

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

ГУЛИСТОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

УМУМИЙ ФИЗИКА КАФЕДРАСИ

Д.Кушоқовнинг 5440100-“Физика” таълим

йўналиши бўйича бакалавр даражасини олиш учун

**“ $pSi - n(Si_2)_{1-x}(ZnSe)_x$ гетероструктуранинг
вольтампер характеристикасини ўрганиш”**

мавзусидаги битирув малакавий иши

Илмий раҳбар:

**проф. Саидов А.С. физика-
математика фанлари доктори, ЎзР
ФА Физика-техника
институтининг етакчи илмий
ходими.**

ГУЛИСТОН – 2014 й.

Мундарижа

Кириш.....	3
------------	---

1-Боб.

1- §. Кремний ва рухселен моддаларининги электрофизик хоссалари.....	5
2-§. Электрон – ковак ўтиш.....	6
3-§. <i>p-n</i> ўтиш турлари.....	9

II Боб.

1-§. Эпитаксиал ўстиришнинг асосий усуллари.....	10
2-§. Эпитаксиал қатламлар олиш қурилмалари.....	13
3- §. Эпитаксиал усуда $A^3 B^5$ турдаги яримўтказгичли бирикмаларни ўстириш технологияси.....	16
4 §. $(Si_2)_{1-x} (ZnSe)_x$ эпитаксиал қатламларни ўстириш.....	21
5-§. Эпитаксиал усулда $(Si_2)_{1-x} (ZnSe)_x$ қатламларини ўстириш тажрибалари баёни.....	25

III Боб.

1 §. $pSi-n(Si_2)_{1-x} (ZnSe)_x$ гетероструктуранинг вольтампер характеристикаси.....	26
2 §. $pSi-n(Si_2)_{1-x} (ZnSe)_x$ гетероструктуранинг вольт-ампер характеристикасига температуранинг таъсири.....	30
ХУЛОСА	33

Фойдаланилган адабиётлар рўйхати

КИРИШ.

Мавзунинг долзарблиги. Яримўтказгич моддалар ўзининг тузилиши жихатдан каттиқ жисмлар гуруҳига киради. Лекин улар ўзининг катор хоссалари билан бошқа каттиқ жисмларга нисбатан фан, техника ва турмушда тобора кенг кўламда қўлланилиб бормоқда. Бунинг асосий сабаблари яримўтказгич моддаларнинг ўлчамлари, ҳажми кичик, ишлаш муддати катта ва ишончли, ташқи таъсирларга чидамли ва бажарадиган хизматлари доираси жуда кенг.

Ҳозир яримўтказгичлар қўлланилмайдиган соҳа топилмайди. Яримўтказгичлардан тайёрланган асбоблар эндиликда автоматика, радиоэлектроника, телевидения, компьютер техникаси каби турмушимизнинг равнақи ва муҳташамлигини белгилаб бераётган соҳалардаги ишлаб чиқаришнинг асосини ташкил этади. Яримўтказгич асбоблар ишлатилган ва қишлоқ хўжалигида температурани аниқ ўлчашда, тупроқнинг намлигини аниқлашда, ўсимлик ва ҳайвонларнинг энг муҳим хусусиятларини баҳолашда ва бошқа ишларни бажаришга яроқли қурилмалардан фойдаланиш кўлами кенгайиб бормоқда.

Яримўтказгичлардан тайёрланган фотоэлементлар (куёш батереялари) куёшдан келаётган ёруғлик энергиясини бевосита электр энергиясига айлантириб боришига имкон туғдирган бўлса, термоэлементлар (термогенераторлар) куёшнинг иссиқлик энергияси ҳисобига электр энергияси олишга ёрдам бермоқда. Улар атроф-муҳитни ифлослантирмай, заҳиралари тугаб бораётган қазилма бойликлардан олинаётган ёнилғилардан фойдаланмасдан, тузилиши жихатидан содда бўлган электр энергияси манбалари ҳисобланади.

БМИнинг мақсади. Ушбу БМИ да яримўтказгичлик хоссасига эга бўлган янги типдаги моддани ўстириш технологиясини ва унинг тузилиши, электрофизик хоссаларини ўрганиш **мақсад** қилиб қўйилган. Бундай модда

кремний монокристаллидан иборат тагликда суюқ фазадан эпитаксия усули билан ўстирилган рух ва селен қатламларидан иборат $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ бирикмалар ҳисобланади.

Мавзунинг илмий янгилиги шундаки, $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ бирикмалар деярлик-ўрганилмаган. Лекин шу бирикмалар асосидаги тузилмалар ҳозирги пайтда ҳам назарий, ҳам амалий жиҳатдан микро- ва оптоэлектроника учун муҳим аҳамиятга эга бўлиши кўрсатиб берилмоқда.

$(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ суюқ фазадан эпитаксия йўли билан ўстирилади. Шу сабабли ушбу ишда яримўтказгичли кристаллар, уларни ўстиришнинг усуллари, технологиялари ва олинган $\text{pSi-n}(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ гетероструктуранинг вольтампер тавсифномаси батафсил ёритиб берилади. Ишнинг сўнгги қисмларида $\text{pSi-n}(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ гетероструктуранинг вольтампер тавсифномасига температуранинг таъсири ва унинг натижасида юзага келувчи ўзгаришлар таҳлил қилинади.

Малакавий битирув иши кириш, учта боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат.

I БОБ

1-§. Кремний ва рух селен моддаларининг электрофизик хоссалари

Кремний. Кремний (Si) – даврий системанинг IV гуруҳ элементи булиб, у табиатда кислороддан кейинги энг куп тарқалган элементдир. У ер массасининг $\frac{1}{4}$ қисмини эгаллайди. 25°C даги чизиқли кенгайиш коэффициентлари – $4,2 \cdot 10^{-6}$, иссиқлик ўтказувчанлиги $0,2 \text{ кал/с} \cdot \text{см} \cdot ^{\circ}\text{C}$, эриш температураси - 1688 К , қайнаш температураси эса – 2623 К га тенг. Кремнийнинг эриш иссиқлиги – $50,6 \text{ кЖ/моль}$, буғланиш иссиқлиги эса – 183 кЖ/моль га тенг.

Унинг бир молининг ҳажми - $12,1 \text{ см}^3/\text{моль}$, зичлиги – $2,33 \text{ г/см}^3$. Кремний куйидаги электрофизик хоссаларга эга, диэлектрик сингдирувчанлиги – 12 , 300 К ҳароратдаги электронларнинг дрейф ҳаракатчанлиги – $1350 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, тешиқларнинг дрейф ҳаракатчанлиги эса – $500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Солиштирма қаршилиги хона ҳароратида, $99,99 \%$ тозаликдагиси - $10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ гача булади, эркин заряд ташувчилар концентрацияси эса – $1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Кремний ҳозирги вақда жуда кенг ўрганилган, ва жуда кенг соҳаларга татбиқ этилган намунавий яримўтказгич ҳисобланади. Унинг фойдаланиш имконияти нафақат микроэлектрон соҳага балки квант компьютерларда, алоқа соҳаларида ҳам жадал фойдаланилади.

Рух селен. Рух селен Менделеев даврий жадвалида II ва VI гуруҳ элементлар бирикмаси ҳисобланади. Унинг зичлиги – $5,27 \text{ г/см}^3$ га тенг, эриш температураси – 1525°C , хона ҳароратида иссиқлик ўтказувчанлик коэффициенти – $18 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$, иссиқликдан чизиқли кенгайиш коэффициенти эса – $7,1 \cdot 10^{-6} 1/\text{К}$ га тенг, унинг моляр массаси – $144,33 \text{ г/мол}$.

Рух селен кенг тақиқланган соҳали яримўтказгич бўлиб, унинг тақиқланган соҳа кенглиги $2,7 \text{ эВ}$ га тенг. Унинг 300К ҳароратдаги электронлар дрейф ҳаракатчанлиги – $700 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ га, тешиқларнинг дрейф ҳаракатчанлиги эса –

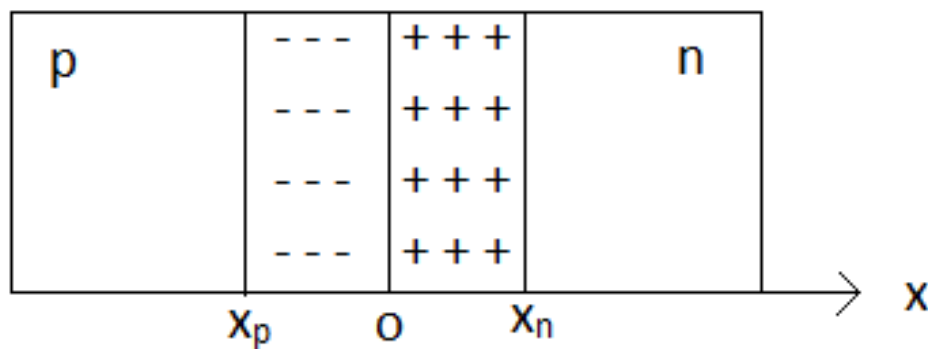
15 см²/В·с га тенг. Рух селен 0,5 – 13 мкм соҳада инфрақизил оптик асбобларда жуда кенг фойдаланилади.

2-§. Электрон – ковак ўтиш

Яримўтказгичнинг физикавий моделини ўрганиш жараёнида кўрсатилганидек, яримўтказгич кристаллари икки тур: донор киришмалар мавжудлиги туфайли вужудга келадиган электрон (n-тур) ва акцептор киришмалар туфайли вужудга келадиган ковак(p-тур) ўтказувчанликка эга бўлиши мумкин. Ҳар хил ўтказувчанликка эга бўлган иккита яримўтказгич орасидаги контактни кўриб чиқайлик. Бири p-тур ва иккинчиси n-тур ўтказувчанликка эга бўлган яримўтказгичларўзаро контактга келтирилса, электрон-ковак ўтиш ёки қисқача қилиб айтилганда, p-n ўтишосил бўлади. Ом қонуни ўринли бўлган бир жинсли яримўтказгичлардан фарқли равишда, электрон-ковакўтиш нөчизийй вольт-ампер тавсифномага эга бўлади. Ўзининг шу ва бошқа қатор хусусиятларига кўра p-n ўтиш ҳозирги замон кўпчилик яримўтказгич асбоблар диодлар, бикутбий ва майдоний транзисторлар, динистор, тиристор, ёрулик қабулқилгич ва бошқаларнинг ишлаш тамойилларига асосланади. Ўз-ўзидан равшанки, p-n ўтиш ҳосил қилиш учун яримўтказгичларни оддий механик контактга келтиришнинг ўзи кифоя қилмайди. Бунинг учун яримўтказгич яхлит кристалида p- ва n-соҳалари оралиғида етарли даражада кескин чегара мавжуд бўлган тузилма олишни таъминловчи мураккаб технология зарурдир.

Электрон-ковак ўтишнинг ҳосил бўлиши: p-n ўтиш ҳосил бўлишида юзага келадиган физик жараёнларни кўриб чиқайлик. Фараз қилайлик, яримўтказгичнинг p- ва n-соҳалари $0 = x$ текислик билан ажралган бўлсин (1-расм). Чап соҳада асосан акцептор киришмалар бўлиб, у ковак ўтказувчанликка, ўнг соҳада эса, асосан донор киришмалар бўлиб, у электрон ўтказувчанликка эга бўлсин. $0 = x$ текисликда контакт бўлмаган шароитда p- ва n-соҳалардаги коваклар ва электронлар концентрацияси бир-биридан кескин фарқ қилади: p-соҳадаги коваклар концентрацияси уларнинг n-соҳадаги концентрациясига қараганда анча кўп, n-соҳадаги

электронларнинг концентрацияси уларнинг p-соҳадаги концентрациясидан анча кўп бўлади.



Расм 1. p-n ўтишда зарядларнинг жойлашиши

Масалан, яримўтказгич модда сифатида хусусий кремний кристали ишлатиладиган бўлса, p-n ўтиш ҳосил қилиш учун, одатда, унинг бир соҳасига тахминан $N_a=10^{17} \text{ см}^{-3}$ аконцентрацияда акцептор киришма, иккинчи соасига эса, $N_g=10^{15} \div 10^{16} \text{ см}^{-3}$ концентрацияда донор киришма киритилади. Демак, хона температураси ($T=300 \text{ K}$) шароитида p-соҳадаги асосий заряд ташувчилар коваклар концентрацияси $p=10^{17} \text{ см}^{-3}$ га, ноасосий заряд ташувчилар электронлар концентрацияси тахминан $n=10^{13} \text{ см}^{-3}$ га тенг, n-соҳадаги асосий заряд ташувчилар электронлар концентрацияси $10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$ га, шу соҳадаги коваклар концентрацияси эса, мос равишда $10^5 - 10^4 \text{ см}^{-3}$ га тенг бўлади. p-n ўтиш олиш учун асос сифатида германий олинадиган бўлса, бу катталикларнинг сон қиймати қуйидагича бўлади:

$$p_p=10^{17} \text{ см}^{-3}, n_p=10^9 \text{ см}^{-3}; p_n=10^{15} \text{ см}^{-3}, n_n=10^{11} \text{ см}^{-3}.$$

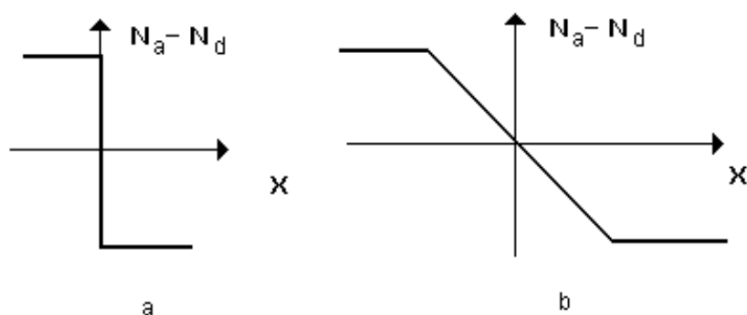
Асосий ва ноасосий заряд ташувчилар концентрациялари нима учун шундай сон қийматларига эга эканлигини билиш учун, тегишли яримўтказгич учун берилган температурада уларнинг кўпайтмаси ўзгармас катталикка тенг эканлигини, яъни $p_p p_n = n_p n_n = n_i^2$ канлигималум. Маълумки, кремний учун $n_i=2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ га, германий учун эса $n_i=2,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Келтирилган мисоллардан кўринишича, ҳоҳ кремний, ҳоҳ германий бўлсин, p- ва n- соҳалардаги коваклар концентрацияси ва шу солардаги электронлар концентрацияси ўзаро кескин-кремний учун $10^{11} - 10^{12}$ марта, германий учун эса 10^6 марта фарқ қилади. p- ва n-соҳалардаги заряд

ташувчилар концентрациясининг бундай фарқи, заряд ташувчиларнинг иссиқлик ҳаракати натижасида одир бўладиган диффузия жараёнини-ковакларнинг, уларнинг концентрацияси кўп бўлган p-соҳадан концентрацияси кам бўлган соҳага ва электронларнинг, улар концентрацияси кўп бўлган n-соҳадан концентрацияси кам бўлган p-соҳага диффузиявий ўтишини вужудга келтиради. Коваклар ва электронларнинг ундай диффузияси p-соҳада акцептор киришмалар ионларининг манфий ҳажмий зарядини, n-соҳада эса, донор киришмалар ионларининг мусб ҳажмий зарядини ҳосил қилади. Ундан ташқари диффузия йўли билан мос равишда p-соҳадан n-соҳага ҳамда n-соҳадан p-соҳага оқиб ўтган коваклар ва электронлар ҳам асосан p-n ўтиш соҳасига мужассамлашган. Ана шу айтилган зарядлар иккала соҳа чегарасидаги юпқа қатламларда – ҳажмларда жойлашади. Шунинг учун уларни ҳажмий зарядлар деб атайдилар. Бундай ҳажмий зарядлар n-яримўтказгичдан p-яримўтказгичга қараб йўналган электрик майдонни вужудга келтиради. Бу майдон асосий заряд ташувчиларнинг бир соҳадан иккинчи соҳага диффузия йўли билан ўтишига қаршилиқ қилади ва ноасосий заряд ташувчиларнинг дайдиш токини электронларнинг p-соҳадан n соҳага ва ковакларнинг n-соҳадан p-соҳага кўчишини вужудга келтиради. Майдон ҳали етарли даражада катта бўлмаган ҳолларда электрон коваклар диффузияси ва иккиламчи қатлам зарядининг ортиши давом этади. Бу жараён заряд ташувчилар диффузияси ва дайдиши ўртасида мувозанат юзага келгунча давом этади. Бунда диффузиявий тоқлар нолга айланмайди, балки уларнинг таъсири дайдиш тоқлари туфайли бетарафлашади, шунинг учун бу мувозанат динамик мувозанат деб аталади. Ушбу ҳолатга ҳажмий заряд қатламининг маълум кенглиги, ички электрик майдоннинг аниқ қиймати мос келади. Шундайқилиб, p- ва n- соҳалар орасида, яъни ҳажмий зарядлар қатламларининг чегаралари орасида маълум потенциаллар фарқи вужудга келади. У p-n ўтишдаги контакт потенциаллар фарқи деб аталади. Шундайқилиб, электрон-ковак ёки p-n ўтиш бу турли хил ўтказувчанликка

эга бўлган иккита яримўтказгич чегарасида ҳажмий заряд ва ички электрик майдон жойлашган қатламдир. 1-расмда $p-n$ ўтиш тузилмаси ва унинг ҳосил бўлиш жараёнлари кўрсатилган. Унда координата боши $0 = x$ ўтишнинг технологик чегарасига жойлашган $x = -x_p$ ва $x = x_n$ координаталар эса, мос равишда ўтишнинг p - ва n - соҳалардаги чегараларини ифодалайди.

3-§. $p-n$ ўтиш турлари

Юқорида таъкидлаганимиздек, аксари кўпчилик яримўтказгич асбобларнинг ишлаш тамойили асосида электрон-ковак ўтишнинг хусусиятлари ётади. Бу хусусиятлардан асосийси $p-n$ ўтиш электр ўтказувчанлигининг тўғри ва тескари йўналишларда ($p-n$ ўтиш электрик занжирга тўғри ва тескари уланганда) турлича эканлигида бўлиб, у кўп жиҳатдан p - ва n - соҳалар орасидаги чегаравий қатлам кенглигига боғлиқдир.



Расм 2. $p-n$ ўтиш (а-кескин ўтиш; б-силлиқ ўтиш)да киришмалар концентрациясининг тақсимооти

Агар киришмалар концентрациясининг ўзгариши асосан $p-n$ ўтиш кенглигига нисбатан кичикроқ масофадаюз берса, ўтиш кескин ҳисобланади. Бунда киришмалар концентрацияси 2а-расмда кўрсатилганидек деярли сакрабўзгаради. Бошқа хил $p-n$ ўтишларда киришмалар концентрацияси аста секин силлиқ (2б-расм) ўзгаради. Шунинг учун уларнинг тўғрилаш хусусияти яхши бўлмайди. $p-n$ ўтишда киришмалар концентрациясининг тақсимооти ўтишлар, шунингдек, $p-n$ соҳалардаги асосий заряд ташувчилар концентрацияларининг ўзаро нисбатига қарабам турларга ажратилади. Бунда n - ва p -соҳалардаги асосий заряд ташувчилар концентрациялари бир хил

бўлган симметрик ўтишларга ҳамда n - ва p - соҳалардаги асосийзаряд ташувчилар концентрациялари турлича ($p \gg n$ ёки $n \gg p$) бўлган носимметрик ўтишларга ажралади. Соҳалардаги асосий заряд ташувчилар концентрацияси бир-биридан бир неча тартибга (масалан, $10^2 \div 10^3$ марта) фарқ қилувчи ўтишлар энг кўп қўлланилади.

II Боб.

1-§. Эпитаксиал ўстиришнинг асосий усуллари.

Яримўтказгичли асбоблар ва ИМС лар тайёрлаш технологиясида яримўтказгич материалга баъзи қарама-қарши талаблар қўйилади. Масалан, импульсли диодларда тешилиш кучланишини ошириш учун яримўтказгич пластинанинг солиштира қаршилигини ошириш керак, у эса иккинчи томондан, ёйилма оқим қаршилиги ўсишига, асбобнинг импульс хоссалари ва тезкорлигини ёмонлаштиради. Транзисторлар тайёрлаш технологиясида ҳам муаммолар мавжуд. Масалан, коллектор соҳасининг солиштира қаршилигини катта бўлиши юқори тешилиш кучланиши олишига имкон беради, бироқ коллектор ҳажмида катта миқдордаги зарядлар тўпланишига олиб келиб, транзистор тезкорлигини камайтиради ва коллекторнинг катта кетма-кет қаршилиги транзистор қувватини чегаралаб қўяди. Худди шундай муаммолар бошқа яримўтказгичли асбоблар ва ИМС лар тайёрлашда ҳам учрайди. Эпитаксия усули яратилиши бундай муаммоларни ечишда анчагина имконият берди.

Эпитаксиал жараённинг уч гуруҳи: авто-, гетеро- ва хемоэпитаксия кўринишлари маълум.

Автоэпитаксия (гомоепитаксия)- таглик моддадан кимёвий фарқ қилмайдиган, тузилиши бўйича бир хил бўлган таглик сиртида йўналиши кристалл қатлам ўстириш жараёнидир. Бу жараёнда гомоген электрон-ковак тузилма пайдо бўлиши имкони яратилади.

Гетероэпитаксия-кристаллокимёвий ўзаро таъсир натижасида таглик модда таркибидан фарқ қиладиган модда қатламининг йўналишли ўсиши

жараёнидир. **Хемоэпитаксия**- ташқи муҳитдан келувчи модда билан тагликнинг ўзаро кимёвий таъсиридан янги фаза ҳосил бўлагани ҳолда модданинг йўналиши ўсиши жараёнидир. Ҳосил бўлган хемоэпитаксиал қатлам, таркиби бўйича, таглик моддадан ва сиртга келувчи моддадан фарқ қилади.

Ўсувчи қатлам ҳосил бўлишидаги физик-кимёвий ҳодисалар табиати фарқи бўйича эпитақсиянинг учта асосий технологик усуллари мавжуд:

- 1) вакуумда молекулалар оқимидан молекулар-нур эпитақсия;
- 2) газ ёки буғ-газ аралашмасида кимёвий ўзаро таъсир оқибатида юз берадиган газ фазади эпитақсия;
- 3) эритиш ёки суюқ фазадан рекристалланиш йўли билан суюқ фазада эпитақсия.

Энди қисқача бу учта усулнинг асосий хусусиятларини кўриб чиқамиз.

Молекулалар-нур эпитақсияси. Вакуумда молекулалар-нурлар оқимидан ҳосил қилинадиган эпитақсия модданинг тўғри кўчишидан содир бўлади. Модда-манба юқори вакуумда фокусланган электрон нур оқими ёрдамида молекулар заррачалар оқимини узлуксиз буғлатиб (оралик ўзаро таъсирсиз) тагликка етказиб берилади. Таглик сиртга ўтирган яримўтказгич зарралари молекулар ўзаро таъсир остида яримўтказгич кристали йўналишини аниқловчи тўғри тизимни ҳосил қилади. Эпитақсиал қатлам ўсиши сирт бўйлаб юз беради ва ўсувчи қатлам таглик тизимини қайтаради.

Молекулар-нур эпитақсиясининг бошқа тури –бу субримацияи усулидир. Бу усулда тагликдан бир неча юз микрометр нарида жойлашган яримўтказгични элеткр токида қиздириш билан буғлантириб эпитақсиал қатлам ҳосил қилинади. Бу ҳолда намуна-манба суюлмайди, фақат буғланиш ва унинг тагликка кўчиши юз беради. Олинган қатлам ўта юқори солиштирма қаршиликка эга бўлади, Чунки вакуумли камерада киришмалар кам бўлади. Бироқ, бу усулнинг унумдорлиги кичик бўлганлиги учун ишла чиқаришда қўлланилмайди.

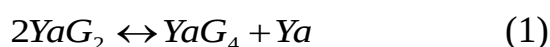
Газ фазада эпитаксия. Газ фазада яримўтказгич атомлари кимёвий бирикмалар таркибида кўчиб, кимёвий ўзаро таъсир ёрдамида ажралиб тагличка ўтиради.

Кимёвий бирикмада элементар яримўтказгичлар-германий ва кремний катнашиши мумкин. Ишлаб чиқариш шароитида эпитаксиал қатламларни олишда кимёвий усуллар анча кенг қўлланилади.

Газ фазада эпитаксиал ўсишнинг механизмларидан икkitасини кўриб ўтиш мумкин. Биринчи механизмга асосан, тагличкада яримўтказгич таглич сиртида катализ диссоциация реакцияси натижасида ҳосил бўлади. Иккинчисига асосан, тагличдан юқорироқда яримўтказгич бирикмалари парчаланиши содир бўлади. Газ фазада диффузия йўли билан яримўтказгич заррачалар тагличка етиб боради.

Яримўтказгич атомларнинг ажралиб чиқиш кимёвий реакцияларни тўртта гуруҳга ажратиш мумкин:

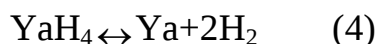
1. Галоид бирикмаларнинг диссоциацияланиши



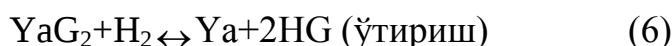
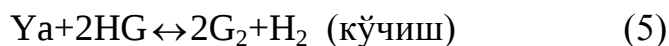
2. Галоид бирикмаларни водород билан тиклаш реакцияси



3. Қиздириш натижасида бирикмаларнинг парчаланиши-пиролиз (иссиқ сочилиш)



4. Иккита босқичда ўтувчи кимёвий кўчиш реакцияси



Бу ердаги барча реакциялар қайтравчи. Реакция қайтиши йўналиши ва ўтириш тезилиги бошланғич моддалар зичлиги ва жараён режимида боғлиқ.

Суюқ фазада эпитаксия. Суюқ фазада эпитаксия усули тўйинган яримўтказгич материал эритмасидан яримўтказгич монокристалл қатламини ўстиришдан иборат. Эритмага чўктирилган яримўтказгич таглич сиртида уни

совитиш натижасида кристалланиши юз беради. Кўпчилик ҳолларда суёқ фазадан кристалланишда эритувчи сифатида яримўтказгич суёқ ҳолатида эрувчанлиги юқори бўлган металл, масалан, Al-Si ёки Au-Si тизимдан фойдаланилади. Яримўтказгич бирикмаларининг суёқ фазада эпитаксиясини олиш учун эритувчилар сифатида осон эрувчи бирикма таркибловчилари, масалан, GaAs ва GaP учун Ga қўлланилади. Бу эса кристалланиш температураси камайишига, таглик-эритма чегарасида температура градиенти камайишига олиб келади ва ўстирилган қатлам тозалигини оширади.

2-§. Эпитакциал қатламлар олиш қурилмалари.

Ўсувчи эпитаксиал қатламлар сифати кўп жиҳатдан температура ва газодинамик шароитларига боғлиқ. Шунинг учун ўстириш усулларига юқори талаблар қўйилади. Эпитаксиал ўстириш жараёни у амалга ошадиган қурилмадаги реакторлар тузилишига боғлиқ. Уларнинг горизонтал ва вертикал хиллари бор.

Горизонтал реактор анча содда тузилишига эга. Бунда буғ –газ аралашма оқими таглик ушлагичга параллел ўтади ва эпитоксиал қатламлар қалинлиги ҳамда солиштирма қаршилиқни ўзгартиришга олиб келади. Бунда текис ўстиришни ҳосил қилиш учун иккита усулдан фойдаланилади: 1) таглик ушлагич газ оқими йўналишига маълум бир бурчак остида жойлаштирилади. 2) таглик ушлагич узунлиги бўйича газни тақсимлаб киритиш.

Вертикал реакторлар конструкцияси яхшилиги қиздириш ва аралашма газ оқими учун анча яхши шароитни таъминлайди. Таглик ушлагичнинг айлантриши иссиқлик ва газодинамик майдонларининг текис тақсимланишига олиб келади. Тўрт қиррали таглик ушлагич ва газ – буғ аралашмани вертикал киритишнинг вертикал реактор қурилмаси кўрсатилган. Юқори унумдорликка эга бўлган ишчиаралашмани горизонтал киритишнинг баробан кўринишидаги вертикал реактори кўрсаилган. Тўрт қиррали графикли таглик ушлагични қиздириш юқори

частотали ток индуктори билан амалга оширилади, реактор кварс найдан иборат. Баробанли таглик ушлагични зангламас пўлатдан тайёрланган реактор ичида резистив элементлар ёрдамида қиздирилади. Бу қиздириш баъзан реакторнинг камчилиги деб аталади.

Халорид усулида эпитаксиал қатламларни олиш қурилмаси берилган.

Легирланган эпитаксиал қатламни олиш учун тетрахлорид кремний ёки легирловчи қўшимчалар n -турни B_{p3} ёки n -турни PSl_3 хосил қилувчи легирловчи қўшимча таркибли аралашма $SiCl_4 + B_{p3}$ ёки $SiCl_4 + PCl_3$ термостат идишда тетрахлорид температураси юқори аниқликда ушлаб турилади. Бу эса, зарурий буғ босимини таъминлайди. Одатда бу температура $0^{\circ}C$ дан паст, чунки $SuCl_4$ жуда учувчи суюқлик.

Системага палладий тозаловидан ўтган водород берилади. Чунки палладий тозалови нам ва кислород қолдиқларидан водородни тозалайди. Палладий ёки платинали тозалов системаси $400^{\circ}C - 450^{\circ}C$ қиздирилган диафрагмадан иборат. Бу диаграмма орқали юқори тезликда атомар водород диффузияланади ва унинг сарфи $1m^3/соат$ ни ташкил қилиб бошқа моддалар бу диафрагма орқали умуман ўтмайди, чунки уларнинг диффузия коэффициенти кичик. Тозалов нуқтаси шудрингдан сўнг $-70^{\circ}C$ ни ташкил этади. Водород 1 крандан - водород сарфини ўлчовчи ротаметр орқали ўтади. 2, 3, 4 кранлар ёпиқ ҳолатда бўлади. Кремнийли тагликлар $1000^{\circ}C - 1200^{\circ}C$ гача қиздирилади ва уларнинг сирти водород оқимида тозаланади. 1 кран ёпилади, 2 ва 3 кранлар очилади. Водород $SiCl_4$ ли идиш орқали ўтади ва реакторга тетрахлорид буғи билан тўйиниб элементар кремний тикланади.

Реаксияда қатнашмаган $SiCl_4$, H_2HCl ва бошқа маҳсулотлар 5 очик кран орқали скрибберга чиқади. Скриббернинг вазифаси заҳарли чиқиндиларни ушлаб қолиш ва водород алангасида ёндириб юборишдан иборат.

Эпитаксиал ўстиришда газ едириш учун 1 кран орқали HCl эпитаксия жараёнидан олдин берилади.

Эпитаксиал ўстириш технологияси пластинкага қўйилган талаблардан келиб чиқади. Бу эпитаксиал қатлами қалинлиги ва легирланиш сатҳ қийматлари (аниқлиги $\pm 5 \div 10\%$) ёмон бўлмаган ҳолда ечилади. Эпитаксиал қатлам қалинлиги талаб даражасидаги такрорийликка эришиш учун ўсиш тезлигининг доимийлигини сақлаш керак. Бунинг учун эса SiClH , SiH_2 асосий моддалар концентрацияси сатҳини бу жараёнда температуранинг ўзгармас ушлаб туриш керак. Эпитаксиал қатлам солиштирма қаршилигининг бир хил бўлишлиги учун қиздириш текис бўлиши керак.

Германий эпитаксиясига қизиқиш германийни кам шовқинли ўта юқори частотали транзисторлар ва гемс яратиш муҳитлигидан келиб чиқади. Чунки, бу асбоблар кремнийни ИМС ларига нисбатан паст температураларда саралироқ ишлайди. Германий эпитаксиал қатламларини ўстиришнинг хлорид усули яхши ўрганилган.

Ўтказиш 800°C да бажарилади ва германий титрохлориди зичлиги $0,2\%$ га яқин бўлади. Аралашма орқали тезлиги танланган қиймати реактор тузилишига, оқим бериш усулига боғлиқ бўлиб, одатда тезлик катталиги 20 см/с дан ошмайди. Эпитаксиал қатламнинг 800°C да ўсиш тезлиги $0,5\text{ мкм/мин}$ ни ташкил қилади. Германий эпитаксиал қатламларни ўстиришнинг гидрид усулида олиш водород муҳитида германий (GeH_4) ёрдамида 700°C температура яқинида ва GeH_4 зичлиги $0,1\%-0,2\%$ бўлганида бажарилади. Ўсиш тезлиги 800°C гача ошиб боради, кейин газ фазада GeH_4 парчаланиш камаяди. GeH_4 нинг газ фазали парчаланишини пасайтириши учун юқори тезликдаги газ оқимидан фойдаланилади. Саноат етарли даражада тоза германий тетрохлоридидан фойдаланганлиги учун солиштирма қарлишиги 15-ҳажмдан катта бўлган эпитаксиал қатламни олиш имконини беради.

Яна камроқ қўлланиладиган усуллардан бири ёпиқ ҳавоси сўрилган кварц найда олишдир. Найда германий тетраэдида GeI_4 бўлиб, бу зона 550°C - 700°C гача қиздирилади. Найнинг иккинчи зонасида германий таглик бўлиб

унинг температураси 300°C - 400°C ни ташкил қилади. Биринчи зонада қуйидаги реакция кетади: $\text{GeI}_4 + \text{Ge} \rightarrow 2\text{GeI}_2$. Германий диодиди тагликка диффузияланиб, қуйидаги реакция содир бўлади:



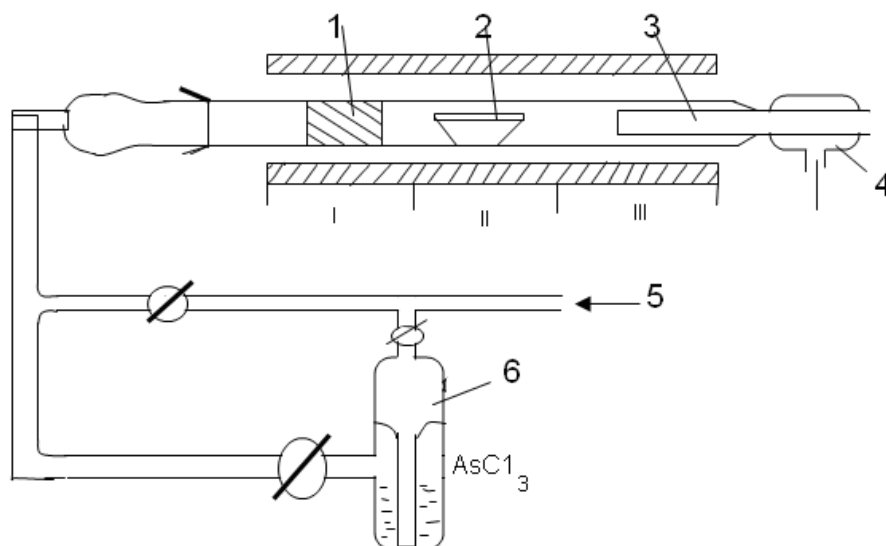
Натижада германий тагликка ўтиради, буғлари эса манба соҳасига диффузияланади ва реакция яна қайтарилади.

3- §. Эпитаксиал усуда $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ турдаги яримўтказгичли бирикмаларни ўстириш технологияси.

$\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ турдаги кимёвий бирикмаларнинг қўлланилиш соҳалари узлуксиз кенгайиб бормоқда. Ҳозирги вақтда оптоэлектроникада информациянинг тасвири тизимлари, нурланиш манбалари ва қабул қилгичлар, яримўтказгичли лазерлар ва бошқалар яратилишида кенг фойдаланилмоқда. Юқоридаги барча қурилмаларда яримўтказгичли тузилма фаол иштирок этади, одатда, энг камида иккита авто ёки гетероэпитаксиал қатлам мавжуд. $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ турдаги бирикмалар ва улар асосидаги қаттиқ эритмаларни уларнинг эриш температураси ва буғланиш босимининг баландлиги туфайли элементлардан тўғридан-тўғри синтез қилиш мураккабдир. Галлий арсениди ҳавода 300°C температурада қиздирилса оксидланади, 600°C дан бошланиб арсеник ажралиб чиқиш билан бирикма буғлана бошлайди. Суюулиш температурасида бу босими 10^5Pa ни ташкил қилади. GaP суюлиш температурасида фосфор буғининг босими $3,5 \cdot 10^6\text{Pa}$ ташкил қилади. Суюлма ҳолидаги GaAs ва GaP барча контейнер материаллар билан жуда фаол ва ўзаро таъсирда бўла бошлайди. $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ технологиясида қўлланилаётган сунъий қврас қотишма GaAs ни кремний билан ифлослантиради. Юқоридаги қийинчиларни бирикманинг суюлиши эриш температурасидан пастроқ температурада газ фазадан $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ турдаги бирикмалар эпитаксиал қатламларини ўстиришда йўқотиш мумкин.

GaAs ва қаттиқ эритмалар асосида газ фазада эпитаксия олишда газ ташувчи сифатида водороддан фойдаланилган ҳолда хлорид ва хлорид

гидрид тизими ўтқозиш мумкин. Бу усулнинг асосий афзаллиги фойдаланилаётган дастгоҳнинг соддалиги; оқим тезлигини ва бирикматашувчи зичлигини ўзгартириш йўли билан қатлам ўсиши жараёнини бошқариш мумкинлиги; турли киришмлар билан легирлаш; узлуксиз жараёнда кўп қатламли тузилмаларни олиш; жараёни автоматлаштириш; едиришнинг осонлиги ва бошқалар кирази.



3-расм. Ga-AsCl₃-H₂ тизимида GaAs эпитаксиал қатламлар олиш учун қурилма схемаси: 1-арсеник зонаси 425⁰С (I); 2-галлий зонаси 800⁰С (II); 3-таглик зонаси 750⁰-900⁰С (III); 4-реаксия маҳсулотлари чиқиши; 5-водород кириши; 6-AsCl₃ ли барботер.

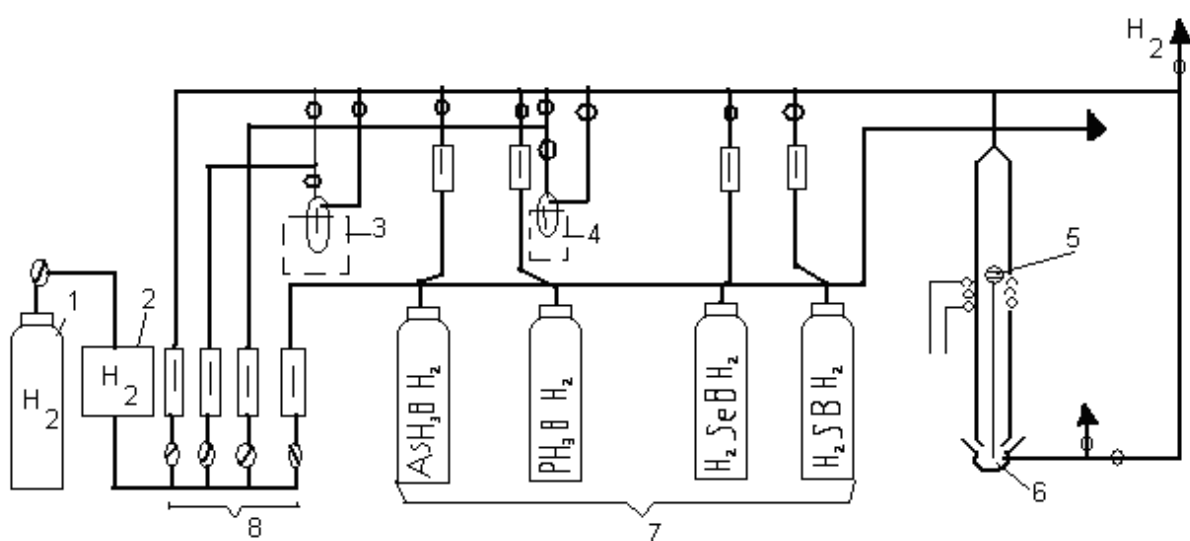
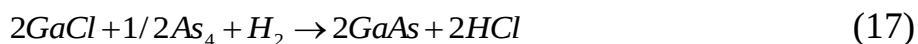
Энди қисқача асосий реагентлар тизимида кимёвий айланишлар ва эпитаксиянинг бир қанча кинетик хусусиятларига тўхталамиз. Ga-AsCl₃-H₂ тизимлари афзалликлари битта реакторда AsCl₃ ва юқори тозаликда арсеник ва водород хлориди олиш мумкинлигидир. Бу тизимда галлий арсениди эпитаксиал қатламини олиш қурилмаси 3-расмда кўрсатилган. Реактор учта қизиш зонасига эга. Унинг киришига водородли буғ AsCl₃ аралашма келади ва биринчи зонада қуйидаги реаксия содир бўлади:



Иккинчи зонада биринчи зонадан келган водород хлориди эритма галлий билан ўзаро таъсирлашади. 700°C дан юқори температурада ортиқча галлий маҳсулоти таъсирида галлий субхлориди пайдо бўлади:



Учинчи зонада гетероген реакция натижасида галлий арсениди синтези ва тагликда эпитаксиал қатлам ҳосил бўлади:



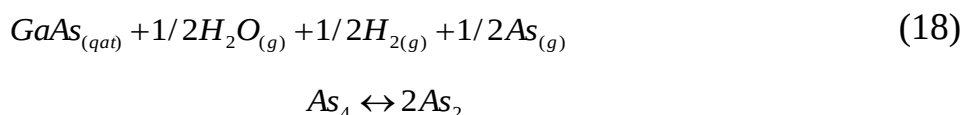
4-расм. Галлий –органик бирикмалардан фойдаланган ҳолда галлий арсениди эпитаксиал қурилма схемаси:

1-газ ташувчи баллон; 2-газни тозалаш блоки; 3-галлий-органик бирикмали барботер; 4-легрловчи қўрғошин манбаи; 5-таглик; 6-кварс реактор; 7-водород аралашмали гидрид баллонлар; 8-ротометр.

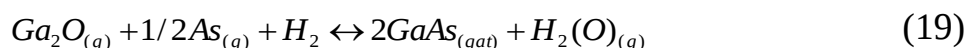
Жараённинг ўзига хос хусусияти иккинчи зонада арсеник билан галлий эритмасининг тўйинишидир. Эритма тўйингандан сўнг унинг сиртида галлий арсениди пардаси ҳосил бўлади, зонага келувчи ортиқча арсеник водород оқими билан қўшилиб кетади ва реакторнинг совуқ қисмларига ўтиради. Одатда тагликни галлий эритмаси арсеник билан тўйиниш жараёни тугаган жойга киритилади. Бу газ аралашма таркиби ўзгармаслигини таъминлаб қатламнинг бир жинсли ўсишига олиб келади. Зона киришдаги AsCl_3 ва GaCl буғ босимлари нисбатини ўзгартириш билан ўтириш зонасида тагликни

едириш ва турли тезликда эпитаксиал қатлам ўстириш режимларини аниқлаш мумкин. Қатлам ўсиши тезлиги тағлиқ йўналганлигига боғлиқ. Одатда қуйидаги муносабат кузатилади: $\mathcal{G}_{(111)A} > \mathcal{G}_{(100)A} > \mathcal{G}_{(211)B} > \mathcal{G}_{(311)B}$. Бу ерда А-металл, В-металлоид панжара қисмига тегишли белгилар.

Галлий арсенидининг бошқа тизимларидан ҳам эпитаксиал қатламларни олиш мумкин. Булар $\text{GaCl-AsCl}_3\text{-H}_2$; $\text{GaCl}_3\text{-As-H}_2$; GaAs-HCl-H_2 ; $\text{GaAs-I}_2\text{-H}_2$; $\text{GeAs-H}_2\text{O-H}_2$ тизимларидир. Ўтириш зонасидаги кимёвий реакциялар кинетикаси ўхшаш. Фақат, охирги тизимда, фарқли равишда ташувчи сифатида сув буғидан фойдаланилади. Бу тизимда манба зонасида температура $1000^0\text{-}1100^0\text{C}$ бўлиб, жараён галлий арсенидининг оксидланишига олиб келади:



Температураси 50% кам бўлган зонада, яъни ўтириш зонасида галлий арсенидининг синтези рўй беради ва бу ерда сув ажралиб чиқиши ҳам кузатилади:



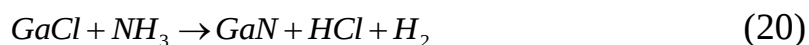
Галлий арсениди ўстириши учун хлорид-гидридли $\text{Ga-HCl-AsH}_3\text{-H}_2$ дан ҳам фойдаланиш мумкин.

$\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ ёки уларнинг қаттиқ элементлари бинар бирикмалари эпитаксиал қатламларини олишда B^{V} таркибловчининг уй температурасида газ ҳолда бўлганлиги, газ фазада таркиби ўзгармаслиги ва легирлаш жараёнини бошқаришни таъминлайди.

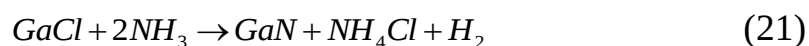
4-расмда бинар бирикмалар GaAs , GaP , GaN ва қаттиқ эритмалар $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$, $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$, $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$, $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{As}_{1-y}$, $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ ва бошқа газ фазадан ўстириш мумкин бўлган бошқа аралашмалардан эпитаксиал ўсиш ва легирлаш учун қурилма схемаси кўрсатилган.

Газ фазада GaN эпитаксияси биргина шу усулда олиниб, у бу материал асосида технологиялашган монокристалл қатламини олишни таъминлайди.

Эпитаксияни хлорид-гидридли $Ga-HCl-NH_3-Ar(He)$ тизимда олиб борилади. Галлийни хлорлаш зона температураси 800^0-850^0C бўлганда галлий субхлориди $GaCl$ ҳосил бўлгунча давом эттирилиб, сўнг инерт газ оқимида ўстириш зонасига аммиак тўғридан-тўғри тагликка берилади. Бу ерда 1050^0-1100^0C температурада гетероген реаксия юз беради:



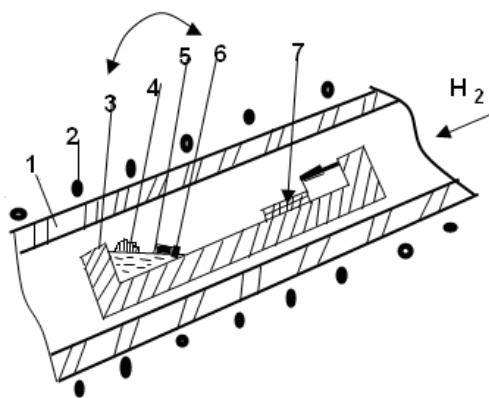
Қисман жараён қуйидагича бўлиши ҳам мумкин:



Реаксияда катнашувчи газлар ва буғлар зичлиги бўйича бир-биридан кучли фарқ қилади, шунинг учун эпитаксиал ўстириш бир жинсли бўлиши учун газ оқимларини юқори тезликда ўтказилади. Шунинг учун бу аралашма-гулхан режим деб аталади. Бунда газ аралашма гомогенлашмаган бўлади ва у $A^{III}B^V$ бирикмалар эпитаксиясидан фарқ қилади. Таглик сифатида одатда йўналиши (0001), (1120) ёки (1012) бўлган саприфлардан фойдаланилади, кейин улар водородда юқори температурали едиришдан ўтказилади. Қатламнинг ўсиш тезлиги $\sim 1\text{мкм/мин}$ бўлиши мумкин. Галлий нитриди асосида ёруғлик диодлари битта жараёнда олинади. Олдин азот панжарасида вакансия ҳисобига юқори электрон ўтказувчанликка эга бўлган легирланмаган қатлам ўстирилади. Кейин бу қатлам устига кўрғошин билан легирланган концентрацияланган i -қатлам ўстирилади. Легирланган қатлам ўсиши 900^0C да амалга оширилади.

Суюқ фазада эпитаксия. Суюқ фазада эпитаксия кўпчилик $A^{III}B^V$ бинар ва учлик яримўтказгич бирикмаларни ўтқазуш учун, айниқса турли тагликларда кўп қатламли p - n ва изотурдаги тузилмаларни олиш учун қўлланилади. Суюқ фазали эпитаксиянинг афзалликлари: стехиометрик эритмадан фойдаланиш зарур эмаслиги; фаза ўсиши температура комбинацияси ва ликвидус чизигига яқин таркибда юз бериши; бу ўз навбатида қатламларда кимёвий тузилиш нуқсонлари зичлигини камайтиришга, температура пасайиши билан кўпчилик киришмаларнинг тақсимот коэффициентининг камайишига имкон беради. Иссиқлик

вакансиялар зичлиги ҳам камаяди. Суюқ эпитаксияда ликвидуснинг ҳар қандай нуқтасида кристалланиши ва унга енгил учувчи таркибловчиларнинг бу босими камайиши содир бўлади. Масалан, галлий асосида қотишма-эритмадан 1000°C да GaP ни ўстиришда фосфор P_2 буғ босими 10 Pa ташкил қилади ва натижада фосфорнинг йўқотилишлари етарлича оз бўлади. (Стихиометрик қотишмадан 1470°C да ўстиришда фосфор босими $3,2 \cdot 10^6\text{ Pa}$ ни ташкил қилади). Суюқ эпитаксия жараёнида ўсиш тезлиги кичик бўлганлиги сабабли қатлам қалинлигини юқорирак аниқликда бошқариш имконини беради. Бу усул диффузион ва бошқа шакллар билан қатламлар ҳосил қилувчиларга нисбатан ҳам бир қанча марта кўп афзалдир. Бу айниқса, кўп қатламли, даврий тузилмаларни олишда аҳамиятлидир. Суюқ фазада эпитаксия усули, тағлиқка нисбатан, қатламда дислокация зичлиги камайишига олиб келиб, ёруғлик асбобларида юз бералидиган нурланишсиз рекомбинация жараёнларини камайтиради. Суюқ фазадан эпитаксия олиш усуллари иккита катта гуруҳга бўлиш мумкин. Улардаги фарқ қатламда киришмаларнинг охириги тақсимооти билан аниқланади.



5-расм. Нелсон усули бўйича суюқ эпитаксия учун контейнер схемаси: 1-Кварс реактор; 2-қаршилик электр печи; 3-графит қайикча; 4-моддаманба; 5-лигатура; 6-эритма (гелий); 7-таглик.

4 §. $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ эпитаксиал қатламларни ўстириш.

Ҳар қандай атомларнинг аралашмасидан кристалл қаттиқ жисм ҳосил қилинганда атомларнинг жойлашишида узлуксизлик шартларига амал қилинади. Акс ҳолда атомлар жойлашишида кристалл панжарага хос бўлган тартиб бузилади ва турли дислокациялар юзага чиқади. Мураккаб бирикмаларнинг қаттиқ қотишмаларини ҳосил

килишда ҳам шу тартиб бузилмаслиги керак. Бунинг кристалл ўстиришда кристаллокимёнинг термодинамик принципларига амал қилинади. Бу принципларга кўра таркибловчилари кимёвий элементлар атомларидан иборат бўлган ҳар қандай тизимда элементларнинг миқдорлари қандай бўлишидан қатъий назар атомлар орасида кимёвий ўзаро таъсир юзага келади. Паст ҳароратларда атомлар эффектив зарядлари ва ўлчамларига мос ҳолда бир –бирига нисбатан ўзаро таъсир энергияси минимал бўладиган ҳолатни егаллашга ҳаракат қиладилар. Лекин атомларнинг бундай жойлашишига кристалл тузилиш имкониятлари тўсқинлик қилади. Юқори ҳароратларда эса бу тўсқинликда атомларнинг иссиқлик ҳарорати ҳам қўшилади. Шунга қарамай, маълум иссиқлик шароитларида энтропиянинг ўзгариши ҳисобига тизимнинг термодинамик потенциалнинг намоёниши кузатилади. Бу эса энергетик жиҳатдан тузилиш тўсиқлари мавжуд бўлган ҳолда ҳам турли таркибловчи элементлар(бирикмалар) нинг ўзаро ўрин алмашишидан ҳосил бўладилар қаттиқ қотишмалар ўстириш мумкинлигини кўрсатади.

Яримўтказгич моддалар ўзининг хоссаларини ёруғлик таъсирида сезиларли ўзгартириш хусусиятига эга. Масалан, кремнийнинг электр ўтказувчанлиги ёруғлик таъсирида 10^5 мартагача ўзгариши мумкин. Лекин унинг сезгирлиги $\lambda - 1$ мкм тўлқин узунлигидаги нур учун максимумга эга. Тўлқин узунлиги $\lambda - 1$ мкм дан катта нурлар учун кремний кристалли деярлик шаффоф, яъни жуда кам ютилади. Тўлқин узунлиги $\lambda - 1$ мкм дан кичик нурлар эса асосан кристаллнинг сирт қатламларида ютилиб қолади ёки қайтиб сочилади. Бундай турлар яримўтказгич ҳажмида эркин ток ташувчи зарядларни (электрон ва ковакларни) жуда кам ҳосил қилади.

Германий кристалли учун максимум ютилиш соҳаси тўлқин узунлиги $\lambda - 1,72$ мкм, галлий арсениди учун $\lambda - 0,87$ мкм бўлган нурларга тўғри келади. Яъни бу асосий яримўтказгич моддаларнинг фотосезгирлиги узок инфрақизил нурлар соҳасига тўғри келади.

Ҳозирги замон оптоэлектроникаси учун эса инфрақизил ($\lambda \ll 1$ мкм) ва кўринувчи нурлар ($\lambda - 0,76 \div 0,36$ мкм) соҳасида ишловчи сезгир асбоблар керак. Фотосезгирлиги бу диапазонга тўғри келган яримўтказгич асбобларни яратиш муҳим долзарб масалалардан ҳисобланади.

Яримўтказгич моддаларнинг ҳоссаларини ўрганиш бўйича олиб борилган илмий тадқиқот ишлари эпитаксиялаш усуллари билан турли яримўтказгич моддаларнинг турли тартибдаги қатламларини ҳосил қилиш имкониятларини кўрсатади. Эпитаксиал ўстириш усули билан ҳоссалари яхши ўрганилган моддалардан юқори фотоэлектрик параметрларга эга бўлган янги типдаги қаттиқ қотишмали яримўтказгич модданинг мукаммал монокристалларини ўстириш мумкин. Шундай моддалар қаторига $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ таркибли тузилмаларни ҳам киритиш мумкин. Бу модда таркибидаги Si ҳам, ZnSe ҳам мукаммал ўрганилган моддалар сирасига киради. Шу сабабдан улар асосидаги мураккаб бирикмани ўстириш ҳам илмий, ҳам амалий жиҳатдан катта эътиборга эга.

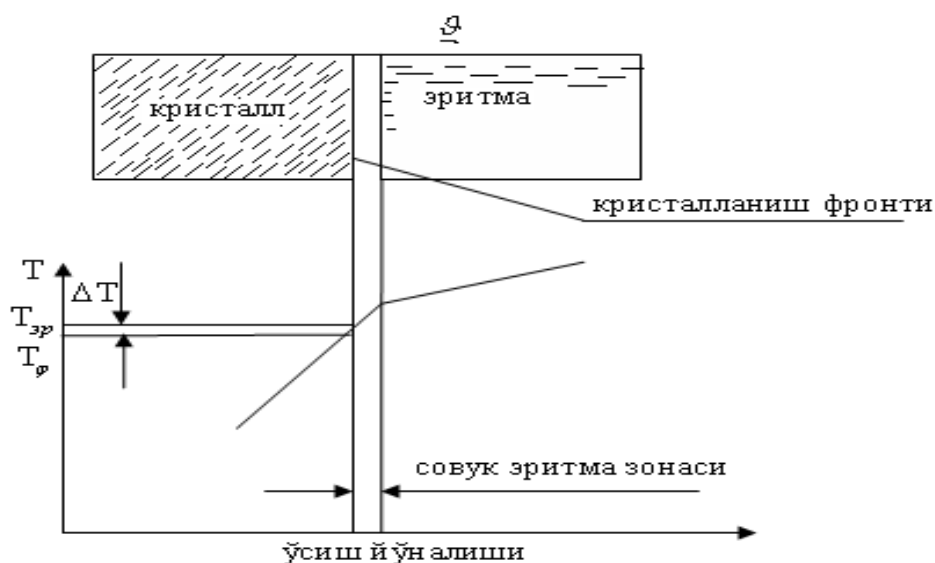
Рух селениди кўринувчи ва инфрақизил (ИК) (0,5-12 мкм) соҳада ишловчи оптоэлектрон асбобларни яратишда ишлатилади.

5-§. Эпитаксиал усулда $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ қатламларини ўстириш тажрибалари баёни.

Ушбу ишда эпитаксиал усулда ўстирилган $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ ($0 \leq x \leq 0,01$) ўринбосар қаттиқ қоришмалар эпитаксиал қатламларини рентгенодифрактометриқ тадқиқот қилиш натижалари келтирилади. Бу ерда х қаттиқ қоришмада уни таҳлил этувчи компонентларнинг бирининг фоизларда ҳисобланган атомиймассаси ортиб бориши билан иккинчисиники камайишини билдиради. Бу қаттиқ қоришма аргон фазали суюқ эпитаксия усулида қалайнинг чекланган ҳажмидаги қоришмали қотишмасидан 800-1000° температура оралиғида палладийдан ўтказиб тозаланган водород муҳитида мажбурий совутиш йўли билан ўстириб олинади. Рентген дифракцияси ёрдамида ўстириб олинган эпитаксиал плёнкаларнинг

тузилиши текширилади. Таглик сифатида солиштирма қаршилиги $\rho \approx 0,01$ Ом.см ва акцептор ўтказувчанликдаги (111) кристалланиш йўналишдаги кремнийнинг монокристалли ишлатилади. Тагликнинг диаметри 20 мм ва қалинлиги 350 мкм га тенг. Қоришма-қотишманинг таркибини аниқлаш учун $\text{Zn}+\text{ZnSe}+\text{Si}$ дан иборат тизим ўрганиб чиқилди.

$(\text{Si}_2)_{1-x} (\text{ZnSe})_x$ қаттиқ қотишманинг шишасимон текис қатламини олиш учун унинг совутиш тезлиги 1-1,5 град/мин бўлиши зарурлиги аниқланди. Ўстирилган қаттиқ қотишмалар блоklarининг ўлчами ~52 мм ва кристалл йўналиши (111) дан иборат бўлиб, бу йўналиш тагликнинг кристалл йўналиши билан бир хил ва электрон ўтказувчанликга эга, қалинлиги эса ~20 мкм атрофида. $(\text{Si}_2)_{1-x} (\text{ZnSe})_x$ қаттиқ қотишманинг ўсиш жараёни 6-расмда кўрсатилган.



6-расм. $(\text{Si}_2)_{1-x} (\text{ZnSe})_x$ қаттиқ қотишманинг ўсиш схемаси.

Олинган натижалар тахлили: Si ва ZnSe асосида қаттиқ қоришманинг ҳосил бўлиши Si_2 атомларининг молекулалар тузилма ZnSe нинг радиуслари бир бирига яқинлиги билан изоҳланади. ZnSe молекуланинг нисбий валентлиги Si_2 билан бир хил валентли бўлиб, қаттиқ

котишма ҳосил бўлиш жараёнида Si_2 молекуласи ZnSe молекула билан ўрин алмашади. Микрондлин рентген таҳлили ва растрли расмга олиб ўрганиш натижалари таглик кремний биржинсли текис эпитаксиал қатлам билан копланганини кўрсатди. Сиртда соф кристалл тузилишдан сезирарли ўлчамидаги четланишлар кузатилмади. Таркибловчиларнинг сирт бўйлаб тақсимооти бир хил. ZnSe молекулаларининг қалинлик бўйлаб миқдори $0 \leq X \leq 0,01$ ораликда ўзгариб туради. Парданинг сирти $(\text{Si}_2)_{0,99} (\text{ZnSe})_{0,01}$ тарихидаги қаттиқ қоришманинг юпқа қатламидан иборат эканлиги аниқланди.

Пардада SiO_2 (кремний оксиди) нинг аралашмалари ҳам мавжуд, лекин улар (202) кристалл ўқи бўйлаб жойлашган. Рентгенограмма шунингдек (220) йўналишда ZnSe нинг мавжудлигини кўрсатади. Спектрдаги (220) йўналишнинг қайтиш чизиғи бўйича ZnSe нинг панжарадаги ўлчами аниқланади. Бу параметр $a_{\text{ZnSe}} = 5 \cdot 692 \text{ \AA}$ га тенглиги аниқланди. Бу қиймат

маълумотномаларда келтирилган $\left(5 \cdot 692 \text{ \AA}^0\right)$ қийматдан бироз фарқ қилади.

Таглик материал ва эпитаксиал парданинг қайтиш спектри ўзаро симметрик кўринишга эга. Бу эса панжарада текис тақсимланган микробузилишлар мавжудлигидан далолат беради. Бу микробузилишлар қатламидаги кремний панжарасида жойлашган Si_2 ва руҳ селенидининг ковалент радиуслари орасидаги фарқдан келиб чиқиши мумкин. Бу жараёнларда Si_2 нинг ковалент радиуси $r_{\text{Si}} + r_{\text{Si}} = 2,34 \text{ \AA}$ ва ZnSe учун $r_{\text{Zn}} + r_{\text{Se}} = 2,45 \text{ \AA}$ катталиқдаги қийматлар билан баҳоланади. Шундай қилиб, турли усуллар билан ўтказилган таҳлиллар натижалари суюқ фазадан эпитаксиялаш йўли билан ҳосил қилинган қаттиқ қоришма $(\text{Si}_2)_{1-x} (\text{ZnSe})_x$ формула билан ифодаланувчи плёнка эканини тасдиқлайди. Ҳосил қилинган плёнканинг электрофизик хоссаларини ўрганиш учун бир қанча тажрибалар ўтказилди. Тажриба натижаларидан қатламнинг солиштирма қаршилиги (ρ) , Холл ҳаракатчанлиги (μ_x) , эркин ток ташувчилар концентрацияси (n) ва

эпитакциал қатламнинг ўтказувчанлик хили аниқланди. 300°K температурада ўтказилган тажрибаларга кўра қуйидаги маълумотлар олинди:

Солиштирма қаршилиги - $\rho = 5,5 \text{ Ом.см}$;

Холл ҳаракатчанлиги - $\mu_x = 1068 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$;

Электронлар концентрацияси - $n = 2,25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$

Ўтказувчанлиги хили – электронли

Шундай қилиб, бу тажрибалар кўрсатадики, эпитаксиялаш усулида кристалл ўстиришнинг зарурурий шарт-шароитларини танлаб олиб кремний тагликда чегараланган қалайли қоришма-қотишмадан $(\text{Si}_2)_{1-x} (\text{ZnSe})_x$ таркибдаги каттик қоришманинг мукамал кристаллик эпитаксиал қатламларини ўстириш мумкин экан. Ўстирилган қатламларнинг электрик параметрлари микроэлектроника ва оптрон асбобларни яратиш шароитларига мос келади.

III БОБ

1-§. $p(\text{Si})-n(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ гетероструктуранинг вольтампер характеристикасини ўрганиш

Структуранинг вольтампер характеристикасининг ўрганиш мақсадида, эпитаксиал қатламнинг юза қисмига ўлчами 4 мм² бўлган ва такликнинг орқа томонига тўлиқ вакуумли сипиш усулида кумушдан омик контакт ҳосил қилинди. Расимда қаралаётган структуранинг хона ҳароратида, қоронғуликдаги вольтампер характеристикаси (ВАХ) курсатилган. Вольтампер характеристиканинг тўғри йуналишида 3 В гача токнинг туйиниши кузатилмади, бу шундан далолат берадики бу структура кичик зичликдаги сирт ҳолатида.

Вольтампер характеристиканинг бошланғич қисмида 0,4 Вгача (1-расм) токнинг кучланишга боғланиши экспоненциаль қонунга буйсилади [1].

$$I = I_0 e^{\frac{qU}{ckT}} \quad (1)$$

бу ерда q – заряд, U – кучланиш, c – экспонента курсатгичи, k – Больчман сони ва T – абсолют ҳарорат.

$$I_o = \frac{kT}{q} \cdot \frac{S \cdot b \cdot ch(d / L_p)}{2(b+1) \cdot L_p \cdot \rho \cdot tg(d / 2L_p)} = 14,9 \cdot 10^{-6} A$$

Ушбу ифодадаги экспонента курсатгичи “ c ” ни вольтампер характеристикасининг улчаш натижаларидан ва қўйидаги нисбатдан топишимиз мумкин:

$$c = \frac{q(U_2 - U_1)}{kT \cdot \ln(I_2 / I_1)} \quad (2)$$

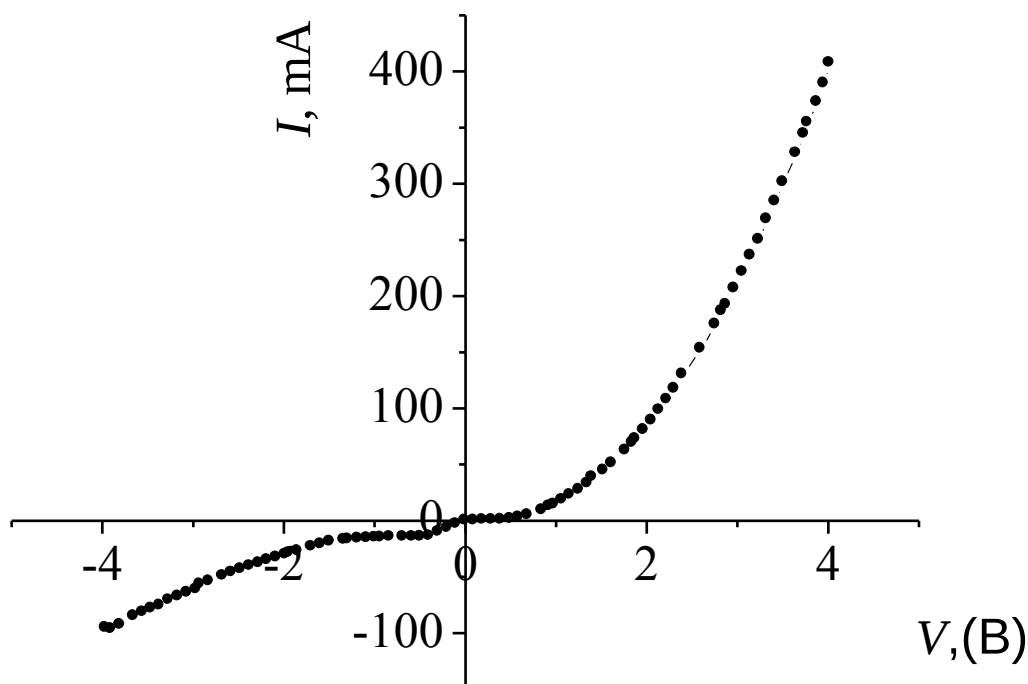
Бизнинг ҳолат учун экспонента курсатгичи $c=2,4$ га тенг, $c>2$, бўлса структуранинг базаси йитарлича катта бўлади бў ҳолатда бизда иккинчи чегаравий шарт бор $d / L_p > 1$, бу ерда d – база узунлиги, L_p – асосий булмаган заряд ташувчиларнинг диффузия узунлиги. Бошқа томондан экспонента курсатгичи “ c ” В.И. Стафеева назариясига кура электронлар ва коваклар ҳаракатчанликлари нисбатига, база қалинлигига ва асосий булмаган заряд ташувчиларнинг диффузия узунлигига боғлиқ:

$$c = \frac{2b + ch(d / L_p) + 1}{b + 1} \quad (3)$$

Экспоненциаль боғланиш дан сунг токнинг кучланишга боғланиш қонуниятини $J \approx U^\alpha$ (α – турли қийматларни қабул қилади) куринишда баҳолаш мумкин. Кучланиш оралиғи 0,5 Вдан то 2,6 Вгача бўлган ораликда $p(\text{Si})\text{-}n(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ структуранинг вольтампер характеристикиси

$$U = \sqrt{\frac{8d^3 J}{9q\mu_n\mu_p\tau_p N_D}} \quad (4)$$

(бу ерда $\tau_p=63$ мкс, N_D $2.25 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) қонунга буйсинади, ушбу қисмда дрейфларнинг амбиполяри тезлиги эркин заряд ташувчилар концентрациясига боғлиқ булади. Аммо кучланиш ортиши билан 5,45 В гача ток кучланишга тўғри пропорционал боғланишда бўлади, яни Омик қисм кузатилди. Кучланиш оралиғи 6 В дан 9,3 В гача токнинг кучланиш буйича ўткир тишли тебраниши кузатилди.



Расм 1. $p(\text{Si})-n(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ структуранинг хона ҳароратидаги ВАХ

Вольтампер характеристиканинг ушбу қисмини таҳлил қилганимизда, устирилган эпитаксиал $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ қатламда йўқори концентрацияли чуқур киритмали марказлар нуқсонлар борли аниқланди. Бундай ҳолатда рекомбинация тезлигини Шокли – Рид статистикаси формуласидан фойдаланиб булмайди. Мураккаб нуқсон – киритма комплекс ва ички комплексларда эркин заряд ташувчилар алмашуви яъни рекомбинация тезлиги қўйидагича[2].

$$u_r = N_R \frac{c_n c_p (pn - n^2)}{c_n (n + n_1) + c_p (p + p_1) + \alpha \tau_i pn} \quad (5)$$

Иккинчи томондан йитарлича узун базали $p - n - n^+$ структуралар учун қўйидаги ифода ўринли бўлади.

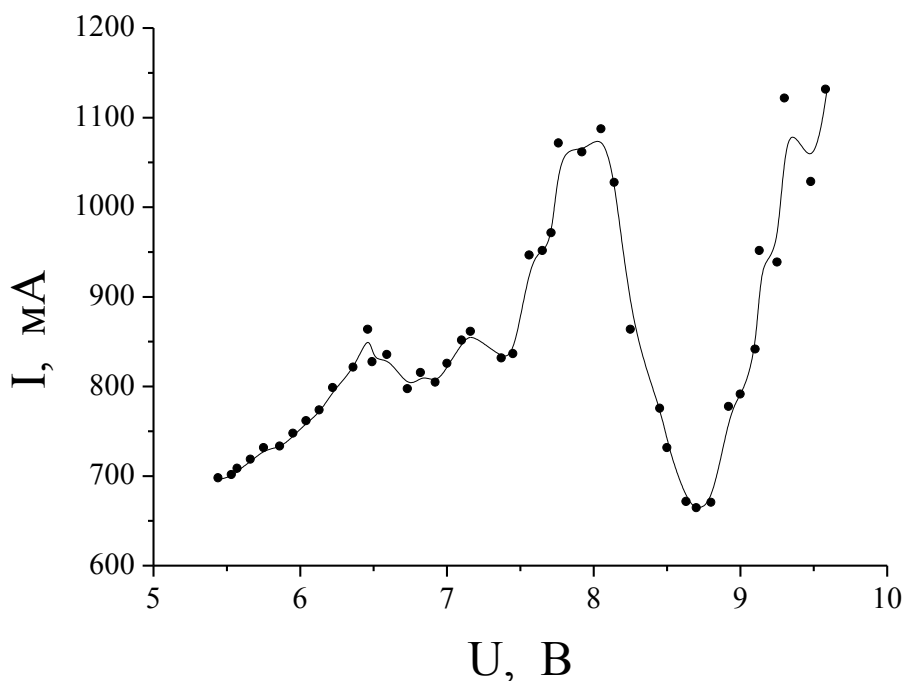
$$D_a \frac{d^2 p}{dx^2} + v_a \frac{dp}{dx} - u_r = 0 \quad (6)$$

D_a - амбиполяр диффузия коэффиценти, $v_a = \mu_a E_J$ – дрейфларнинг амбиполяр тезлиги, (6) ифоданинг йичимидан $p\text{Si}-n(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ гетероструктуранинг

вольтампер характеристикасидаги кучланиш оралиғи (8,81÷9,31 В) учун қўйидаги боғланишни ҳосил қиламиз(Расм – 2)

$$U=U_0+A\sqrt{J} \quad (7)$$

бу ерда $U_0=7,08\text{В}$, $A=0,07\text{ В/А}^{1/2}$.



Расм 2. $p(\text{Si})-n(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ структуранинг хона ҳароратидаги ВАХ. Лекин юқори кучланишларда дрейфларнинг амбиполяр тезлигини чуқур киритмаларда зарядлар модуляцияси билан аниқлаш мумкин[3], яъни $v_a = aJD_a$ ва (6) ифодамиз қўйидагича курунишга келади.

$$\frac{d^2 p}{dx^2} - aJ \frac{dp}{dx} - \frac{u_r}{D_a} = 0 \quad (8)$$

Ифодадаги иккинчи ҳад фақат ток кучи зичлигига боғлиқ, амбиполяр диффузия ва дрейф тезликларнинг тушуви 8,06 В дан 8,64 В оралиғи учун (8) ифода қўйидаги йичимга килади.

$$U \sim \exp \left\{ \frac{d}{aJL^2} \right\} \quad (9)$$

бу ерда $a = 1/(2qD_p N_t)$ яъни ток зичлигининг кучланишга боғлиқ равишда камайишини англатади. Кучланишнинг ушбу қисмидан қуйидаги катталикларни аниқлаш мумкин, $a=0,82 \cdot 10^{-3}$ см/А, $N_t=1,3 \cdot 10^{19}$ см⁻³.

2-§ p(Si)-n(Si₂)_{1-x}(ZnSe)_x структуранинг вольтампер характеристикасига ҳароратнинг таъсири

Тайёрланган p(Si)-n(Si₂)_{1-x}(ZnSe)_x гетероструктуранинг Вольтампер характеристикасига турли ҳарорат таъсири ўрганилди(2-расм). Вольтампер характеристиканинг бошланғич қисмида кучланиш 0,5 В гача экспоненциал қонуният кузатилди ва бу қисмда ток кучланишга боғланиш(1) ифода билан ифодаланди. Экспоненциал боғланишдан кейинги қисмда кучланиш оралиғи 2 В дан 2,6 В гача токнинг кучланишга боғланиши барча температураларда 24 °С дан 80 °С гача субчизикли қонуниятга бўйсинади. Куринадик ушбу қисмда вольтампер характеристика инжекцион эффект назариясига бўйсинади[4]. Ушбу назарияда амбипольяр диффузия ва асосий булмаган заряд ташувчилар дрейфи қарама – қарши йуналишда кузатилади, бу ҳолатда қуйидаги шарт бажарилиши керак $Iad / S > 2$. Вольтампер характеристикада бундай субчизикли соҳанинг математик ифодаси қуйидагича ўлади.

$$U \approx U_0 \cdot e^{\frac{Iad}{S}}, \quad (10)$$

бу ерда I – ток кучи, d – база қалинлиги, S – намуна юзаси, a – параметр, ушбу параметр фақат асосий булма

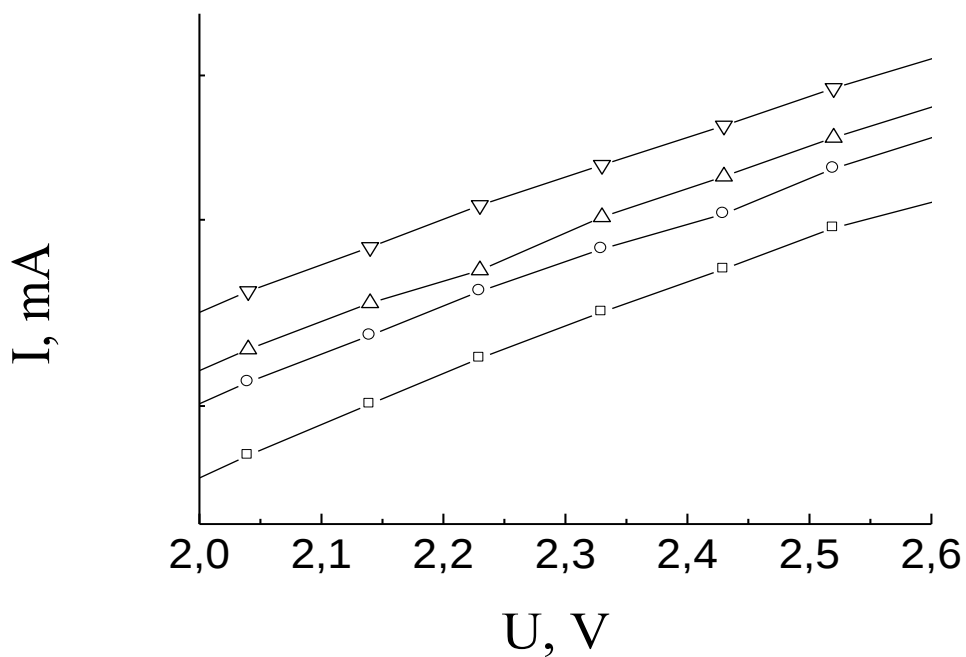
ган заряд ташувчилар ҳаракатчанлиги – μ_p ва чуқур киритмалар концентрациясига N , га боғлиқ.

$$a = \frac{1}{2kT\mu_p N}$$

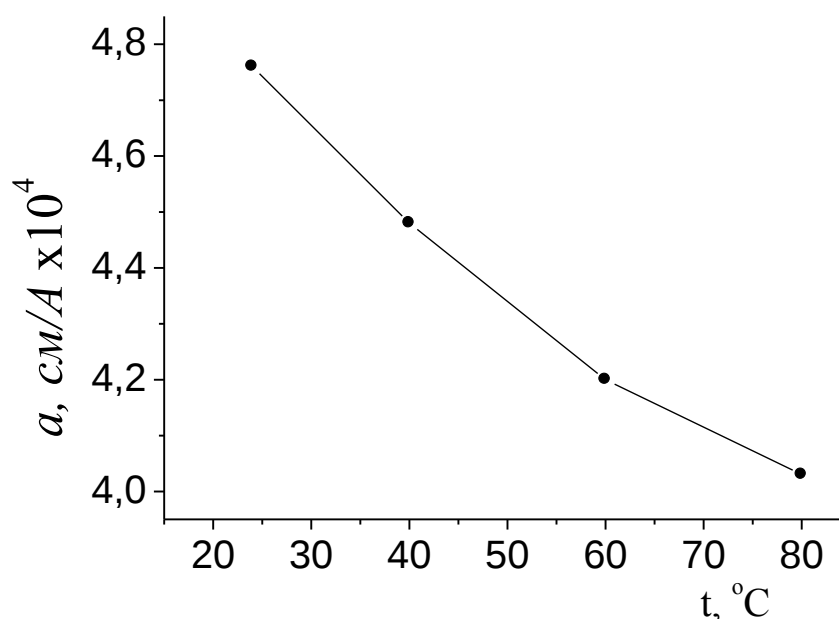
Вольтампер характеристикада ўлчанган натижалардан ушбу параметрни осонлик билан топиб олишимиз мумкин (5 – формула).

Инжикцион эффект назарияси ўринли булган вольтампер характеристика 2-расмда курсатилган.

$$a = \frac{S \cdot \ln(U_2/U_1)}{(I_2 - I_1) \cdot d} \quad (5)$$



Расм 2. Турли температурадаги $p(\text{Si})\text{-}n(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ структуранинг яримлогариф масштабдаги вольтамперная характеристикаси: $\square$ – 24°C , $\circ$ – 40°C , Δ – 60°C , ∇ – 80°C



Расм 3. Параметр a нинг температурага боғланиши.

$p(\text{Si})-n(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ структуранинг вольтампер характистикасидан параметр “ a ” ни топиб шу орқали биз $\mu_p \cdot N$ купайтмани топишимиз мумкин. Аниқланган катталиклар 1 – жадвалда курсатилган. Жадвалдан куринадики температура оралиғи 24 °C дан 80°C гача $\mu_p \cdot N$ купайтма деярли ўзгармаганлигини куришимимз мумкин, демак температура ортиши билан асосий булмаган заряд ташувчилар ҳаракатчанлигининг ўзгариши чуқур киритмалар концентрацияси ўзгаришига тескари ўзгарар экан яъни асосий булмаган заряд ташувчилар ҳаракатчанли ортса чуқур киритмалар концентрацияси камайиши мумкин ёки асосий булмаган заряд ташувчилар ҳаракатчанли камайса чуқур киритмалар концентрацияси ортиши мумкин.

$T, ^\circ\text{C}$	$a, \text{cm} / \text{A}$	$\mu_p \cdot N, \text{B}^{-1}\text{cm}^{-1}\text{s}^{-1}$
24	$4.76 \cdot 10^4$	$2.54 \cdot 10^{15}$
40	$4.48 \cdot 10^4$	$2.58 \cdot 10^{15}$
60	$4.20 \cdot 10^4$	$2.59 \cdot 10^{15}$
80	$4.03 \cdot 10^4$	$2.55 \cdot 10^{15}$

ХУЛОСА

1. Менинг БМИ да яримўтказгичлик хоссасига эга бўлган янги типдаги моддани ўстириш технологиясини ва унинг тузилиши, электрофизик хоссаларини ўрганиш мақсад қилиб қўйилган эди. Бундай модда кремний монокристаллидан иборат тагликда суюқ фазадан эпитаксия усули билан ўстирилган рух ва селен қатламларидан иборат $(\text{Si}_2)_{1-x} (\text{ZnSe})_x$ бирикмалар ҳисобланади.

2.Мавзунинг илмий янгилиги шундаки, $(\text{Si}_2)_{1-x} (\text{ZnSe})_x$ бирикмалар деярлик ўрганилмаган. Лекин шу бирикмалар типдаги тузилмалар ҳозирги пайтда ҳам назарий , ҳам амалий жиҳатдан микро ва оптоэлектроника учун муҳим аҳамиятга эга бўлиши кўрсатиб берилмоқда.

3. $(\text{Si}_2)_{1-x} (\text{ZnSe})_x$ суюқ фазадан эпитаксия йўли билан ўстирилади. Шу сабабли мен дастлаб яримўтказгичли кристаллар, уларни ўстиришнинг усуллари ва технологиялари батафсил ўрганиб чиқдим.

4. Маълумки, кристалл ўстиришда эпитаксиал технология қўлланилиши кейинги 10-15 йил ичида сифатли маҳсулотлар ишлаб чиқаришни 4-5 марта ошириб юборди. Эпитаксиал қатламлар тузилиш жиҳатдан ҳажмий монокристаллдан анча такомиллашганлиги, уларда киришмалар ҳақиқий тақсимотига эга бўлиши билан бирга, назорат қилиб бўлмайдиган ифлосликлар камлиги билан фарқ қилади. Эпитаксия кичик омли пластинкаларда юқори омли яримўтказгичли қатламларни ўстириш имконини берди.

5.Яримўтказгич моддаларнинг хоссаларини ўрганиш бўйича олиб борилган илмий тадқиқот ишлари эпитаксиялаш усуллари билан турли яримўтказгич моддаларнинг турли тартибдаги қатламларини ҳосил қилиш имкониятларини кўрсатади.

6.Эпитаксия термини ўтган асрнинг 50-йилларида пайдо бўлди, у “эпи”сирти, “такис”-жойлашиш маъноларини англатади. Эпитаксия - бу кристалл таглик сиртида муайян йўналишли кристалл қатламни ўстиришдир. Эпитаксиал қатлам - таглик тузилишини сақловчи, кристалл тагликка

ўтқазилган монокристалл материал ҳисобланади. Эпитаксиянинг афзалликларидан яна бири, калинликнинг қатлами бўйича талаб даражасидаги киришмаларни легирлаш имконияти мавжудлигидир.

7. Эпитаксиал жараённинг уч гуруҳи: авто-, гетеро- ва хемоэпитаксия кўринишлари маълум. Мен ўз ишимда бу уч жараённинг имкониятларини ва афзаллик томонларини ўрганиб чиқдим.

8. Ўсувчи қатлам ҳосил бўлишидаги физик-кимёвий ҳодисалар табиати фарқи бўйича эпитаксиянинг учта асосий технологик усуллари мавжуд:

- 1) вакуумда молекулалар оқимидан молекулар-нур эпитаксия;
- 2) газ ёки буғ-газ аралашмасида кимёвий ўзаро таъсир оқибатида юз берадиган газ фазали эпитаксия;
- 3) эритиш ёки суюқ фазадан рекристалланиш йўли билан суюқ фазада эпитаксия.

9. Ҳозирги пайтда суюқ фазадан эпитаксия усули кўпроқ ишлатилади. Чунки бу усулда тўйинган яримўтказгич материал эритмасидан унга чўктирилган яримўтказгич таглик сиртида монокристалл қатламини ўстириш мумкин.

10. Эпитаксиал имкониятларини ўрганиш мақсадида бу усулда кремний ва германий ўстириш, эпитаксиал усуда $A^3 B^5$ турдаги яримўтказгичли бирикмаларни ўстириш, эпитаксиал усуда мураккаб тизимли яримўтказгичли қатламларни ўстириш технологиясини ўрганиб чиқдим.

11. Шундай қилиб, эпитаксиал ўстириш усули билан ҳоссалари яхши ўрганилган моддалардан юқори фотоэлектрик параметрларга эга бўлган янги типдаги қаттиқ қотишмали яримўтказгич модданинг мукаммал монокристалларини ўстириш мумкин. Шундай моддалар қаторига $(Si_2)_{1-x}(ZnSe)_x$ таркибли тузилмаларни ҳам киритиш мумкин. Чунки бу модда таркибидаги Si ҳам, ZnSe ҳам мукаммал ўрганилган моддалар сирасига киради.

12. $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ каттик қоришма аргон фазали суюқ эпитаксия усулида қалайнинг чекланган ҳажмидаги қоришмали қотишмасидан 800-1000⁰ температура оралиғида палладийдан ўтказиб тозаланган водород муҳитида мажбурий совутиш йўли билан ўстириб олинади.

13. Si ва ZnSe асосида каттик қоришманинг ҳосил бўлиши Si_2 атомларининг молекулалар тузилма ZnSe нинг радиуслари бир бирига яқинлиги билан изоҳланади. Микрозондли рентген таҳлили ва растрли расмга олиб ўрганиш натижалари парданинг сирти $(\text{Si}_2)_{0,99}(\text{ZnSe})_{0,01}$ тарихидаги каттик қоришманинг юпқа қатламидан иборат эканлиги кўрсатди.

14. Ҳосил қилинган плёнканинг электрофизик хоссаларини ўрганиш бўйича ўтказилган тажрибалар асосида қатламнинг солиштирма қаршилиги (ρ), Холл ҳаракатчанлиги (μ_x), эркин ток ташувчилар концентрацияси (n) ва эпитакциал қатламнинг ўтказувчанлик хили аниқланди. 300°К температурада ўтказилган тажрибаларга кўра қуйидаги маълумотлар олинди:

Солиштирма қаршилиги - $\rho = 5,5 \text{ Ом.см}$;

Холл ҳаракатчанлиги - $\mu_x = 1068 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$;

Электронлар концентрацияси - $n = 2,25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$

Ўтказувчанлиги хили – электронли

15. Олинган ушбу $p(\text{Si})-n(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ гетероструктуранинг вольтампер характистикаси ўрганганимда унинг тўғри ўтиш юналишида бир қанча қонуниятлар борлигини аниқладим. Топилган ҳарбир қимс учун токнинг кучланишба боғланиш 1,4,7,9, ва 10 ифодаси топилди.

Фойдаланилган адабиётлар рўйхати.

1. Азизов М. Яримўтказгичлар физикаси. Т. 1974 йил.
2. Акромов Ҳ ва б.Яримўтказгичларда фотоэлектрик ходисалар.Т., 1994 йил.
3. Шолимова К.В., Физика полупроводников. М. 1985 год.
4. А. Тешабоев ва б. Яримўтказгичлар ва яримўтказгичли асбоблар технологияси. Т. 2006 йил.
5. Зайнобиддинов С,Тешобоев А.Яримўтказгичлар физикаси.Т. 1999 йил.
6. Таркуша. Ж.М. Основы физики полупроводников. М. 1982 год.
7. Абакумов А.А., Захидов Р.А., Харченко В.В. Плавление и кристаллизация слитков поликристаллического кремния с применением гелиоконцентрирующих установок// Гелиотехника. 1997. № 3. С. 78-82.
8. Абакумов А.А., Саидов А.С. и др. Труды 3-й международной научно-технической конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве», Москва, ГНУ ВИЭСХ, 14-15 мая 2003 г. С. 58-62.
9. Саидов А.С., Абакумов А.А., Саидов М.С. Солнечно-радиационная плавка металлургического кремния//Гелиотехника. 2003. № 1. С. 96-97.
- 10.Турсунов М.Н., Дадамухаммедов С. и др. Кремниевые солнечные элементы с тонкими фронтальными диффузионными слоями// Гелиотехника. 2003 № 2. С. 20-25.
- 11.Саидов А.С. Термоэлектретные свойства технического кремния, полученного восьмикратной переплавкой на солнечной печи. //международный журнал «Альтернативная энергетика и экология» № 23 (83) 2010. С. 22-25.
- 12.Стафеев В.И. ЖТФ, 28 (9), 1631 (1958).
- 13.Лейдерман А.Ю., Минбаева М.К., ФТП, т.30, №,С.1729-1738, 1996.
- 14.Э.И. Адирович, П.М. Карагергий-Алкалаев, А.Ю. Лейдерман. Токи двойной инжекции в полупроводниках. (М. Сов. радио, 1978).