatorname{erfc} z dz = \frac{1}{\sqrt{\pi}}$$

И1 – жадвал: $\operatorname{erf} z$ функциянинг қийматлари

z	$\operatorname{erf} z$	Z	$\operatorname{erfc} z$	z	$\operatorname{erf} z$	z	$\operatorname{erfc} z$
0	1,00000	1,00	0,15730	2,00	0,00468	3,00	0,00002209
0,10	0,88754	1,00	0,11980	2,10	0,00298	3,10	0,00001165
0,20	0,77730	1,20	0,08969	2,20	0,00286	3,20	0,00000603
0,30	0,67137	1,30	0,06599	2,30	0,00114	3,30	0,00000603
0,40	0,57161	1,40	0,04772	2,40	0,000689	3,40	0,00000152
0,50	0,47950	1,50	0,03390	2,50	0,000407	3,50	0,000000743
0,60	0,39614	1,60	0,02365	2,60	0,000236	3,60	0,000000356
0,70	0,32220	1,70	0,01621	2,70	0,000134	3,70	0,000000167
0,80	0,25790	1,80	0,01091	2,80	0,000075	3,80	0,000000077
0,90	0,20309	1,90	0,00721	2,90	0,000041	3,90	0,000000035

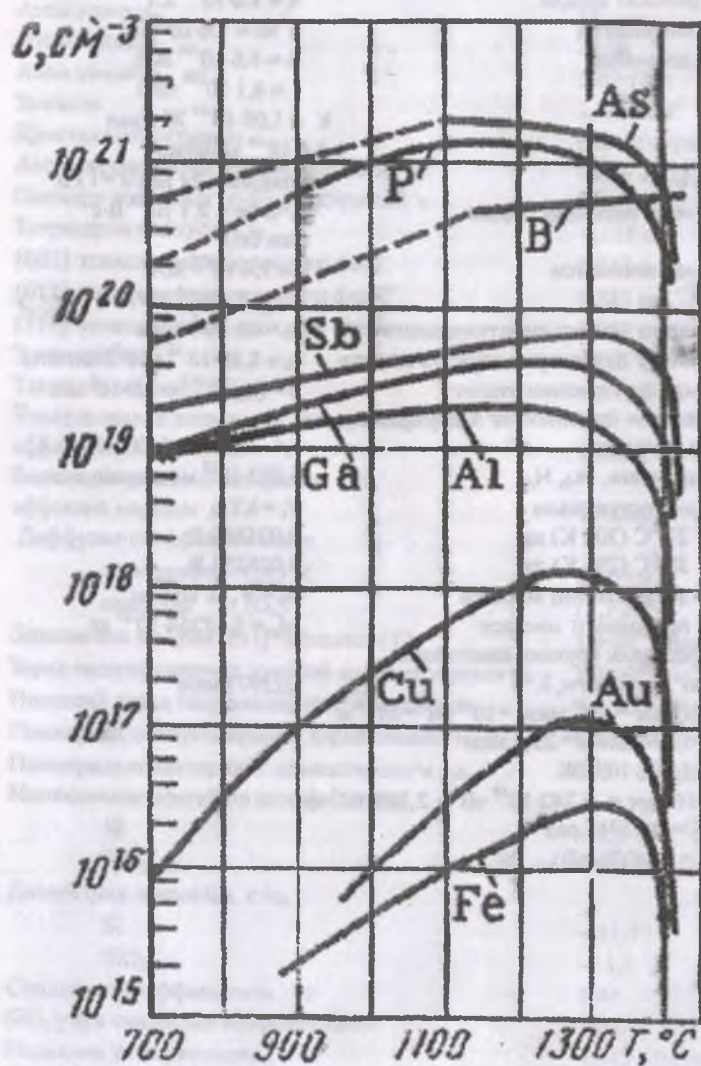
2. Кремнийнинг хоссалари

Атом номери	14
Атом массаси	28,06
Атом zichligi, см^3	$5,02 \cdot 10^{22}$
Zichligi	$2,33 \text{ г/см}^3$
Кристалл структураси	Олмос турли
Атом сатҳларининг конфигурацияси	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
Панжара доимийси (кубнинг қирраси) a	0,357 нм
Тетраэдрик радиус, r_d	0,118 нм
{001} текисликлари орасидаги фазо	0,342 нм
{011} текисликлари орасидаги фазо	0,383 нм
{111} текисликлари орасидаги фазо	0,313 нм
Эриш нуқтаси	1412°C
Таққиланган зона E_g	1,11 эВ
Ўтказувчанлик зонасидаги электронларнинг эффектив массаси	$0,26m_0$
Валент зонадаги ковакларнинг эффектив массаси	$0,38m_0$
Диффузия коэффициентлари	
электронлар (D_n)	$34,6 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$
коваклар (D_p)	$12,3 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$
Эластиклик модули [111] йўналиш (Y)	$1,9 \cdot 10^{12} \text{ дин} \cdot \text{см}^{-2}$
Заряд ташувчиларнинг хусусий концентрацияси n_i	$1,3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$
Ноасосий заряд ташувчиларнинг яшаш вақти	$2,5 \cdot 10^{-7} \text{ с}$
Панжарада электронларнинг ҳаракатчанлиги μ_n	$1350 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$
Панжарада ковакларнинг ҳаракатчанлиги μ_p	$480 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$
Иссиқликдан кенгайиш коэффициентини	
Si	$\sim 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
SiO ₂	$\sim 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Диэлектрик доимийси, ϵ/ϵ_0	
Si	$\sim 11,7$
SiO ₂	$\sim 3,9$
Синдириш коэффициентини, α	3,44
SiO ₂ учун синдириш коэффициентини	1,46
Иссиқлик ўтказувчанлик	$1,412 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
Термик диффузия коэффициентини κ	$0,87 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$
Темпилиш кучланганлиги E	$3 \cdot 10^5 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$
Хусусий материалнинг солиштирма қаршилиги	$2,3 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$

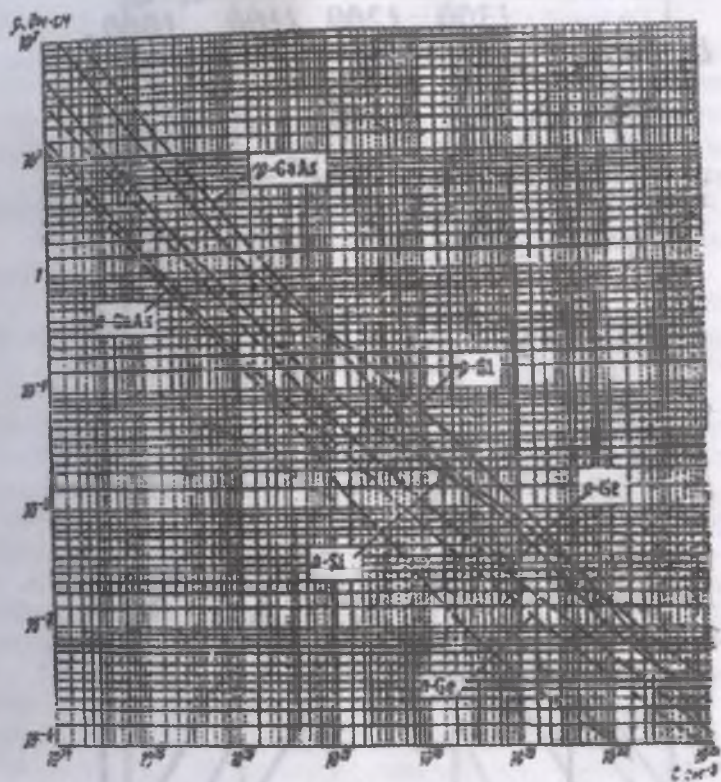
3. Микроэлектроникада фойдаланиладиган физик доимийлар

Электроннинг заряди	$e \approx 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Электрон энергия	$1 \text{ эВ} \approx 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Ж}$
Планк доимийси	$h \approx 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ Ж} \cdot \text{с}$ $\approx 4.1 \cdot 10^{-15} \text{ эВ} \cdot \text{с}$
	$\hbar \approx 1.05 \cdot 10^{-34} \text{ Ж} \cdot \text{с/рад}$ $\approx 6.6 \cdot 10^{-16} \text{ эВ} \cdot \text{с/рад}$
1 цикл/с	$1 \text{ цикл/с} = 2\pi \text{ рад/с} = 1 \text{ Гц}$
Квант энергиясининг оқими	$\Phi_0 = h/2e \approx 2.1 \cdot 10^{-15} \text{ В} \cdot \text{с}$ (ёки Вб)
Болдман доимийси	$k \approx 1.4 \cdot 10^{-23} \text{ Ж/К}$ $\approx 8.6 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/К}$
Вакуумнинг магнит киритувчанлиги	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Вакуумнинг диэлектрик киритувчанлиги	$\epsilon_0 \approx 8.85 \cdot 10^{-12} \approx 10^{-9}/36\pi \text{ Ф/м}$
Вакуумда ёруғликнинг тезлиги	$c = (\epsilon_0 \mu_0)^{-1/2} \approx 3.0 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Қўринадиган ёруғликнинг вакуумдаги тўлқин узунлиги	$0.4 - 0.7 \text{ мкм} (4000-7000 \text{ Å})$
Авогадро сони, A_0 , N_A	$6.022 \cdot 10^{23} \text{ молекул/г-моль}$
Иссиқлик потенциалли	$V_i = kT/q$
27 °C (300 K) да	0.025860 В
20 °C (293 K) да	0.025256 В
Эркин электроннинг массаси	$m_0 = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Эркин протоннинг массаси	$M_p = 1.67264 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
1 эВ энергияли ёруғлик квантининг тўлқин узунлиги, λ	1.23977 мкм
$1 \text{ Å} = 10^{-1} \text{ нм} = 10^{-4} \text{ мкм} = 10^{-4} \text{ см} = 10^{-10} \text{ м}$	
$1 \text{ мил} = 10^{-3} \text{ дюйм} = 25.4 \text{ мкм}$	
$1 \text{ эВ} \approx 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Ж}$	
$1 \text{ Ж} = 10^7 \text{ эрг} \approx 6.242 \cdot 10^{18} \text{ эВ} \approx 2.389 \cdot 10^{-1} \text{ кал}$	
$1^\circ = 60' = 0.01745 \text{ рад}$	
$\lambda (\text{нм}) = 1240/E (\text{эВ})$	

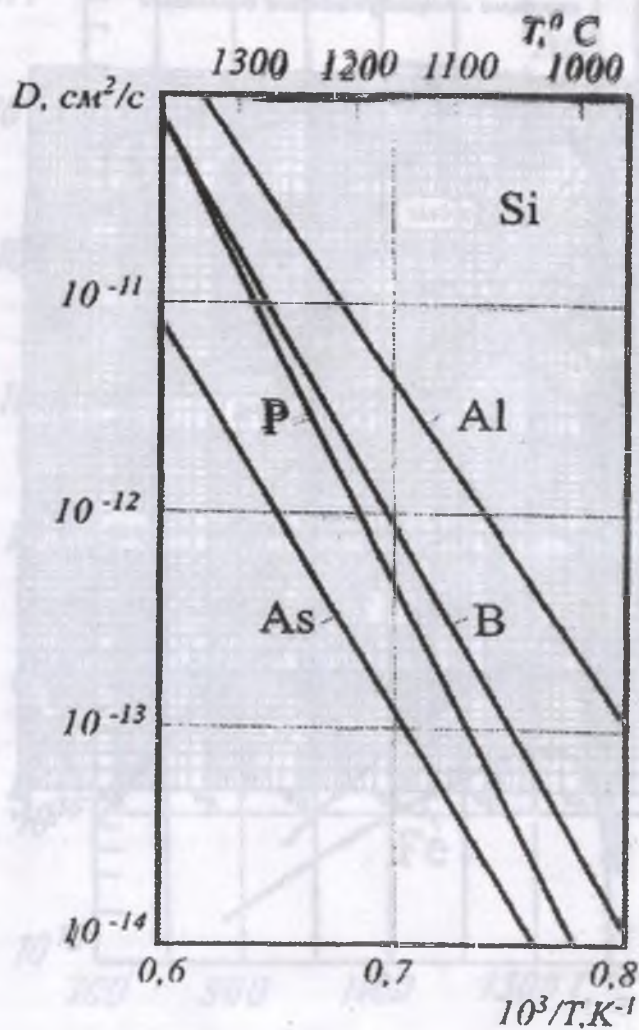
4. Кремийда қирицма элементлари чекли эришларининг температурага боғланиши



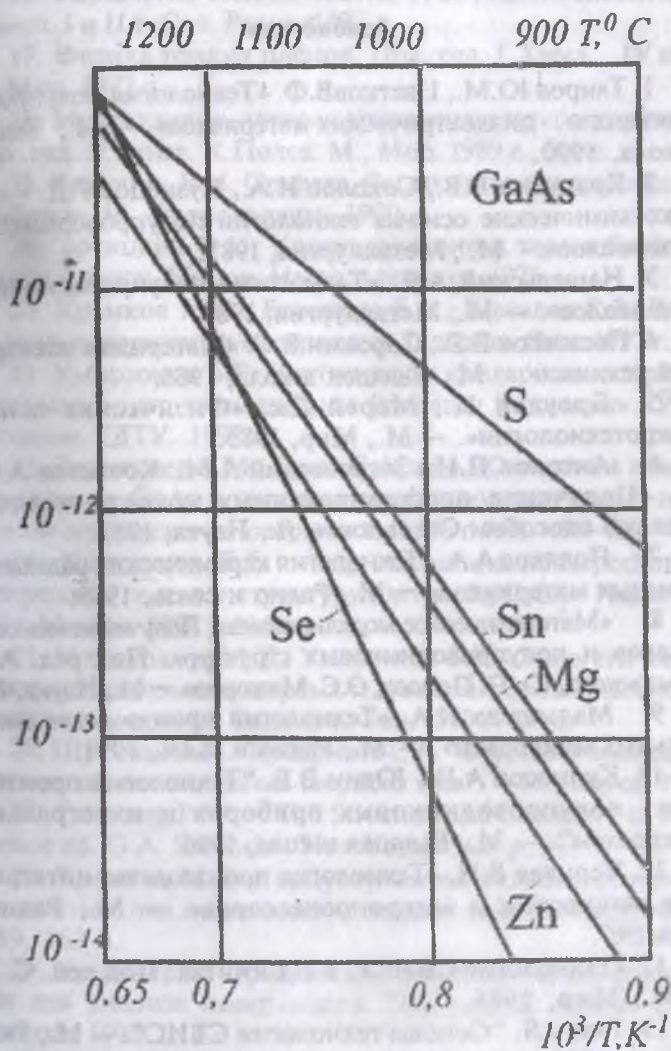
5. Si, Ge va GaAs солиштирма қаршиликларининг
киришма концентрациясига боғлиқлиги



6. Кремнийда киришмалар диффузия коэффициентларининг температура боғланиши



7. Арсенид галлийда киришмалар диффузия
коэффициентларининг температурага боғланиши



Адабиётлар

1. Таиров Ю.М., Цветков В.Ф. «Технология полупроводниковых и диэлектрических материалов». — М., Высшая школа, 1990.
2. Крапухин В.В., Соколов И.А., Кузнецов Г.Д. - «Физико-химические основы технологии полупроводниковых материалов». - М.; Металлургия, 1982.
3. Нашельский А.Я. «Технология полупроводниковых материалов». — М.; Металлургия, 1987.
4. Пасынков В.В., Сорокин В.С. «Материалы электронной техники» - М., Высшая школа, 1986.
5. Броддай И., Мерей Дж. «Физические основы микротехнологии». — М., Мир, 1985.
6. Антонов П.И., Затуловский Л.М., Костыгов А.С. и др. «Получение профилированных монокристаллов и изделий способом Степанова». Л., Наука, 1981.
7. Поляков А.А. «Технология керамических радиоэлектронных материалов» — М., Радио и связь, 1989.
8. «Математическое моделирование. Получение монокристаллов и полупроводниковых структур». Под ред. А. А. Самарского, Ю. П. Полова, О.С. Мажорова. — М., Наука, 1986.
9. Малышева И.А. «Технология производства интегральных микросхем». — М., Радио и связь, 1991.
10. Курносов А.И., Юдин В.В. «Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем». — М., Высшая школа, 1986.
11. Черняев В.Н. «Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров». — М., Радио и связь, 1987.
12. «Технология СБИС», в 2-х книгах. Под ред. С. Зи. — М., Мир, 1986.
13. Таруи Я. «Основы технологии СБИС». — М., Радио и связь, 1985.
14. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника. Под ред. Н. Д. Федорова. — М., Радио и связь, 1998.

15. Парманкулов И.П., Умирзоқов Б.Е. ва бошқалар. "Электрон асбоблар ва қурилмалар ишлаб чиқариш технологияси". Ўқув қўлланма. Тошкент, ТДТУ, 2002.

16. Технология тонких плёнок. Под. ред. Л.Майселла, Р. Глэнгл. I и II т. Сов. Радио. 1977 г.

17. Физика тонких плёнок. Под. ред. Г.Хасса. IV и V. М., Мир. 1972 г.

18. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры. Под. ред. Л.Ченга. К.Полса. М., Мир. 1989 г., 582 с.

19. Викулин, В.И. Стафеев. Физика полупроводниковых приборов. М., Радио и связь. 1990.

20. Точяцкий Э.И. Кристаллизация и термообработка тонких плёнок. Минск. Наука и техника. 1976.

21. Кремков М.В., Беседина Е.А., Шевелев С.В. Диагностика поверхности материалов. Ташкент. Фан. 1997 г.

22. Умирзоқов Б.Е. Қаттиқ жисм юзалари ва чегаравий қатламларнинг тузилишини ўрганиш усуллари». Ўқув қўлланма. ТДТУ. 1997.

23. Данильцев В.М., Гусев С.А. и др. «Осаждение пленок аммония на GaAs в процессе металло-органической газо-фазной эпитаксии». Поверхность. 1996 г. №1. с36-41.

24. Умирзаков Б.Е. и др. «Влияние послеростового прогрева на состав и структуру пленок Si/CoSi₂». Известия. РАН. Москва. 1998 г. №7.

25. Нормурадов М.Т., Умирзаков Б.Е. «Энергетические спектры поверхности твердых тел, имплантированных ионами низких энергий». Тошкент. Фан. 1989 г. 158 с.

26. Шульман А.Р., Фридрихов С.А. "Вторично-эмиссионные методы исследования твердого тела". — М., Наука, 1977.

27. Palmberg P.W. — The Structure and Chemistry of Solid Surface ed. G.A. Somorjai, New York, 1969, p. 29.

28. Кремков М.В. Корпускулярная низкоэнергетическая диагностика поверхности твердого тела. Ташкент. Фан, 1989, 163 с.

29. Кришнер И. Применение электронной спектроскопии для анализа поверхности. Под ред. Х. Ибаха. Рига, Зиматке, 1980. 318 с.

30. Бажанова Н.П., Кораблев В.В., Кудинов Ю.А. Актуальные вопросы вторично-эмиссионной спектроскопии. Л., ЛГП им. М.И. Калинина, 1985, 85 с.

31. Lourence E.D., McDonald N.C., Palmberg W.P. at all. Handbook of Auger electron spectroscopy. — Mlaresolg Phys. Electron. Indust. 1976, p. 252.

32. Нормурадов М.Т., Умирзоков Б.Е., Ражаббаев Р.Р. Қаттиқ жисм сиртларининг иккиламчи электрон спектроскоп. Ўқув қўлланма. Тошкент: Конструктор, 1993. 85-б.

33. Комолов С.А. Интегральная вторично-электронная спектроскопия. Л: Изв. ЛГУ. 1986. 178 с.

34. Применение электронной спектроскопии для анализа поверхности. Под ред. Ибаха Х. Рига, Знатце. 1980.

35. Умирзоков Б.Е. Қаттиқ жисм юзаларини текшириш усуллари. Тошкент. ТашГТУ. 1997. 62 б.

36. Лютович А.С. Ионно - активированная кристаллизация пленок. Тошкент. Фан. 1982. 148с.

37. Барыбин А.А., Сидоров В. Г. Физико-технологические основы электроники. Санкт-Петербург. Издательство Лань. 2001. 527с.

38. Перспективные радиационные-пучковые технологии обработки материалов. Под ред. Калина Б.А. М.. Издательский дом "Круглый год". 2001. 527с.

МУНДАРИЖА

Сўз боши	3
1 б о б. Электрон техника материаллари технологияси ва хом ашё материалларини қайта ишлашдаги асосий жараёнлар	
1.1. Электрон техника материаллари технологиясидаги асосий жараёнларнинг умумий характеристикалари.....	5
1.1.1. Технологик жараёнлар, асосий тушунчалар.....	5
1.1.2. Электрон техника материаллари технологиясида моделлар тизими.....	7
1.1.3. Ҳисобловчи технологик тажриба тушунчаси.....	9
1.1.4. Технологик жараёнларни моделлаш ва оптимал бошқариш.....	10
1.2. Иссиқлик узатиш жараёнлари.....	11
1.2.1. Иссиқликнинг ўтказувчанлик ҳисобига иссиқлик узатиш.....	12
1.2.2. Иссиқлик нурланиши ҳисобига иссиқлик узатилиши.....	13
1.2.3. Иссиқликнинг конвекция ҳисобига узатилиши.....	15
1.3. Масса узатиш жараёни.....	17
1.4. Вазнсизлик шароитида иссиқлик ва масса узатиш жараёни.....	20
1.5. Кимёвий жараёнлар.....	21
1.6. Қаттиқ фазали реагент ва маҳсулотларнинг актив ҳолати.....	23
1.7. Технологик ёниш.....	24
1.8. Хом ашё материалларини қайта ишлаш жараёнларининг физик-кимёвий асослари.....	25
1.8.1. Қаттиқ жисмларни майдалаш ва ажратиш жараёнлари.....	25
1.8.2. Ажратиш ва тозалаш жараёнларининг асослари.....	27
1.8.3. Сорбция жараёнлар ёрдамида моддаларни ажратиш ва тозалаш.....	30
1.8.4. Суюқ экстракция жараёнлари ёрдамида ажратиш.....	36
1.8.5. Кристалланиш жараёнлари ёрдамида тозалаш.....	38

1.8.6. Газ фазаси орқали ҳайлаш жараёнлари ёрдамида тозалаш.....	46
1.9. Қотиш жараёнларининг физик- кимёвий асослари.....	55
1.9.1. Кристалл муртакнинг ҳосил бўлиши.....	55
1.9.2. Муртакнинг ҳосил бўлиш жараёнлари ва шишалан- ниш.....	61
1.10. Кристаллларнинг ўсиш механизми ва кинетикаси.....	65
1.10.1. Бўлиниш сиртлари структураси.....	65
1.10.2. Кристалллар ўсишининг сирт кинетикаси.....	69
1.10.3. Кристаллларнинг ўсиш жараёнига киришмалар- нинг таъсири.....	72
1.10.4. Кристаллларнинг ўсиш жараёнларини тезлашти- ришнинг замонавий усуллари.....	72

И б о б. Яримўтказгичли ва диэлектрик материалларнинг монокристалларини олиш технологияси

2.1. Қаттиқ фазадан кристаллларни ўстириш.....	75
2.2. Суюқ фазадан кристаллларни ўстириш.....	76
2.2.1. Эритмаларни нормал йўналишли кристаллаш усуллари.....	77
2.2.2. Кристаллларни эритмадан тортиб ўстириш усуллари.....	80
2.2.3. Зонали эритиш усуллари.....	83
2.3. Газ фазасидан кристалллар ўстириш.....	86
2.4. Профилли монокристаллар ҳосил қилиш.....	87
2.4.1. Шакллантиришнинг асосий принциплари.....	87
2.4.2. Степанов усули билан профилли кристалллар ўсти- риш технологиясининг хусусиятлари.....	89
2.5. Монокристалл ўстиришда технологик жараёнларни бошқариш.....	90
2.6. Асосий монокристалл материаллар технологияси.....	92
2.6.1. Кремний монокристаллини олиш технологияси.....	92
2.6.2. Арсенид галлий монокристаллини олиш техноло- гияси.....	96
2.7. Монокристалл материаллар технологияси.....	98
2.7.1. Шишасимон ҳолат ва унинг хоссалари.....	98
2.7.2. Шиша пиширишнинг физик-кимёвий асослари.....	101
2.7.3. Шиша маҳсулотлари технологияси.....	105
2.8. Керамика ва шишакерамика материаллар техно- логияси.....	106

2.8.1. Керамикали материаллар технологиясининг асослари.....	106
2.8.2. Энг асосий керамик материаллар технологияси.....	109
2.9. Ситаллар технологияси.....	114
2.10. Яримўтказгич ва диэлектрик материаллар монокристалларини легирлашнинг физик-кимёвий асослари.....	118
2.10.1. Кристалларни қаттиқ фазада легирлаш.....	118
2.10.2. Кристалларни суюқ фазадан ўстириш жараёнида легирлаш.....	120
2.10.3. Кристалларни газ фазасидан ўстириш жараёни давомида легирлаш.....	135

III б о б. Электрон асбоблар ва қурилмалар ишлаб чиқариш технологияси

3.1. Электрон асбоблар ва қурилмалар ишлаб чиқаришда технологиянинг роли.....	138
3.2. Яримўтказгичли асбоблар ва интеграл микросхемалар ишлаб чиқаришнинг умумий технологик схемаси.....	142
3.2.1. Электрон асбоблар, қурилмалар ва интеграл микросхемалар ишлаб чиқаришда асосий технологик операцияларининг қисқача тавсифи.....	142
3.2.2. Микросхемалар ишлаб чиқариш жараёнига қўйиладиган талаблар.....	145
3.3. Пластина ва тагликларни тайёрлаш.....	147
3.3.1. Пластина ва тагликларга қўйиладиган талаблар.....	147
3.3.2. Яримўтказгичли ва диэлектрик материалларга механик ишлов бериш.....	151
3.3.3. Пластина ва тагликларни тайёрлаш маршрутлари.....	152
3.3.4. Пластина ва тагликларга механик ишлов бериш.....	155
3.3.5. Тагликлар ва пластиналар сиртидаги ифлосликлар ва улардан тозалаш усуллари.....	158
3.3.6. Пластина ва тагликлар сифатини назорат қилиш.....	163
3.4. Яримўтказгичли қатламлар ва ўтишларни ҳосил қилиш усуллари.....	164
3.4.1. Яримўтказгичли структураларнинг турлари, уларни ҳосил қилиш физикаси ва технологияси.....	164
3.4.2. Структураларни қотишма ҳосил қилиш усули	

билан олиш.....	167
3.4.3. Юпқа қатламни ва структураларни эпитаксиал ўстириш усули билан ҳосил қилиш.....	168
3.4.4. Структураларни диффузия усули билан ҳосил қилиш.....	176
3.4.5. Ион имплантация усули билан структуралар ҳосил қилиш.....	196
3.4.6. Лазерли технология асослари.....	210
3.5. Микросхема топологиясини шакллантириш усуллари.....	218
3.5.1. Фотолитография усулининг моҳияти.....	218
3.5.2. Фоторезистлар.....	219
3.5.3. Фотошаблонлар ва уларни тайёрлаш технологияси.....	220
3.5.4. Фотшаблонларни саноатда тайёрлаш	223
3.5.5. Фотшаблонларни назорат қилиш	224
3.5.6. Фоторезисторли тагликларда тасвир ҳосил қилиш усуллари.....	224
3.6. Юпқа қатламлар ҳосил қилиш усуллари.....	225
3.6.1. Термовакuumли буглантириб ўтқазиш	225
3.6.2. Ҳимоялашда қўлланиладиган диэлектрикли юпқа қатламлар.....	227
3.6.3. Юпқа қатламларни ҳосил қилиш техникаси.....	235
3.7. Кремнийли структураларга элементлараро бирикмалар ва контактлар ҳосил қилиш.....	236
3.7.1. Металл бирикмалар	236
3.7.2. Алуминийли ўзаро бирикмалар	236
3.7.3. Омик контактлар.....	237
3.8. ИМСларни конструкциялаш ва тайёрлаш босқичлари.....	237
3.8.1. Юпқа плёнкали ИМС (ГИС)ларни тайёрлаш технологиясининг умумий (типовой) маршрутлари.....	238
3.8.2. Қалин плёнкали гибрид интеграл микросхемалар технологияси.....	241
3.8.3. Биполяр ИМС ларни тайёрлаш технологияси...244	
3.8.4. Майдонли ИМС ларни тайёрлаш технологияси...250	
3.9. Яримўтказгичли структуралар сиртини ҳимоялаш.....	254
3.10. Электрон асбоблар ва қурилмаларни йиғиш.....	255

IV б о б. Юпқа қатламлар физикаси ва технологияси

4.1. Юпқа қатлам технологияси ҳақида умумий тушунчалар.....	261
4.2. Адсорбция. Физик ва кимёвий адсорбция.....	262
4.3. Юпқа қатламларда марказлар (муртақлар) ҳосил бўлиш назарияси.....	264
4.4. Эпитаксиал плёнкалар олиш усуллари.....	273
4.4.1. Кубик панжарали материалларни эпитаксиал ўстириш.....	274
4.4.2. Молекуляр-нурли эпитаксия (МНЭ).....	278
4.4.3. Қаттиқ фазада эпитаксия (ҚФЭ) ва реактив эпитаксия (РЭ).....	281
4.5. Юпқа қатламларда физик жараёнлар кечишининг ўзига ҳослиги. Электрон қурилма ва асбобларини юпқа плёнкалар асосида кичиклаштириш истиқболлари.....	284
4.6. Юпқа плёнкалар олишнинг босқичлари. Ўсиш кинетикаси.....	285
4.7. Поликристалл плёнкаларнинг ўсиш жараёнида нуқсонларнинг вужудга келиши.....	288
4.8. Монокристалл плёнкалардаги нуқсонлар.....	291
4.9. Кремний эпитаксиал қатламларида кристаллографик нуқсонлар.....	292
4.10. Кобальт кремний (CoSi_2)ни кремний юзасида эпитаксиал ўстириш.....	293
4.11. Эпитаксиал қатламларнинг профил бўйича кимёвий таркиби.....	296
4.12. МНЭ технологиясининг асосий афзалликлари.....	298
4.13. Ионли активлаштириш усули билан қаттиқ жисм юзаларида юпқа плёнкалар ҳосил қилиш.....	299
4.14. Ион имплантация усули.....	301
4.15. Металлорганик бирикмалар асосида газ фазада эпитаксия усули.....	306

V б о б. Қаттиқ жисм юзаларини ва юпқа қатламларни ўрганиш усуллари

5.1. Умумий маълумотлар.....	308
5.2. Оже-электронлар спектроскопияси.....	310
5.2.1. Қаттиқ жисмнинг электрон тузилиши. Электрон сатҳларнинг белгиланиши.....	310
5.2.2. Оже-жараён.....	312

ҚАЙДЛАР УЧУН

