

**ЎЗБЕКСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ЖОҚАРЫ ҲӘМ ОРТА АРНАЎЛЫ
БИЛИМ МИНИСТРЛИГИ**

**БЕРДАҚ АТЫНДАҒЫ ҚАРАҚАЛПАҚ МӘМЛЕКЕТЛИК
УНИВЕРСИТЕТИ**

ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАКУЛЬТЕТИ

УЛЫЎМА ФИЗИКА КАФЕДРАСЫ

Физика-математика факультетининң 4-курс студенти Арзиева Замира
Байжаркиновнаның питкерий қәнигелик жумысы

**Кремнийдеги СЖЭ атомларының технологиялық кириспелер
менен өз-ара тәсирин ИК спектроскоп жәрдеминде анықлаў**

Илимий басшысы ҳәм кафедра баслығы
физика-математика илимлериниң кандидаты Ж.О.Акимова

(қолы)

Мазмуну

Кирисиў.....	3
I Бап. Кремнийдеги сийрек жер элементлерин изертлеў	
§ 1.1 §1.1. Сийрек жер элементлери менен легирленген кремнийдиң қасийетлери.....	5
§1.2. Кремнийдери сийрек жер элементлерин қайта ислеў технологиясы, термокайта ислеўлерди өткеріў хәм диод структураларын таярлаў.....	6
§1.3. Күшли компенсацияланған кремнийде ҳәр қыйлы физикалық кубылыслар.....	9
§1.4. Инфрақызыл нурлардың жутылыў спектрлерин өлшеў тийкарлары....	15
II Бап. Эксперментлер методикасы	
§ 2.1. Өстириў прцессинде сийрек жер элементлери менен легирленген кремнийдиң инфрақызыл спектроскопиясы.....	17
§ 2.2. Кремнийде технологиялық қосымталар менен терең қәдилер пайда етиўши қосымталардың өз-ара тәсири.....	20
§2.3. Сийрек жер элементлери менен легирленген кремний қасийетлерине ионлаўшы нурланыўдың тәсири.....	30
Питкеріў қәнигелик жумысы бойынша жуўмақлар.....	33
Пайдаланылған әдебиятлар.....	34

Кирисиў

Сийрек жер элементлери атомларының кремний көлеминде қатнасыўы кремнийде де хәр қыйлы дефектлердиң пайда болыў процессине күшли тәсир етиў себебинен болады. Сийрек жер элементиниң кремнийдеги өзін тутыўын үйрениўге арналған үлкен экспериментал материалларға қарамастан гольми, европий, самарий хәм лантан атомлары бул бағдарда кемлеў изертленген.

Кремнийде самарийдиң диффузиялық параметрлерин үйрениў бойынша айырым мағлыўматлар ғана бар. Хәзирге шекем кремнийде самарий пайда ететуғын терең қәддилер ҳақында анық бир пикирге тоқталмаған. Самарий, гольмий хәм тағы басқа сийрек жер элементлери атомларының кремнийде басқа электрлик актив хәм актив емес қосымталар менен тәсири улыўма кем үйренилген.

Еритпеден өсириў ўақында да диффузия усылында киритилген сийрек жер элементлери қосымталарының кремний көлеминде өзін қандай тутыўын комплекс изертлеў, бул элементлердиң технологиялық процесслерде бақлаў мүмкин болмаған хәм арнаўлы киргизилген терең қәддили (ТҚ) қосымталар өзлерин қандай тутыўына тәсирин үйрениў қызығыўшылық туўдырады. Кремнийде сийрек жер элементлери қандай параметр хәм қәсийетлерге ийе болыўын изертлеў ушын сезгирлиги күшли хәм анықлаў имканияты жоқары болған, кең мағлыўматлар бере алатуғын метод сыйымлылық спектроскопиясын қолланыў зәрүр. Кремнийде сийрек жер элементлери атомларының қыздырыўда хәм нурланыў тәсиринде өзлерин қандай тутыўы, олардың басқа қосымталар хәм дефектлер менен өз-ара тәсирлерин терең қәддилердиң стационар емес сыйымлылық спектроскопиясы (DLTS), фотосыйымлылық (ФС) хәм инфрақызыл (ИК) нурлар жутылыўы спектроскопиясы қолланылады.

Сийрек жер элементлери қосымталарын пайдаланыў кремнийде углерод хәм кислород бенен интенсив түрде өз-ара тәсир еисиўи себепли сийрек жер элементлерин легирлеўде жоқары концентрацияға шекем жеткериўде де электрофизикалық қәсийетлериниң өзгериўи болмайтуғын жоқары Ом лы кремнийдиң термостабиллигин көтериўде қолланыў орынлы болады.

Сыйымлықлы хәм ИК (инфрақызыл) -спектраскопиялы усыллар менен өсириў уақында самарий, неодим, хәм европий менен легерленген кремнийдиң қәсийетлери изертленеди.

Сийрек жер элементлери менен легирленген кремний қәсийетлери диффузия усылы менен изертлеў нәтийжелери анализленеди. Сийрек жер элементлери

қосымталары бар кремнийдің электрофизикалық қасиетлеріне термикалық қайта іслеу бериу тәсир көрсеткіштері анализдерінен, кремнийде ксслородтың хәр қыйлы муғдарында структуралық дефектлердің пайда болыуын изертлеу бойынша анализлер ісленді.

Арнаулы қасиетлерге ийе ярымөткізгішли материалларға қызығыушылық турақлы түрде өсип бармақта. Бундай материалларды алыу ушын әдеттегідей емес қосымталар менен легирлеу кеңнен қолланылмақта. Сийрек хәм өтиу элементтері менен легирленген кремнийди алыу хәм оның қасиетлерін изертлеу жұмыстары интенсивлестіріледі. Бундай қосымталар менен легирленген кремний көплеген арнаулы ярымөткізгішли әсбаптар ушын қолланылады, мысалы, хәр түрлі фотоқабыллағышлар, жоқары радиацияға шыдамлы қуяш элементтері хәм.т.б.

Кремнийде гольмий, самарий хәм басқада сийрек жер элементтерінің атомларының қатнасыуы радиациялық дефект пайда етиу эффективлігін төменлетеді. Бу эффектти гольмий атомларының нурланыу арқалы киргизілген дефектлер менен өз-ара тәсир етисіу айрықшалығы менен байланыстырыуымыз тийіс.

Хәр қыйлы сыртқы факторлар термо қайта іслеу, хәр қыйлы типлердегі радиация менен нурланыу терең қәдділер пайда етиуші қосымталар менен легирлеу хәм т.б. тәсірі астында пайда болатуғын дефектлерге үлкен дыққат аударылады.

Питкеріу жұмысында кремнийди сийрек жер элементтері менен легирленгендегі процесслерді үйрениу улыұмаластырылып келтірілген.

I Бап. Кремнийдеги сийрек жер элементтерин изертлеу.

§1.1. Сийрек жер элементтери менен легирленген кремнийдин кәсйеттери

Химиялык актив түрде өз-ара тәсир етиуши хәм кремнийге өсиу дәуиринде киритилген азғана муғдардағы сийрек жер элементтери концентрацияларында да комплекслер пайда етиуге укыплы болады хәм онда электрлик актив емес жағдайында қатнасады.

Кремнийде европий, самарий, гольмий хәм тағы басқа сийрек жер элементтерлердин углерод пенен өз-ара тәсир етисиуи анықланған. Европий углерод пенен гольмий хәм самарийге қарағанда активирек өз-ара тәсир етиседи. Нейтрон-активациялык анализ жәрдеминде өткерилген сийрек жер элементтери қосымталы кремнийдеги хәм контроль үлгилердеги (сийрек жер элементтерисиз) углерод муғдарын салыстырыудан үлгилердеги углеродтың улыума концентрациясы сийрек жер элементтери менен легирленген үлгилердегиге қарағанда бир қанша жоқары болады. сийрек жер элементтери қосымталарының кислород пенен өз-ара тәсири еритиндиден өсириу процессинде де болып өтеди. Еритиндиге сийрек жер элементтери қосқан жағдайда үлгилерде кислород концентрациясы кемейип барыуы анықланды. Материалды кислородтан тазалауға алып келиуши ишки геттерлеу болып өтиуи мүмкин.

Годолиний менен легирленген кремний үлгилеринде магнит қабыллаушылығы, Холл эффекти, электр өткизгишлиги хәм ток тасыушылардың жасау уақтының бөлистирилиуи изертленилген экспериментал көрсеткиштери гадолонийдин жүдә үлкен размерлердеги кластерлердин (гадолоний концентрациясының 10^{18} см^{-3} ден үлкен болған) пайда болыуын көрсетеди.

Сийрек жер элементтери ниң дәслепки электрлик актив қосымталар менен күшли өз-ара тәсири хаққында сийрек жер элементтери ниң легирлениу дәрежесинен ғәрезли болғанда хәр қыйлы тәсири үйренилди хәм кремнийдин гадолоний, самарий хәм эрбий менен легирлениуи оның ионланған нурланыу тәсирине тийкарғы электрофизикалык параметрлериниң шыдамлылығын арттыратуғыны анықланды. Бул вакансиялар ушын эффектив ағымы болып есапланыушы сийрек жер элементтериниң металлык қосылыуы бар болыуына байланысly.

Кремнийде сийрек жер элементтери қосымталарының болыуы кремнийде термикалык хәм радиациялык дефект пайда болыу процессине анық тәсир көрсететуғынлығы анықланды. Бирақ анықланған көрсеткиштер бир қанша қарама-қарсы характерге ийе. Буннан басқа көпшилик эксперименттер сезгирлиги салыстырмалы түрде онша жоқары

болмаған Холл эффекти, электрөткізгішлікті өлшеу, магнит қабылдаушылығын өлшеу хәм басқада усыллар жәрдемінде өткерилди.

Кремнийдеги сийрек жер элементлери қәсийетлерин тереңирек изертлеу ушын жоқары шешим уқыпшылығына ийе (сыйымшылық спектроскопиясы, электрон парамагнит резонансы хәм т.б. уқсас) жоқары информатив хәм сезгірлік усылларын қолланыу керек.

Питкеріу жұмысының мақсети кремнийдеги сийрек жер элементлери атомларының технологиялық кириспелер менен өз-ара тәсирин хәм терең қәддилердің стационар емес сыйымшылық спектроскопиясы (DLTS) жәрдемінде изертлеу болып есапланады.

§1.2. Кремнийдери сийрек жер элементлерин қайта ислеу технологиясы, термоқайта ислеулерди өткеріу хәм диод структураларын таярлау

Изертлениуши үлги ушын Чохрольский усылы менен өсирилген хәм тигельсиз зоналық еритіу хәм өсириу процессінде қәлеген сийрек жер элементлери менен легирленген n-типли өткізгішли монокристаллы кремний қолланылды, үлгилердің салыстырмалы қарсылығы 5 хәм 40 Ом*см. Үлгилердің өлшемлери 12*6*1 мм³ болды, ориентация – бағдар бойлап [111].

Кремнийдің қадаған етилген зонасында терең қәддилер пайда ететугын қосымталарды түрли усыллар менен киритіу мүмкин. Бул усыллар эпитаксиал технология бойынша, монокристалларды өсириу ўақтында еритпеге қосымта қосылыуы арқалы, ионлар имплантациясы қатнасуында, диффузия қатнасуында болып өтеди.

Кремнийдеги терең қәддили қосымталардың түрли қәсийет хәм параметрлерин үйрениу ушын монокристалларды өсириу ўақтында еритпеге қосымта қосылыуы арқалы хәм диффузия жәрдемінде киритіу қолланылады.

Терең қәддили қосымталар кремнийде бир қанша үлкен диффузия коэффициентлерине ($D = 10^{-8} - 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ усы 800 - 1300⁰С температураларда), киши коэффициентлерине ($10^{-5} - 10^{-7}$) хәм температураға күшли байланышылық шекли еригішлікке ийе. Әдетте терең қәддили қосымталар диффузиясы диссоциатив механизм бойынша кетеди: алдын кремний түйинлери аралығынан геўекли диффузия болады, кейин қосымтаның түйинлер аралығындағы атомлар орын алмасыуы ақыбетінде пәнжере түйинлерине өтеди. Нәтийжеде жүдә қалың кристалларда қосымтаның жетерлише тегис бөлистирилиуи болып өтеди. Соның ушын диффузия коэффициентин жетерли көп қосымталарды киритіу ушын диффузия усылы қолай есапланады. Кремнийди өсириу ўақтында еритпеге керек болған қосымта қосылыуы арқалы қосымта киритіу бир қанша

киши диффузия коэффициентли элементлер ушын зэрүр болып есапланады. Усы жумыста изертлеулер ушын үлгилер диффузия усылында киритилген.

Сийрек жер элементлери самарий ямаса лантанлы үлгилер диффузия усылында алыныуы төмендеги схемада әмелге асырылды. Дәслепки материал сыпатында $\text{Si}<\text{La}>$, $\text{Si}<\text{La}>$ үлгилерди алыу ушын n хәм p – типли өткизгишликке ийе салыстырма қарсылықлары $0,3 - 100 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ кремний монокристалынан алынады. Үлгилер дисклеринен параллелепипед түрінде кесип алынып хәм дана өлшемлери маркалары М-20, М-14, М-10, М-5 кремний карбид порошоги суспензиясы жәрдемінде избе-из тегисленди.

Буннан кейин үлгилер дистилленген сууда жүдә жақсы жууылғаннан кейин, органикалық еритпедө қайнатылды. Кейинги басқышта кислоталы перекисли жуууы процессинде тазаланады

Бул операциялардан кейин үлгилер толуолда кейин ацетонда қайнатылып майы кетирилди, деионизацияланған сууда жууылды. Оннан кейин үлгилер 10 минут дауамында HNO_3 те қайнатылып СР-4 те дәриленди ($5\text{HF}: 3\text{HNO}_3: 3\text{CH}_3\text{COOH}$), оннан кейин $3\text{HCL}: \text{HNO}_3$ араласпасында қайнатылды хәм плавикли кислотада жууылды. Кейинги операция бул – перекисли жуууы ($1\text{HCL}: 2\text{H}_2\text{O}: 5\text{H}_2\text{O}_2$ араласпасында 10 минут дауамында қайнатыу) болып есапланады. Хәр бир циклден кейин деионизацияланған сууда жақсылап жууылды.

Кремнийге киритилген самарий ($\text{Si}<\text{Sm}>$) пластиналары жоқары температуралы қайта ислеулерден алдын жақсылап тазаланады. Дәслеп үлгилер избе-из түрде М-14, М-10, М-7 карборундлы порошоклар менен шлифовкаланды, олардың салыстырмалы қарсылығы хәм өткизгишлик типі өлшенди.

Жоқары температуралы қайта ислеу (ЖҚИ) алдын-ала дәриленген плавикли кислотада, деионизацияланған сууда жууылған хәм 1250°C да бир неше саат дауамында күйдирилген оптикалық кварц трубаларында СУОЛ типіндеги қарсылық печинде өткерилди. Печьтиң температурасы анықлығы ± 5 ге тең платина – платинородийли термопара жәрдемінде тексерип турылады.

Термоқайта ислеу $900-1200^\circ\text{C}$ температура интервалында $0,5-20$ саат дауамында өткерилди. Сууытылуы үлгилерди тез майға таслау арқалы алып барылды. Усылар менен бир уақытта контроль үлгилерди күйдириу (сийрек жер элементисиз) алып барылады.

Жоқары температуралы қайта ислеуден кейин пластиналардан шлифовка менен $30-40$ мкм қалыңлықтағы механикалық бузылған қатлам алып тасланды. Кейин үлгилер ысқылап дәрилегиште дәриленди.

Сыйымлылық өлшеулерін өткеріуі үшін жоқары вакуумда $n\text{-Si}<\text{Sm}>$ де алтын менен шаңландырылып Шоттки диодлары хәм контроль үлгилер исленди.

Омлық контакт үшін никель химиялық жол менен исленди ямаса вакуумда (10^{-5} мм.сын.бағ.) сурьма менен шаңландырылды.

Кислород хәм углерод муғдарларын тексеріуі мақсетінде ИК-жutyылу спектрин өлшеуі үшін үлгилер механикалық жол менен полировкаланады.

Бул өлшеулер барлық n -типтеги кремний үлгилерди қалеген сийрек жер элементи мысалы самарий менен легирлегеннен кейин өткізгішлік типинің өзгеріуі хәм салыстырмалы қарсылығының күшейіуі бақланатуғынлығын көрсетти. Усы типтеги іслеу берілгенде p -типи үлгилерде салыстырмалы қарсылық мәніслери киши шамаға төменлейди, ал өткізгішлік типі өзгеріссіз калады. Алынған нәтижелерди 42 саат дауамында 1200°C температурада термикалық іслеу берілген n - хәм p -типи өткізгішліклерге ийе(дәслепки салыстырмалы қарсылығы $15 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) болған таза үлгилерди өлшеуде алынған нәтижелер менен салыстырды. Өлшеулер хәр қыйлы типтеги үш үлгиде өткерілди. Өлшеулер нәтижелери таза n - хәм p -типи кремнийде өткізгішлік типі термикалық іслеу беріуі нәтижесінде өзгермейтуғынлығын көрсетти. Бунда n -типи үлгилерде салыстырмалы қарсылық шамасының киши шамаға кемейіуі, ал p -типи үлгилерде киши шамаға көбейіуі бақланады. Самарий менен диффузиялық легирленген хәм де термикалық контроль кайта исленген кремний үлгилери үшін тереңлиги бойынша салыстырмалы қарсылық өлшеулері өткерілди. Бул экспериментлердің нәтижелерінде $\text{Si}<\text{Sm}>$ үлгилеріндегі салыстырмалы қарсылықтың бөлістиріуі еки участкадан турады: дәслепкисінде ρ -ның ~ 50 мкм тереңлікке шекемги бирден өсип кетиуі бақланады, кейинрек ρ -ның мәніси тураклы болады хәм ρ -ның тереңлік пенен өзгеріуі сезилерли дәрежеде болмайтуғынлығы бақланды. Сыйымлылық өлшемлер үшін легирленген хәм контроль кристаллардан жоқары вакуумде (10^{-5} мм) алтынның шаңландырылуында диодлар таярланады. Омлық контакт хызметін химиялық қоршалған никель ямаса вакуумда шаңланған сурьма атқарды.

§1.3. Күшли компенсацияланған кремнийде хәр қыйлы физикалық қубылыслар

Анализ хэм алынған көрсеткишлерди салыстырыўдан, ярым өткизгиштин қадаған етилген зонасында дәслепки сайыз қосымтаның концентрациясы менен салыстырылған концентрацияларда терең қәддили локаль халлардың пайда болыўы терең орайлардың қәсийетлери болып есапланатуғын бир қанша физикалық кубылысларға алып келеди. Бундай кубылысларға төмендегилер жатады. Өткизиўшиликтиң узақ уақытлы релаксациясы (ӨУР), қалдықлы өткизиўшилиқ (ҚӨ), токтың тербелиси хэм басқалар. Бул кубылыслардың пайда болыў себеплерин үйрениў олардың ярым өткизгиштеги характерин анықлаў мүмкиншилигин береді. Хәлсиз хэм күшли компенсацияланған ярым өткизгишлерде қосымталардың активация энергиясы, қосымталы зона структурасы хэм күшли компенсацияланған ярым өткизгиштин теориясы дүзилген.

Ярымөткизгиштеги терең орайлардың тәбиятын көрип шығыўды жеңиллестиретуғын хәр қыйлы жуўмақларды келтирген. $K=N_a/N_d \approx 1$ болғанда күшли компенсацияланған ярым өткизгишлерде ток тасыўшылар терис зарядланған акцепторлар хэм тап сондай сандағы оң зарядланған донорлардың майданы тәсири астында болады. Бул майдан ток тасыўшылардың локализация областы, Ферми қәддисин хэм қосымталардың активация энергиясын анықлайды.

Хәлсиз легирленген жағдайда ($N_d a^3 \ll 1$, бунда a - донор қосымтаның бор радиусы) қосымта зонасы өткизгишлиқ зонасынан бөлекленген (n- типли ярым өткизгиш ушын) хэм жетерли дәрежелердеги төмен температураларда барлық аўысық электронлар донорларда жайласады. Бундай үлгилердин электр өткизгишлигинин температурадан ғәрезлилиги еки экспоненциал участкаға ийе болады: өткизиў зонасына электронларды узатыўға байланысқан E_1 активация энергиясын аңлататуғын жоқары температуралы участка, хэм қосымталы зонада секирмели түрде байланысқан E_2 активация энергиясына ийе төмен температуралы участка.

Белгили бир жақынласыўда бундай системада F-Ферми энергиясы E_0 хэм $E_1 = E_v$ қосымта орайының байланыс энергиясы менен сәйкес келеди. Бунда E_v - изоляцияланған қосымтаның ионизация энергиясы.

Бул жағдайларда электронлар оң потенциалға ийе орынларда жайласады, олардың энергиясы максимал халатта болады, соннан келип шыққан халда Ферми қәддисин қадаған етилген зонаның терең ишине өтип алады.

Компенсация дәрежесине байланыслы R масштаблы қосымталар флуктуациясы өседі, бирақ R_c дан үлкен болмайды.

$$R_c = N_d^{1/3} \cdot n^{2/3} \quad (1)$$

Үлкен масштабтың флуктуация потенциалы электронлар менен тегисленеди хэм бундай флуктуациялар эффективли болмайды.

Бул флуктуациялар электронлардың энергияларының төмендеги мәніслерге сәйкес келмейді:

$$F_0 = v(R_c) = \frac{\ell^2}{\varepsilon} \cdot \frac{N_d^{2/3}}{n^{1/3}} \quad (2)$$

Ферми қаддиниң қалы төмендегидей анықланады:

$$F = E_0 - C_1 F_0 \quad (3)$$

Бунда C_1 -санлы көбейткіш ($C_1 > 0$).

Жоқарырақ температураларда ($E_d \ll T \ll F$ болғанда) Ферми қадди төмендегіше анықланады:

$$F = -E_0 + KT \ln \left(\frac{n}{N_d} \right) - C_2 F_0 \quad (4)$$

бунда C_2 -санлы көбейткіш ($C_2 > 0$)/

Компенсацияланған ярым өткізгіште активация энергиясы E_1 E_b дан F_0 шамасына артық, бул жерде F_0 компенсация дәрежесиниң үлкейіуі менен $(1-K)^{-1/3}$ ға өседі, ал компенсацияның функцияланған дәрежесиндегі тийкаргы қосымталардың концентрациясының өсіуі менен $N_d^{1/3}$ ға өседі.

$$E_1 = E_0 - F = E_0 + \frac{C_1 E_d}{(1-K)^{1/3}} \quad (5)$$

Активация энергиясы E_3 көрсеткішлер тәртібі бойынша потенциал энергияның флуктуация амплитудасына тең:

$$E_3 = C_1 E_d / (1-K)^{1/3} \quad (6)$$

Қосымталы атомлардың флуктуациясы менен байланыс потенциал энергияның флуктуациясы орын алған бундай орталықта эффективли салыстырмалы қарсылықтың локаль мәніслерінде флуктуациялайды.

$$\rho = \rho_n \cdot \exp \left(\frac{-F + E_n}{kT} \right) \quad (7)$$

$$\rho = \rho_0 \exp \left(\frac{1.73}{N_d^{1/2}} \right) \text{ -секирмели түрдегі өткізгіштік көрсеткіші}$$

$$a_1 = \frac{1}{\sqrt{2\mu \cdot E_0}} \text{ - қосымталы атомның қалының радиусы.}$$

Бул теңдемелер эксперименттің $K \approx 1$ ге ийе компенсацияланған ярым өткізгіштердің сәйкес келіуіші дүзетіулері менен F , E_1 , E_3 хәм ρ лардың өзгеріулерінің ызығамлылығын анықлап береді. Экспериментал көрсеткіштер менен есаплаулар көрсеткіштерінің сәйкес келіуіне сезілерлі дәрежеде тәсір ететуғын бул ири масштаблы флуктуациялар арасындағы потенциал тосқынлықларды есапқа алыу болып есапланады. Бундай тосқынлықлардың тәбиятын изертлеу бір теклі емес система есабында күшлі компенсацияланған ярым өткізгіштер теориясының рауажланыуына алып келеді. Сыртқы тәсірлер есабынан күшлі компенсацияланған ярым өткізгіштерде теңсалмақсыз өткізіуішеңлік релакциясын изертлеуден релакция аномаль түрде узақ уақыт дауам етеді (10^5 с. шекем). Изертлеулерінде узақ уақытлы релаксация кубылысының ызығамлылығы анализленді хәм бір теклі емес ярым өткізгіштердің модели усынылған.

Жоқарыда келтірілген системаны жақтыландырғанда тосқынлықлардың күшлі модуляциясы болып өтеді. Ярым өткізгіштің тең салмақлы өткізгішлігі тек ғана жақтылық пенен босап қалдырылған бетлік халлардың тең салмақлы толтырылыуын қайта тиклегеннен кейін ғана орнатылады. Толтырыу кейінгі иркіліулерде тосқынлықлардың бәлентлігі өсіуі себеплі әсте өтеді.

Компенсацияланған ярым өткізгіштердегі өткізгішліктің узақ уақытлы релаксациясы хәм қалдықлы өткізгішлік хәдійселері бойынша екі хәқыйқый жағдай тийкарланған:

1.Өткізгішліктің узақ уақытлы релаксациясы ярым өткізгішліктің төмен ом лы (НО) хәм жоқары ом лы (ВО) участкалары арасында жайласқан энергетикалық тосқынлық пенен белгіленеді. ϕ бәлентлікке ийе бундай тосқынлықтың барлығы тоқ тасыушылардың рекомбинация уақтының көбейіуіне алып келеді.

$$\tau = \tau_0 \exp(\phi / kT) \quad (8)$$

бунда τ_0 -тосқынлық жоқ болғанда ток тасыушылардың рекомбинация уақты. $T = 300\text{K}$ болғанда $\tau = 10^{-3}\text{с}$ хәм егер $\phi = 0,6\text{ эВ}$ деп есапласақ τ мәнісі 10^7с ға жетеді, бул уақыт өткізгішліктің узақ уақытлы релаксациясы ушын характерлі болады.

2.Өткізгішлікте тең салмақсыз электронлардың қатнасын тәмінлеу ушын ионизацияланған донорларға уқсаған төмен ом лы қатламдағы рекомбинациялық

орайлардың барлығын алып таслау керек, буннан донорлық орайлар жеткиликли дәрежеде сайыз болыуы шәрт. Оларға барлық теңсалмақлы электронлардың иркилиуин шеклейди, НО областындағы қалған барлық терең локаль орайлар толық электронлар менен толтырылуы тийис.

Қалдықлы өткізгішликті бақлаудың керекли шәрти бул НО қатламының тосқынлық пенен контактте болыуы есапланады. НО хәм ВО қатламлар арасындағы тосқынлықлардың пайда болыуының еки модели усынылады: НО қатламының терең акцептор қәддилерге ийе бетлик пенен модели, хәм НО қатламнан электронлар иркилетуғын терең компенсацияланбаған акцепторларға ийе жоқары ОМ лы қатлам менен контактте болатуғын НО қатлам модели. Қалдықлы өткізгішликтің қайталаныулары арасындағы релаксация уақыт арасындағы хәм НО хәм ВО қатламлар арасындағы байланыс табылды.

Бул көрсеткішлерди мүмкин болған кристалл параметрлери мәнислери менен салыстыруу тийкарында анықланған нәрсе, қалдықлы өткізгішлик болғанда өткізгішликтің экспериментал тексерилип атырған мәнислери төмендеги усыныста түсиндириледі. Бир теклиемес ярым өткізгіш дисперсияланған ВО участкаға ийе НО матрица системасы болып есапланады.

Өткізгішликтің узақ уақытлы релаксациясы хәм қалдықлы өткізгішлик бақланатуғын ярым өткізгіштің бир текли емеслигинің тосқынлық модели авторлардың жұмысларында анық көрсетилген.

Қалдықлы өткізгішликтің релаксациясының характерленген уақытларына (10^6 - 10^7 с) $\varphi=0,2$ эВ рекомбинациялық тосқынлық көрсеткіши сәйкес келеді. Бирак бундай тосқынлықлары бар қалдықлы өткізгішлик тоғы көрсеткіши оның эксперименталь мәнислеринен бир қанша тәртіпте төмен болыуы керек. Бул рекомбинациялық тосқынлықлардан басқа және дрейфли тосқынлықтыңда бар екенін билдиреди.

Қалдықлы өткізгішликтің (ҚӨ) температуралық ғәрезлигин изертлеуден, максимал қалдықлы өткізгішлик болғанда дрейфли тосқынлықлар $\varphi=0,05$ эВ бәлентликке ийе болатуғынлығы анықланды. ҚӨ ның температуралық ямаса майданлық сөндирилиуине қарап өсип барады. ҚӨ ның кинетикалық түсиуі төмендегише анықланады.

$$I_0 / I(t) = (1 + \alpha \cdot t) \cdot \nu \quad (9)$$

бул формулада, I_0 , $I(t)$ фотоқозғатыу хәм t уақтың сөндирген моменттеги қалдықсыз өткізгішлик тоғы. α -соған сәйкес $t = 0$ болғанда рекомбинациялық тосқынлық бийиклиги менен анықланатуғын константа, $\nu < 1$ рекомбинациялық хәм дрейфлик

тосқынлықтар бәлентликлеринің қатнасына байланысly. НО хәм ВО қатламлар арасындағы рекомбинациялы хәм дрейфли тосқынлықларының бар болыуы себепли, қалдықлы өткізгішлик қубылыслары болыуы тастыйықланған хәм бул моделди қалдықлы өткізгішликти түсиндириу ушын тийкар етип алыуға болады. Бир текли емес ярым өткізгішлерде ДР қубылысы компенсацияланыушы қосымталардың типлерине ғәрезсиз бақланады хәм тийкарынан компенсация дәрежеси K хәм компенсацияланыушы қосымтаның концентрациясы менен анықланады.

Бирақ өткинши металлар (Mn, Ni, Co, Fe, Zn) қосымталар менен легирленген кремнийде ДР хәм ОП қубылысларын экспериментал изертлеулер көрсетти, бул эффектлер марганец пенен легирленген кремнийде анық көрсетилген. Компенсациялаушы қосымтаның (Mn) бундай айрықшалығы $\sim 10^{15} \text{см}^{-3}$ концентрациялы марганецтің еки есе оң зарядланған ионларының түйинлер аралық характери менен түсиндириледі.

Күшли компенсацияланған кремнийде ($K \approx 1$) жүдә көп муғдардағы атомларға ийе марганец атомларының кластерлеринің пайда болыуы төмен температура хәм жақтылықта өткізиушеңлик электронларын иркиуши қосылыулардың пайда болыуына алып келеді.

Алынған изертлеу нәтийжелери тийкарында төмендеги шешимге келдик. Қосымталардың терең қәдилеринің параметрлерин дәл анықлау ушын материалдың компенсация дәрежесин есапқа алыу әҳимийетли.

1. Компенсация дәрежесинің тоқ тасыушыларының μ_1 хәрекетине тәсирин изертлеуде, кремнийдің компенсацияланған үлгилеринде μ мәниси компенсацияланбаған материалларға қарағанда бир қанша төмен, хәм бул өзгешелик күшли компенсацияланған кремнийде анық пайда болады.

Компенсацияланған ярым өткізгішлерде донорлық характердеги компенсациялаушы қосымталарда, мысалы кремнийдеги M_n атомларында образецлердің бети бойлап салыстырмалы қарсылығының шашратылғанлығы бақланады.

2. Үлгилердің бети бойлап салыстырмалы қарсылықларының шашратылыу себеплерин анықлау ушын ρ өзгешелигин анықлау ушын хәр қыйлы образецлерде никель, кобальт хәм марганец пенен легирленген кремнийдің электрлик қәсийетлерине диффузиялық легирлеу шәртлеринің тәсири изертленген.

§1.4. Инфрақызыл нурлардың жутылыу спектрлерин өлшеу тийкарлары

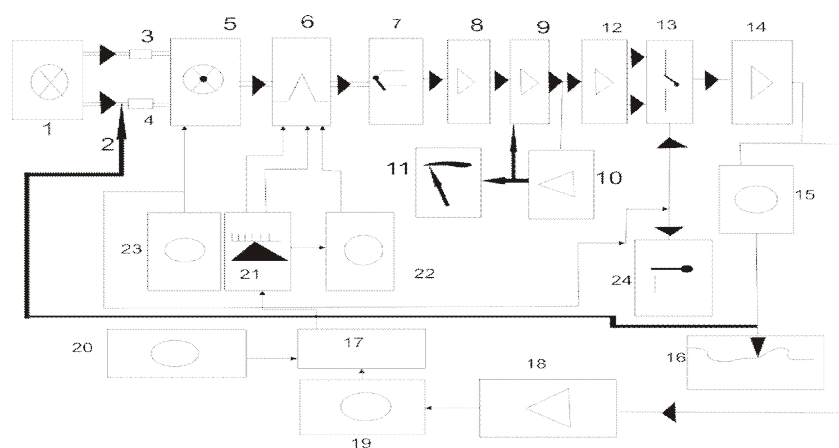
Инфрақызыл нурлар жутылыу спектрлерин өлшеу принципі төмендегідей болады. Specord-IR-72 спектрофотометрі үлгіден өтіуші инфрақызыл нурлар 1200 ден 400 см^{-1} ге шекем болған бөлегін толқын санына байланысшылық спектрі сыяқлы жазады.

Толқын санының бул диапазонында дерлік барлық атом группалары тийкарғы тербеліслері жайласқан, соның ушын жазып алынған спектр кристаллар хәм көп органикалық бирикпелер структурасын анықлау хәм тазалығын анықлау мүмкіншилигін береді.

Нурды өткізіу коэффициентін өлшеу қурылма жолын оптикалық тегіслеу принципі бойынша екі түрлі метод бойынша әмелге асырылады (1-сүрөт).

Монохроматордың шығыу саңлағынан шығып атырған нур бөлегі нур қабыллағыш (термоэлемент) та фокуслененді. Шығыушы екі нур дәстесі өлшениуші хәм эталон үлгіден өтип гезекпе-гезек айланыушы секторлы айнадан өтип монохроматор кириу саңлағына түседі. Дәуірлік схема бойынша қабыллағыш нурдың екі ағымынан биринің өлшениуші яки эталонлардан өтіуші монохроматикалық бөлегін тутады. Егер өлшенип атырған нур бирдей интенсивлікке ийе болса қабыллағыш өзгеріуші кернеу береді, себебі салыстырыушы нур дәслеп өзинің әдеттегі интенсивлігине ийе болады, өлшениуші нур болса пәсейген болады. Өзгермелі кернеу сигналы күшейтириледі, фаза бойынша туурыланып қайта өзгертиулерден кейін серводвигателді басқаруу ушын пайдаланылады, ол болса өлшеу саңлағын салыстырыушы нур тәрепке бурады. Салыстырыушы нур интенсивлігі өлшениуші нур кемейген интенсивлігине сәйкес келгенше диафрагма бурыла береді. Specord-IR-72 әсбабының оптикалық конструкциясы схемалық түрде 1 -сүрөтте көрсетілген.

Нурланыу дерегинен шыққаннан кейін, екі нур дәстесі өлшениуші үлгині жайластыруу ушын хызмет қылатуғын кюветалы камерадан өтеді. Буннан басқа салыстырыушы нур жолында жазыушы бөлім хәм жүдә анық болған потенциометр менен механикалық байланысқан өлшеуші диафрагма болып, ол өлшениуші шамаларды екилемші индикаторға шығыуын тәмийинлейді. Диафрагманың өткізіуі жылжыушы түйинлі дискте программаластырылыуы мүмкін, толқын санына байланысшы болғанда, салыстырыушы нур арасындағы интенсивлік компенсацияланады хәм сол тәрізде толқын узынлығы бойлап 100% басқаруудың тегіс болыуы әмелге асырылады.



1-сүрөт. Блок-схема SPECORD – 75 IR

1-дерек, 2-оптикалык диаграмма, 3-4-изертленип атырған үлги хэм эталон, 5-айланбалы айна 12,5 Гц, 6-монохроматор, 7- нурландырыўшы приемник , 8-күшейткиш, 9-усилитель,10күшейткишти регулировкалаўшы автоматикалык система , 11индикатор, 12-главный усилитель, 13-демодулятор, 14-усилитель 50Гц, 15-самопис, 16- регистрограмма, 17- уақытты регистрациялаўшы, 18- усилитель,19 –толқын саны, 20 – двигатель, 21-толқын санының көшери, 21-айланбалы айна.

Нур қабыллағыш жақтылық сигналларын электр кернеўине өзгертиреди, бунда электр сигналы дэслепки басқыш күшейткиши хэм тийкарғы күшейткиш жәрдеминде күшейтириледи хэм қайта өзгертiriледи.

Спектрлерди өлшеў хэм кислород хэм углерод концентрациясын анықлаў ушын үлгилер төмендегише таярланады: дэслеп олар карборунд порошоклар менен ысқыланып, кейин алмас пастасы жәрдеминде механикалық түрде тегисленди. Үлги еки қаптал тәрeпи параллеллиги бузылмаўы ушын арнаўлы үлгини услап турыў қурылмасы қолланылды. Бундай ислеўден кейин үлгилер бети ҳақыйқаттан айнадай жалтырақ болады. Бул тегислеў процесси сыпаты үлги сыртына нур дэстесин түсириў арқалы бақланады. Егер тегисленген бет нурды жақсы қайтарса, бул ислеў бериў сыпаты жақсы болған деп есапланады.

Бети жақсы ысқыланған үлгилерде ИҚ нурлар жутылыў спектрлерин толқын санының $1200-400 \text{ см}^{-1}$ интервалында өлшенгеннен кейин кислород $N_o^{\text{опт}}$ хэм углерод $N_c^{\text{опт}}$ концентрациялары есапланады:

Оптикалық актив кислород $N_o^{\text{опт}}$ ва углерод $N_c^{\text{опт}}$ концентрацияларын есаплаў ушын

$$N_0^{\text{опт}} = 3,3 \cdot 10^{17} \frac{1}{d} \ln \frac{I_1}{I_0} \quad (2-20)$$

$$N_c^{\text{опт}} = 1,1 \cdot 10^{17} \frac{1}{d} \ln \frac{I_1}{I_0} \quad (2-21)$$

аңлатпалары қолланылды.

Бунда I_1 – өткен нур интенсивлиги;

I_2 – жутылған нур интенсивлиги;

D – үлгі қалыңдығы.

Дәслепки үлгилерде $N_0^{\text{опт}}$ хәм $N_c^{\text{опт}}$ лар өлшенгенен кейин оларға вакуумде шаңланған жоқары тазалыққа ийе самарий қатламынан диффузия жолы менен самарий киритиледи.

Самарий диффузиясынан кейин тап усы үлгилерде ИК-жутылыу усылы менен $N_0^{\text{опт}}$ хәм $N_c^{\text{опт}}$ өлшенди. Кейин n-Si геде p-Si геде самарий киритилгенен кейин оптикалық актив кислород концентрациясы самарий диффузиясы шараятында термикалық қайта исленген контроль үлгилерге салыстырғанда 10 ÷ 20% төменлеуі анықланды.

Кремнийде оптикалық актив углеродтың жутылыуына сәйкес келетуғын толқынның $\lambda = 16,4$ мкм узынлығында ИК-сектрлери түсириледі. Кантроль хәм легирленген образецлерде оптикалық актив углеродтың төменлеуі эффекти бақланбайды.

Термикалық қайта исленген контроль үлгилерди өлшеу нәтижелери, оларда салыстырмалы қарсылық мәнислери дерлик өзгериссиз қалатуғынлығын көрсетти. p-типли үлгилерде салыстырмалы қарсылық мәниси аз муғдарда төменлейди, бирақ бунда өткізгішлік типі өзгермей қалады. Самарий менен диффузиялық легирленген үлгилер ушын хәм контроль үлгилер ушын салыстырмалы қарсылықлар тереңдіклери бойынша өлшеу өткерилген. Нәтижелерден $S_i < S_m$ үлгилеринде бөлистириу профили дәслеп ρ ның ~80 мкм тереңлікке шекемги бирден өсиуі бақланады, кейинирек ρ мәниси турақласады хәм ρ ның тереңлік пенен өзгериуі көринбеди. Ал контроль үлгилер ушын, жоқарыда айтқанымыздай ρ мәнислериниң тереңлиги сезилерли дәрежеде өзгермейди.

Жоқары температуралы қайта ислеу самарий атомларының активлигине алып келеди хәм бунда кремнийдің қадаған етилген зонасынын жоқарғы ярымында самарий атомлары менен байланысқан еки терең қәдди пайда болады. Оннан басқа Si көлеминде самарий атомларының қатнасыуы термикалық дефектлердің пайда болыуы эффективлигин төменлетеди.

II Бап. Эксперименттер методикасы

§ 2.1. Өстиріу процессінде сйрек жер элементлери менен легирленген кремнийдің инфрақызыл спектроскопиясы

Сйрек жер элементлери қосымталары менен диффузиялық легирленген кремний қасиетлерин изертлеуіге арналған. Бул бапта кремнийдің, самарий хәм басқада сйрек жер элементлери электрофизикалық қасиетлерин комплекс изертлеу нәтижелери келтирилген. Тексерилиуши үлгилер ушын Чохральский усылы менен өсирилген (кислородлы кремний) n-типли өткізгішлікке ийе монокристалл кремний хәм тигелсиз зоналық еритиу (кислородсыз кремний) хәм өсириу процессінде еритиндиден сйрек жер элементлери атомлары менен легирленген монокристалл қолланылады.

Самарий менен легирленген термикалық қайта исленген кремний үлгилерінде терең қәддилердің энергетик спектрин үйренілгенде терең қәддилериниң эффективлиги техногиялық араласпалардан кислород хәм углеродтан дәслепки кремнийдің лантан менен қоспасынан ғәрезли екенлиги анықланды. Изертлеу нәтижелери лантан менен дәслепки кремнийде кислород концентрациясы қанша көп болса, жоары температуралы қайта ислеу менен стимулланған ГУ концентрациясы сонша көп болыуын көрсетеди.

Бул эффект технологиялық араласпалардың сйрек жер элементлери менен өз-ара тәсир етисиу мүмкиншилиги бар деген пикирге алып келеди.

Бул пикирди тексерип көриу ушын ИК спектрлери изертленилди. Өлшеу нәтижелери төмендегилерди көрсетеди, $n\text{-Si} < \text{Sm} >$ үлгилери термикалық қайта ислеу бериуден кейин оптикалық актив түйин аралық кислород концентрациясы лантан атомларының санына хәм ВТО (термикалық қайта ислеу уакты) температурасына байланыслы 10-20% ке көбейди. Қайта ислеу температурасы көтерілген сайын көрилип атырған эффект күшлирек болады.

Усы үлгилерде спектрлердің анализинен, бунда пайда болған ТК концентрацияларының синхрон көбейиуі бақланады: $E_c - 0,23 \text{ эВ}$, $E_c - 0,39 \text{ эВ}$.

Яғнай, оптикалық актив кислород концентрациясының хәм лантан атомлары менен ТК ниң бир уақытта күшейтирилиуі $n\text{-Si} < \text{Sm} >$ ға термикалық қайта ислеу бериулердің тәсир нәтижеси болып есапланады.

Бизге белгили, кремнийде сийрек жер элементлери араласпасы ушын бөлистирилиудің кишкене коэффициентлери характерли, сонлықтан кремнийдеги сийрек жер элементлери киши шекли еритилиўге ийе болыўы керек. Мысал ушын гадолений хәм самарий араласпалары ушын төмендегилер белгиленген, $4,7 \cdot 10^{-7}$ хәм $1 \cdot 10^{-8}$ бөлистириў коэффициентинде еритилиў шеги $2,4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ хәм $5,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ти қурайды. Бундай киши еритиндиден кремнийдің монокристалларын алыў қыйынласады хәм еритиндиде сийрек жер элементлери концентрацияларының жоқары көрсеткишлерине алып келеди. Сийрек жер элементлери араласпасының узынлығы бойынша бир тегис бөлинбеўине хәм монокристал қуймалардың диаметрине, сондай-ақ араласпа шығындыларының, яғный преципитатлардың пайда болыўына алып келеди.

Буннан бурын металлограф микраскоп хәм локаль рентгенструктуралық микроанализ жәрдемінде диффузия жолы менен яки еритиндиден өсириў процесінде лантан атомлары менен легирленген кремний үлгилерінде 30 мкм ден 300 мкм ге шекем болған размерлердеги ири преципитатлар анықланған.

Химиялық составларын анықлаўға жәрдем беретугын рентгенструктуралық микроанализ соны көрсетеди, лантан қосымталы кремний үлгилерінде табылған преципитатлар 50 % ке жақын сийрек жер элементлеринен турады. Бундай преципитатлардың сийрек жер элементлери менен болған қурамына кремнийдің еритпесінде барлық уақыт қатнасуғын технологиялық қоспалар киреди.

Көринип турғанындай самарийли кремнийдің ВТО үлгилери температураның $900-1200^{\circ}\text{C}$ интервалларында бул преципитатлардың тарқалыўына алып келеди, буның ақыбетінде оптикалық актив кислородтың концентрациясы көбейеди хәм самарий атомларының активлиги менен шәртленген бир неше терең қәддилер пайда болады.

Салыстырмалы қарсылықтың бөлистириў профили кремнийдің тереңлиги бойынша гадолиний хәм самарий қосымталарының екеўи ушында бирдей, бул кремнийдеги Gd хәм Sm атомлары тәрәпинен пайда етилген қәддилердің бир қыйлы тәбиятта болыўына алып келеди.

Sm менен байланысқан қәддилер пайда етиў эффективлиги сийрек жер элементлери қосымталары қатнасыўынан хәм үлгилердің қайта ислеў температурасынан ғәрезли болады. Және мақсет етип қойылған нәрсе изертленип атырған үлгилердің жоқары температуралы қайта ислениўи $N_0^{\text{опт}}$ оптикалық актив кислород концентрациясының көбейиўине алып келеди. Бул эффект ВТО процессінде сийрек жер элементлери атомларының активлиги менен байланысly. Көринип турғанындай үлгилерди термикалық қайта ислеў сийрек жер элементлери қосымталары бар кислород комплекслериниң бузылыўына алып

келеді. Соның себебінен шамалауымызша N_0^{opt} ниң күшейіуі хәм Eu хәм Sm атомлары менен байланысқан терең қәддилердің пайда болыуы болып өтеді. Gd атомлары термикалық қайта іслеу менен активлесіуіге жол қоймайды, бул гадолиний преципитатларының жоқары байланыс энергиясына байланысly.

§ 2.2 Кремнийде технологиялық қосымталар менен терең қәддилер пайда етіуі қосымталардың өз-ара тәсірі

Бізге белгили, кремнийде барлық ўақытта үлкен концентрацияларда қатнасуғын хәм термо қайта іслеуде, нурландырыуда хәм диффузиялық легирлеуде актив қатнасыушы тийкарғы контролланбайтуғын қосымталар болып өсіу қосымталары деп аталыушы-кислород хәм углерод есапланады. Хәзирги ўақытқа шекем кислород хәм углеродтың қатнасыуында көплеген комплекслер хәм кластерлер үйренилди, ярымөткізгішли материаллардың қасийетлериниң қәлиплесіуіндеги олардың тутқан орны анықланды. Кремнийдеги киритилген элементлер атомларының жоқары хәрекетшенлиги технологиялық қосымталар кислород хәм углерод пенен хәр қыйлы түрдеги комплекслерди пайда етіуде өз-ара бирге хәрекет етіуі сөзсіз.

Кремнийдеги никельдің электрлик актив хәм электронейтрал атомларының характерлерин хәм бул процеслерде кислород хәм углеродтың қатнасыуын изертлеулерде көплеген терең қәддили қосымталар ушын электрли нейтраль үлестің электрли актив үлеске қатнасы $10^2 \div 10^3$ ти қурайды. Соның ушын, қәлеген қосымтаның диффузиялық киритилиуінде болып өтетуғын физикалық процеслердің механизмлерин анықлау ушын кристалл пәнжереде қосымта атомларының муғдарын анықлау керек, айрықша атап айтқанда қосымталардың электрли актив емес бөлеклериниң ярымөткізгішлердің электрофизикалық қасийетлериниң қәлиплесіуін анықлап алыу керек. Кремнийдеги никельдің қосымта атомларының электрли актив емес үлеси жағдайларын изертлеулер циклы өткерилди. Кремнийге диффузиялық жол менен никельдің киритилиуі $Si < Ni >$ үлгилериниң ИК-жutyлыу спектрлерин үйрениуде, кислородтың жutyлыуы пикиниң интенсивлигиниң сезилерли дәрежеде өзгеріуіне алып келеді, киритилген никель концентрациясы қанша көп болса, бақланып атырған эффект сонша көп болады. Углеродтың жutyлыу пикиниң сезилерли өзгерислері хәм жаңа пикилердің пайда болыуы анықланбады.

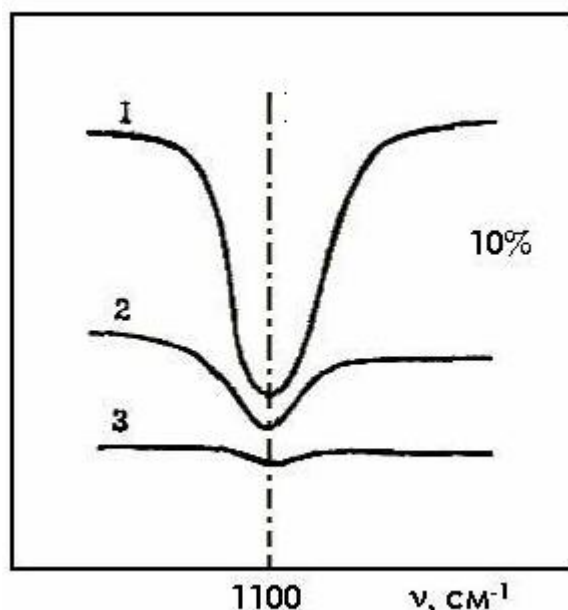
Алынған көрсеткішлердің анализи төмендеги шешімге алып келеді, кремнийге никель киритилгенде, электрли хәм оптикалық актив емес комплекслер ямаса никель хәм кислород атомларының қатнасыуындағы екінши фазаның (преципитатлар) бөлинип

шығыуы болып өтеди. Никель атомларынан туратуғын преципитатлардың пайда болыуы $Si < Ni >$ үлгилердің дефект структураларын изертлеу уақында эксперименталь түрде табылды).

Кремнийди никель менен диффузиялық легирлеу хәм кейин бирден таплау $Si < Ni >$ үлгилериниң мөлдирлигиниң төменлеуине алып келеди, бундай хәдийселер эсте сууытылған үлгилерде бақланбаған еди.

Оптикалық актив кислородтың кемейиуи хәм никель атомларын киритилгендеги кремнийдің мөлдирлигиниң жоғалып кетиу эффекти де табылған. $Si < Ni >$ үлгилериниң мөлдир емеслиги түйинлер-аралық актив емес никель атомларының жайласыуына байланыслы: таплау уақында тапланыу пайда болыуы болып өтеди хәм үлги мөлдир болмай қалады; эсте ақырынлық пенен сууытылғанда ири топланыуға бирикпеген хәм басқа қосымталардан (мысалы, кислородтан) еркин изоляцияланған түйинлер аралық атомлар түринде қайта бөлистирилиуіге никель үлгереди хәм кристалл өзиниң оптикалық мөлдирлигин сақлап қалады.

Никель атомлары преципитатлары диффузия уақында емес, үлгилердің диффузиядан кейин эстелик пенен сууыту процессинде пайда болады. Никельдің кремнийге диффузиялау уақты хәм температуралық интервал барлық түрдеги дефектлик ассоциациялардың еритилиуіне, екинши фазаның бөлинип шығыуына, қосымталардың топланыуына, соның ишинде никель атомларының, хәм олардың кремний пәнжересинде бир тегис бөлистирилиуіне алып келеди. $Si < Ni >$ үлгилериниң диффузиядан кейинги тез тапланыуы кремний пәнжересинде никель атомларының майда дисперсли сондай халының тоңлатылыуына алып келеди.



2.1-сүүрет. $Si < Ni >$ үлгисиниң ИК-жutyлыў спектрлери
иймекликлер: дэслепки Si, 2 хэм 3-Ni қосымталарын диффузиялық киритиўлерден
кейингиси

$Si < Ni >$ үлгилерин 0,5-20 саат даўамында 300-900⁰С температура интервалында хәр қыйлы термо қайта ислеў эксперименти, ИК-жutyлыў спектрлериниң қайтадан дүзилиўи болып өтетуғынлығын көрсетеди. 10-15 саат даўамында 700⁰ да қайта ислеў кремнийдиң дэслепки үлгилериниң дефект түрине байланыслы еки жаңа жutyлыў пиклериниң пайда болыўына алып келеди: дислокациялық үлгилердиң термо қайта ислеў бериўи $K = 1085 \text{ см}^{-1}$ областындағы пиктиң жutyлыўына алып келеди, дислокациялық емес үлгилерде $K = 1260 \text{ см}^{-1}$ областындағы пиктиң пайда болыўына алып келеди. $Si < Ni >$ үлгилериниң НТО дан кейинги жutyлыў спектрлериниң анализи, қайта ислеўдиң, жutyлыўдың таза жолағы пайда болатуғын температуралар областында түйинлер аралық оптикалық актив кислород пенен байланыслы жолақтың интенсивлиги сезилерли дәрежеде төменлейди, ал углерод пики өзгериссиз қалатуғынлығын көрсетеди.

$Si < Ni >$ үлгилериниң 600⁰С тағы температуралы қайта ислеўи керисинше, ИК актив кислород концентрациясының көбейиўине алып келеди, бул эффект тек ғана кремнийге диффузиялы киритиўден кейин дәрхал суўытылған үлгилерде ғана бақланады. Кремний көлеминде никель атомларының қатнасыўында төмен температуралы қайта ислеўдиң түйинлер аралық кислородтың характерине тәсирин изертлеў анализи хэм бир-бирине

салыстырылыуы, $Si < Ni >$ үлгилеринің ИК-жutyлыу спектрлерінде жаңа жолақлардың пайда болыуы никель хәм кислород атомларының қатнасыуында қандайда-бир орайлардың пайда болыуын көрсетеди. Пайда болған орайлар электрлик актив емес, себеби жаңа терең қәддилер табылмады. Көрсетилген температуралар интервалындағы төмен температуралы қайта іслеулер кремнийдеги никель атомлары менен байланысқан терең қәддилердің күйдирилиуіне алып келеди, хәм никель атомларының электронейтрал халларына өтиуі менен белгиленеди.

Кремнийде термикалық дефект пайда болыу процесслерінде сийрек жер элементлери ролинде хәм термикалық тәсир етиу барысында лантанойдлардың атомларының активлигин үйрениу мақсетінде 0,5-100 саат дауамында 900-1250⁰С температуралар интервалларында жоқары температуралы қайта іслеулер өткерилди. Үлгилердің сууытылыуы хәр қыйлы тезликлерде өткерилди.

Оның менен бирдей уақытта контроль үлгилердің күйдирилиуі де өткизилди. 1200⁰С температурада еки саат дауамында термикалық қайта іслеген самарий менен кремнийдің DLTS үлгилеринің спектрлери келтирилген. Спектрлер $t_1=10$ мс хәм $t_2=60$ мс болған 77-300K температура интервалында турақлы кернеулилик ($V_{обp}=8$ В) режимінде өлшенеди. Бул өлшеулерден, самарий менен легирленген хәм жоқары температураны қайта іслеуден өткен кремний үлгилеринің DLTS спетрлерінде $T_{max}=110$ К хәм $T_{max}=180$ К максимумлар бақланады. Жоқары температуралы қайта іслеу нәтийжесінде n-Si<Sm> қадаған етилген зонаның жоқарғы ярымында пайда болған терең қәддилер белгилеп өтилген $E_c-0,23$ эВ хәм $E_c-0,3$ эВ ионизация энергияларына хәм $\sigma n \sim 4 \cdot 10^{-17}$ хәм $1,2 \cdot 10^{-15}$ см² электронларды орналастыру кесимлерине ийе болды.

Термо қайта іслеуден өткен контроль үлгилердің (самарий қосымтасыз) DLTS спектрлерінде $E_c-0,23$ эВ ионизация энергиясына ийе бир терең қәдди бақланады. DLTS спектрлеринің хәм вольт-фарадей характеристикаларының анализинен, бақланып атырған қәддилер концентрациясы, В қәдди концентрациясы қайта іслеу температурасынан хәм жоқары температуралы қайта іслеуден кейинги үлгилердің сууыу тезлигинен күшли ғәрезли болатуғынлығын көриуге болады. А қәдди концентрациясы контроль үлгилерде бақланады, кремний панжересіндеги самарий атомлары муғдарынан ғәрезли болмайды хәм жоқары температуралы қайта іслеуден температурасы жоқарылаған сайын сезилерли дәрежеде төменлейди.

Бирдей температураларда қайта іслеу уақтында хәм жоқары температуралы қайта іслеуден кейинги сууытуу тезлигинде самарий менен легирленген үлгилерде бул терең қәддинің концентрациясы контроль үлгилердегиге қарағанда бир қанша кем.

Сол үлгилерде DLTS өлшемлерине паралель түрде фотосыйымлылық спектрлери өткерилди. 1000°C хәм 1200°C да жоқары температуралы қайта ислеў өткизилген p-Si<Sm> үлгилериниң ФЕ спектрлеринде $h\nu=0,23$ хәм $0,39$ эВ областларын көриўимизге болады.

Самарий қосымталы кремний үлгилериниң салыстырмалы қарсылығының күшейтилиўи хәр қыйлы жоқары температуралы қайта ислеў процесинде компенсациялаўшы орайлардың киргизилгенлигин көрсетеди.

Алынған нәтийжелерден самарий атомларының активациясы менен жоқары температуралы қайта ислеўде, акцепторлық характерге ийе екенлигин көриўге болады.

Контроль үлгилерде жоқары температуралы қайта ислеўлердиң тәсири нәтийжесинде салыстырмалы қарсылығының усыған уқсаған өзгериўи көринбейди.

Нәтийжелердиң анализи, өсириў процесинде еритиндиден кремний пәнжересине киритилген самарий атомлары кремний көлеминде электрлик актив емес жағдайда жайласатуғынлығын көрсетеди.

$E_c=0,23$ эВ қәдди термикалық қайта ислеў дефекти болып есапланады, себеби ол контроль үлгилердеде(самарийсиз термо қайта исленген)бақланады.

Si<Sm> үлгилерде $E_c = 0,23$ эВ терең қәддилер концентрациясы контроль үлгилердегиге қарағанда кем екенлигин көрсететуғын факт самарий атомлары кремний де термикалық дефектлердиң пайда болыў эффективлигин төменлетеди.

Еритиндиден өсириў уақтында самарий хәм басқада сийрек жер элементлери менен легирленген кремний үлгилериде изертленилди. Сыйымлылық өлшеўлер нәтийжелери, гадолиний өсириў уақтында киритилген қалған басқа лантанойдлар қосымталары сыяқлы кремний көлеминде электрлик активликти көрсете алмайды.

$0,5 \div 10$ саат даўамында $900 - 1250^{\circ}\text{C}$ температура интервалында өткерилген термикалық тәсир етиўлер сийрек жер элементи самарий атомларының активлигине алып келмеди, себеби бундай үлгилердиң DLTS спектрлеринде терең қәддилер сезилерли концентрацияларда бақланбады. Самарий атомлары электронейтраль болған курамда қатнасып кремний көлеминде ири преципитатлар пайда етиўге қолай хәм шамалаўымызша, бул преципитатлар байланыстың күшли энергиясына ийе. Бул байланыс сонша беккем болып оны үзиўге көрсетилген температуралардағы интервалда жоқары температурасы қайта ислеўлердинде күши жетпейди.

Изертлеў нәтийжелериниң анализинен, лантанойдлар менен дәслепки кремнийдиң кислород концентрациясы қанша көп болса, жоқары температуралы қайта ислеў менен

стимулланған терең қаддилердің концентрациялары сонша көп болатуғынлығы анықланды. Бул эффект технологиялық қосымталардың лантанойдлар менен өз-ара тәсир етисиү мүмкиншилиги бар.

Болжауларды тексерип көриү ушын ериитиндиден өсириү процесинде самарий менен легирленген хәм хәр қыйлы жоқары температуралы қайта ислеулерден кейинги кремнийдің дәслепки үлгилеринде ИК жутылыу спектрлери үйренилди.

Өлшеу нәтижелеринен, $n\text{-Si}<\text{Sm}>$ үлгилериниң термикалық қайта ислеуден кейин оптикалық түйинлер аралық актив кислород концентрациясы жоқары температуралы қайта ислеуден температурасына хәм самарий атомының муғдарына қарай 10-20% ке көбейеди. Температураның күшейиуи менен көрилип атырған эффект күшлирек болады. Тап усы үлгилердеги спектрлердің анализинен, бундай уақытта пайда болған терең қаддилер концентрациясы синхронлы көбейиуи бақланады: $E_c-0,23$ эВ, $E_c-0,39$ эВ. Яғный самарий атомлары менен шәртленген оптикалық актив кислород хәм терең қаддилердің концентрацияларының бир уақытта көбейиуи термикалық қайта ислеулердің $n\text{-Si}<\text{Sm}>$ ға тәсир етиү нәтижеси болып есапланады.

Жоқарыда исленген болжаулар экспирементте бақланып атырған $n\text{-Si}<\text{Sm}>$ лантанойд орайларының кирисиү тезлиги контроль кремнийге салыстырғанда шегараланғанлығын түсиндирип береді.

Лантан хәм европий менен легирленген кремнийде терең қаддили орайлардың пайда болыуына термикалық ислеудің тәсири.

Еритпеден өсириү процесинде европий хәм лантан менен легирленген кремний үлгилери n -типли өткизгишликке ийе, салыстырмалы қарсылығы (ρ) 20 –100 Ом см ди қурады. Эталон образецлер ушын Чокральский усылында өсирилген ρ 20 –100 Ом см болған әдеттеги $n\text{-Si}$ қолланылды. Сыйымлықлы өлшеулер алтын менен пууландырылып таярланған Шоттки барьерлеринде өткерилди, бунда Омлық кантакт ушын сурьма пууландырылды. DLTS спектрлерин турақлы кернеулилик режиминде де эмиссия тезликлери $t_1=2$ мс хәм $t_2=6$ мс болған айнасы бар бир мәртели сканерлеу жолы менен турақлы сыйымлықлы режимде алып барылды және хәр қыйлы тезлик эмессиялы айналар менен көп мәртели сканерлеу жолы менен алып барылды. Бунда t_2 хәм $t_1:t_2=3t_2$ қатнасы белгилеп барылды, бул жерде t_1 1ден 450 мс шекемги аралықта өзгереді. Кайтыу кернеулилигиниң өлшеу импульсиниң узынлығы 1 мкс –100 мс интервалларында өзгерип турады. Бир мәртели сканерлеу

хәдийсесинде спектрлердің есабы экспериментал DLTS–иймекликти теоретикалық иймеклик пенен салыстырыў жолы менен өткерилди.

n-Si (Eu) хәм n-Si (La) образециндеги оптикалық актив (түйинлер аралық) кислород ($N_0^{\text{опт}}$) тың концентрациясын 300K де еки нурлы схемада Specord –IR –75 спектрофотометр жәрдеминде өлшенди. Кремнийде жайласқан түйинлер аралық кислород $\lambda=9,1$ мкм максимумлы жутылыў полосасын береді. Жутылыў полосасы интенсивлиги образецтеги кислород концентрациясына туўры пропорционал. $N_0^{\text{опт}}$ шамасының баҳасы төмендеги формулада өткерилди:

$$N_0^{\text{опт}} = 3,3 \times 10^{17} (\ell/d) \ln(I/I_0), \text{ см}^{-3},$$

I хәм I_0 - түсип атырған хәм шағылысқан жақтылықлардың интенсивликтери.

Европий хәм лантан менен легирленген кремний образецлеринде ИК-жутылыў спектрлерин өлшеў нәтийжелеринен, түйинлер аралық кислородтың муғдары $(0,6-7) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ интервалында хәрекет ететуғынлығы анықланды.

Термикалық тәсир етиў ўақтында европий хәм лантан атомларының активация мүмкинлигин үйрениў эталон үлгилерде өткерилди. Активация мүмкиншилигин үйрениў максетинде хәм олардың термикалық дефект келтирип шығарыў процессине тәсирин үйрениў ушын n-Si(Eu) хәм n-Si(La) үлгилерин 900-1200 °C температуралы интервалларда 2-50 саат даўамында термикалық қайта ислеў өткерилди.

n-Si(Eu) үлгилериниң әдеттеги DLTS спктрлери 2 саат даўамында 1000 хәм 1200 °C да өткерилген термикалық қайта ислеў спектрлери келтирилген. Спектрлерди 77-320K температура интервалларында турақлы сыйымлықлы (DLTS) режимде түсирилген. Терең қәдди параметрери көп мәртели сканерлеў жолы менен DLTS сектрлеринен алынған. $\ln(OT^2)=f(1/LT)$ Аррениус ғәрезлигинен алынған.

Есаплаўлардан, $E_c-0,23$ эВ, $E_c-0,4$ эВ хәм $E_c-0,4$ эВ хәм $E_c-0,46$ эВ ионизация энергиялы терең қәддиге тең екенлиги анықланады. Электронлардың бул бағаналарында орналасыў кесимлери 2×10^{-17} , $2,5 \times 10^{-15}$ хәм $1 \times 10^{-16} \text{ см}^2$ сәйкесликти қурайды. [11]

Тексерилип атырған бағаналардың концентрациялары 1200°C термикалық қайта ислеўден кейин 1×10^{12} , 8×10^{13} , $3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ге тең. Усыған уқсас термикалық қайта ислеўлерге қойылған контроль үлгилерде бир бағана көринеди. $E_c - 0,23$ эВ

Анализ ҳам алынған көрсеткішлерди салыстырыулардан, европий атомларының қатнасуына, қайта іслеу температурасына ҳам $n\text{-Si (Eu)}$ үлгілерінің қайта іслеуден кейінгі сууыу тезлігіне екі теңдеме сезгір екенлігі анықланады. $E_c-0,40$ эВ ҳам $E_c-0,23$ эВ Eu ның қатнасуына онша тасір етпейді, усыған уқсаған параметрлерге ийе бағана лантанойдлардың қосымтасыз болған эталон үлгілерінде ушрасады. Шамасы $E_c-0,23$ эВ ионизация энергиялы терең қадди $n\text{-Si (Sm)}$ үлгілеріндеде, $n\text{-Si (Eu)}$ үлгілерінде де термикалық қайта іслеу дефекті болып есапланады.

Термикалық қайта іслеуден алдыңғы ҳам кейінгі ИК-жutyылу спектрлерінің өлшеу нәтижелері термикалық қайта іслеу ақбетінде $n\text{-Si (Eu)}$ үлгілерінде оптикалық актив кислородтың концентрациясының көбейіуін көрсетеді. Температураның жоқарылауы менен үлкейіу эффективлігі $N_0^{\text{опт}}$ күшлірек ҳам 1200°C термик қайта іслеуден кейін ҳам де шынықтырылғаннан кейін $N_0^{\text{опт}}$ ның күшейіуі $\sim 15\text{-}20\%$ ке жетеді. Солай етип, 1100°C температурада $n\text{-Si (Eu)}$ үлгілерінің қайта іслеуі шынықтырылғаннан кейін $N_0^{\text{опт}} \sim 15\text{-}20\%$ ке көбейіуіне алып келеді, температураның көтеріліуі менен үлкейіу эффекті $N_0^{\text{опт}}$ күшлірек болады.

Қосымша қылып айтамыз $\text{Si}\langle\text{Eu}\rangle$ үлгіердің DLTS спектрінде бул эффект пенен синхром түрде терең қаддилердің пайда болыуы бақланады.

DLTS, ФЕ ҳам ИК жutyылу спектрлерін өлшеу нәтижелерінің анализи соны көрсетеді, термикалық қайта іслеудегі $n\text{-Si}\langle\text{Eu}\rangle$ де ГУ ниң пайда болыу эффективлігі дәслепкі европийлі кремнийдің кислород мұғдарына байланыссы болады. Дәслепкі $n\text{-Si}\langle\text{Eu}\rangle$ де $N_0^{\text{опт}}$ қанша көп болса, ВТО менен стимулланған ГУ концентрациясы сонша кем болады.

Солай етип, өсириу процессінде кремнийге киритілген европий атомлары электрлік активлік көрсетпейді ҳам сезілерлі концентрацияда кремнийдің қадаған етилген зонасында терең қаддилерді пайда етпейді.

Жоқары температуралы қайта іслеу европий атомларының активлігіне алып келеді ҳам бунда кремнийдің қадаған етилген зонасынын жоқарғы ярымында европий атомлары менен байланысқан екі (ТҚ) пайда болады. Оннан басқа Si көлемінде Eu атомларының қатнасуы термикалық дефектлердің пайда болыу эффективлігін төменлетеді.

Хәр қыйлы сыртқы факторлардың (жоқары температуралы қайта іслеулер ҳам нурланыулар) самарий менен легіленген Si үлгілерінің мысалында өсириу

процессинде сийрек жер атомлары менен легирленген кремнийдің қасиетлерине тәсірін изертлеу нәтижелері келтірілген.

Сийрек жер элементтері атомлары менен легирленген кремний үлгілерінде хэм контроль үлгілерде терең қадділер концентрациясы DLTS пиклерінің максимумы менен, сондай-ақ вольт-фарадей характеристикасы жәрдемінде анықланады.

Кремнийде термикалық дефект пайда болуу процесслерінде сийрек жер элементтері ролинде хэм термикалық тәсір етіу барысында сийрек жер элементтері атомларының активлігін үйрениу мақсетінде 0,5-100 саат дауамында 900-1250⁰С температуралар интервалларында жоқары температуралы қайта іслеулер өткерілді. Үлгілердің сууытылуы хэр қыйлы тезліклерде өткерілді.

Оның менен бірдей уақытта контроль үлгілердің (сийрек жер элементтері қосымталарсыз) күйдирилиуі де өткізілді. 1200⁰С температурада екі саат дауамында термикалық қайта іслеген самарий менен кремнийдің DLTS үлгілерінің спектрлері келтірілген. Спектрлер $t_1=10$ мс хэм $t_2=60$ мс болған 77-300К температура интервалында турақлы кернеулілік ($V_{обр}=8$ В) режимінде өлшенеді. DLTS спектрлерінен $\Delta C / \Delta C_{max}$ есаплау иймеклігі менен теңлестіріу жолы менен алынған Аррениус графигі деп аталуышы $\ln(\theta) = f(10^3 / T)$ ғарезлігі келтірілген. Бул өлшеулер соны көрсетті, самарий менен легирленген хэм хэм жоқары температураны қайта іслеуден өткен (ВТО) кремний үлгілерінің DLTS спетрлерінде $T_{max}=110$ К (пик А) хэм $T_{max}=180$ К (пик В) максимумлы екі пик бақланады. DLTS пиклерінің хэр қайсысы ушын $\ln(\theta) = f(1 / T)$ ғарезлігінің қыялығынан, жоқары температуралы қайта іслеу нәтижесінде n-Si<Sm> қадаған етилген зонаның жоқарғы ярымында пайда болған терең қадділер белгилеп өтилген $E_c-0,23$ эВ хэм $E_c-0,3$ эВ ионизация энергияларына хэм $\sigma n \sim 4 \cdot 10^{-17}$ хэм $1,2 \cdot 10^{-15}$ см² электронларды басып алу кесімлеріне ийе болды.

Самарий менен легирленген кремнийдің өткелиндей, термикалық қайта іслеуден өткен контроль үлгілердің (самарий қосымтасыз) DLTS спектрлерінде $E_c-0,23$ эВ ионизация энергиясына ийе бір терең қадді бақланады. DLTS спектрлерінің хэм вольт-фарадей характеристикаларының анализи бойынша, бақланып атырған қадділер концентрациясы, В қадді концентрациясы қайта

ислеу температурасынан хэм (ЖТҚ) ВТО дан кейинги үлгилердің сууыу тезлигинен күшли ғәрезли болады.

Кремний көлеминде сийрек жер элементлери концентрациясы қанша көп болса хэм ВТО температурасы қанша жоқары болса, $E_c - 0,39$ эВ ГУ концентрациясы сонша көп болады. Керисинше, А қәдди концентрациясы контроль үлгилерде бақланады, кремний панжересиндеги самарий атомлары муғдарынан ғәрезли болмайды хэм ВТО температурасы жоқарылаған сайын сезилерли дәрежеде төменлейди.

Бирдей температураларда қайта ислеу уақтында хэм жоқары температуралы қайта ислеуден кейинги сууытыу тезлигинде самарий менен легирленген үлгилерде бул ГУ ниң концентрациясы контроль үлгилердегиге қарағанда бир қанша кем.

Сол үлгилерде DLTS өлшемлерине паралель түрде фотосыйымлылық спектрлери өткерилди. 1000°C хэм 1200°C да ВТО өткизилген $n\text{-Si}<\text{Sm}>$ үлгилериниң ФЕ спектрлеринде $h\nu = 0,23$ хэм $0,39$ эВ областларында анық көринетуғын текшелерди көриуимизге болады. Индуктивленген ФЕ спектрлеринде самарий концентрацияларына пропорционал болған $h\nu = 0,23$ эВ да еки онша үлкен болмаған текшелер пайда болады.

Бул терең қәддилерди қайта зарядкалауға байланыслы сыйымлылық релаксациясы жүдә әстелик пенен өтеди. Бул бақланып атырған терең қәддиниң (ГУ) дың фотоионизациясының кесим шамасының аз санда екенлигин көрсетеди.

Хәр қыйлы режимлерде ($T_{\text{ВТО}}$, $V_{\text{охл}}$ хэм т.б.) жоқары температуралы қайта ислеуден алдын хэм кейин самарийли кремний үлгилериниң салыстырмалы қарсылығын өлшеуден, күйдириу уақтының өсиуи менен ВТО ρ ның өсиуине алып келеди. $n\text{-Si}<\text{Sm}>$ үлгилериниң салыстырмалы қарсылығының 1100°C температурадағы қайта ислеудиң узынлығынан ғәрезлиги көрсетилген.

Самарий қосымталы кремний үлгилериниң салыстырмалы қарсылығының күшейтилиуи хәр қыйлы ВТО процесинде компенсациялаушы орайлардың киргизилгенлигин көрсетеди. Буннан самарий атомларының активациясы менен жоқары температуралы қайта ислеуде, акцепторлық характерге ийе деген жуўмаққа келемиз.

Контроль үлгилерде жоқары температуралы қайта ислеулердиң тәсири нәтийжесинде салыстырмалы қарсылығының усыған уқсаған өзгериуи көринбейди. Нәтийжелерден алынғанындай өсириу процесинде еритиндиден кремний пәнжересине киритилген самарий атомлары кремний көлеминде электрлик актив емес жағдайда жайласады.

Шамалауымызша, $E_c = 0,23$ эВ қаддини термикалық қайта іслеу дефекти болып есапланады, себеби ол контроль үлгилердеде (самарийсиз термо қайта ісленген) бақланады.

$Si<Sm>$ үлгилерде $E_c = 0,23$ эВ терең қаддилер концентрациясы контроль үлгилердегиге қарағанда кем екенлигин көрсететугын факт, самарий атомлары кремний де термикалық дефектлердің пайда болуы эффективлигин төменлетеди.

Еритиндиден өсириу уақытында гадолиний менен легирленген кремний үлгилериде изертленілди. Сыйымлылық өлшеулер нәтижелери, гадолиний өсириу уақытында киритилген қалған басқа сийрек жер элемент қосымталары сыяқлы кремний көлемінде электрлик активликти көрсете алмайды.

Изертлеу нәтижелеринің анализи, сийрек жер элементлери менен дәслепки кремнийдің кислород концентрациясы қанша көп болса, жоқары температуралы қайта іслеу менен стимулланған терең қаддилердің концентрациялары сонша көп болатуғынлығын көрсетти. Бул эффект техналогиялық қосымталардың сийрек жер элементлери менен өз-ара тәсир етисиу мүмкиншилиги бар деген пикирге алып келеди.

Бул болжауларды тексерип көриу ушын еритиндиден өсириу процесінде самарий менен легирленген хәм хәр қыйлы жоқары температуралы қайта іслеулерден кейинги кремнийдің дәслепки үлгилерінде ИК жутылуы спектрлери үйренілди.

Өлшеу нәтижелеринен, $n-Si<Sm>$ үлгилеринің термикалық қайта іслеуден кейин оптикалық түйинлер аралық актив кислород концентрациясы ВТО температурасына хәм самарий атомының муғдарына қарай 10-20% ке көбейетуғынлығы анықланды. Температураның күшейиуи менен көрилип атырған эффект күшлирек болады. Усы үлгилердеги спектрлердің анализинен, бундай уақытта пайда болған терең қадди (ГУ) лердің концентрациясы синхронлы көбейиуи бақланады: $E_c=0,23$ эВ, $E_c=0,39$ эВ. Яғный самарий атомлары менен оптикалық актив кислород хәм терең қаддилердің концентрацияларының бир уақытта көбейиуи термикалық қайта іслеулердің $n-Si<Sm>$ ға тәсир етиу нәтижеси болып есапланады.

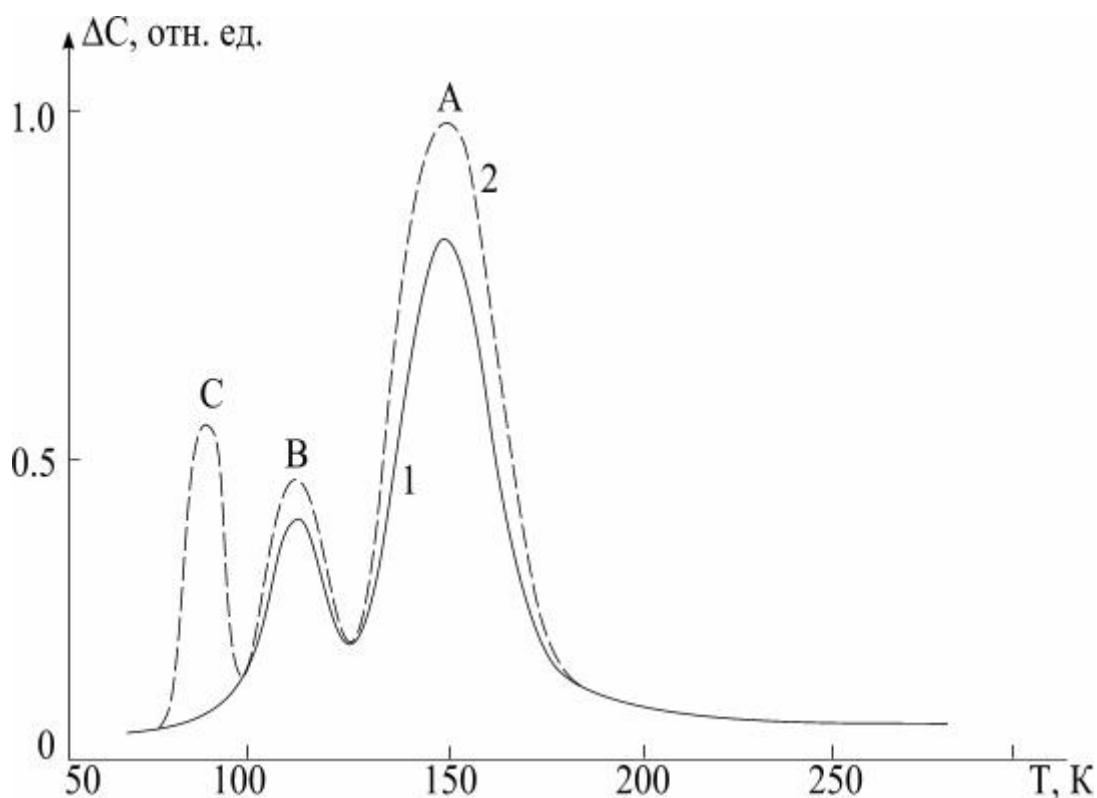
Шамалауымызша, самарийли кремнийдин үлгилеринің жоқары (ВТО) сы температураның 900-1250⁰С интервалларында бул преципитатлардың тарқалып кетиуине алып келеди, соның себебинен оптикалық актив кислородтың концентрациясы көбейип кетеди хәм самарий атомларының активациясы менен

шәртленген бир неше терең қәддилер пайда болады. 16,5 мкм да оптикалық актив углеродтың жутылыўи полосасында өзгерис байқалмайды.

§2.3. Сийрек жер элементлери менен легирленген кремний қәсийетлерине ионлаўшы нурланыўдың тәсири

Жумыста γ - нурланыўдың сийрек жер элементлери атомлары менен легирленген кремнийдиң қәсийетлерине тәсирин изертлеўи нәтийжелери берилген.

Изертлеўи ушын самарий хәм түйинлер аралық кислородтың хәрқыйлы муғдарындағы n-Si<Sm> үлгилери қолланылды. Жоқарыда көрсетилгениндей термикалық қайта ислеўи өткерилмеген дәслепки n-Si<Sm> да DLTS спектрлеринде терең қәддилер бақланбайды.



Сүүретте Si<Sm> диң DLTS спектрлери (1)үлгини нурландырыўдан алдын, (2) нурландырыўдан кейин

Үлгилердің нурланыуы $\sim 3,4 \cdot 10^{12}$ кв/см²·с ағым интенсивлигиндегі ^{60}Co γ -дерегі менен өткерилди. Олар менен бир уақытта контроль үлгилердің нурланыуы да өткерилди. (Si қосымтасыз дәслепки Si хәр қыйлы $N_0^{\text{опт}}$, $n - \text{Si} < \text{Sm} >$ ге уқсас ρ). Хәр бир нурланыу этапынан кейин γ нурланыу нәтийжесинде пайда болған терең қәдди концентрациясы хәм параметрлери өлшенди.

^{60}Co $\Phi \sim 8 \cdot 10^{17}$ кв/см²·с (иймеклик 1-1 партия үлгилери $N_0^{\text{опт}} \sim 8 \cdot 10^{16}$ см⁻³, иймеклик 2-11 үлгилер $N_0^{\text{опт}} \sim 8 \cdot 10^{17}$ см⁻³) дозалы γ квантлары менен нурланған $n - \text{Si} < \text{Sm} >$ үлгилериниң әдеттеги DLTS спектрлери келтирилген.

DLTS спектриниң анализинен, $n - \text{Si} < \text{Sm} >$ үлгилеринде нурланыу нәтийжесинде (1 партия) $E_c - 0,17$ эВ ионизация энергиялы жаңа терең қәдди пайда болады. Бул ГУ ниң параметрлери А-орайдың (ваканция –кислород комплексиниң) белгили радиациялық дефекттиң (РД) параметрлери менен туўыры келеди. 11 партия үлгилеринде еки жаңа ТК бақланды: $E_c - 0,17$ эВ хәм $E_c - 0,43$ эВ бунда ең баслысы болып параметрлери басқа белгили радиациялық дефект Е-орай (ваканция фосфор комплекси) параметрлери менен туўыры келетуғын екинши қәдди болып есапланады. Косымша қылып айтыўымыз керек, А хәм Е –орайлары кремнийдің кантроль (Sm сыз) үлгилериндеде бақланады.

$n - \text{Si} < \text{Sm} >$ менен нурланған бакланып атырған қәддилердің дозалық ғәрезлилигин кантроль үлгилердеги самарий бар үлгилерде радиациялық дефектлерди киритиў тезлиги контроль үлгилерге қарағанда төмен. Солай етип, Si де Sm атомларының қатнасыуы радиалық дефект пайда етиў эффективлигин төменлетеди, бул соннан дерек береді, нурланыу менен киритилген дефектлер менен самарий атомларының өз-ара тәсир етисиў айрықшалығына байланысly.

Тап усындай хәдийсе, радиациялық дефект пайда етиў процессиниң эффективлигин төменлетиў гадолиний хәм европий қосымталары бар кремний үлгилеринде де бакланды. Бул эффектлерди шамалаўымызша сийрек жер элементлери атомларының структуралық дефектлер менен хәм нурланыу арқалы киритилген дефектлер менен өз-ара тәсир етисиў айрықшалығы менен байланыстырыў орынлы. $\text{Si} < \text{Sm} >$ үлгилеринен өзгеше, $\text{Si} < \text{Gd} >$ хәм $\text{Si} < \text{Eu} >$ үлгилеринде А-орай (ваканция кислород комплекслери) хәм Е-орай (ваканция фосфор комплекслери) концентрациялары- тийкарғы радиациялық

дефектлер бир қанша кемлеу. Бул факт шамалауымызша, үлгилердеги сийрек жер элементлери қосымта преципитатлары тек ғана ваканциялар емес, сондай-ақ технологиялық қосымталар (мысалы кислород) атомлары ушын ишки геттерлер ролин атқарады.

Бизге белгили, кремнийдеги Gd хәм басқада сийрек жер элементлери атомлары кластерлер типіндеги ири пайда болыуларға салыстырмалы түрде группаланады. Усы жумыста көрилип атырған n-Si<Sm> ге РД ны киритиу тезлигин пәсейтиу, n-Si<Sm> де де самарий кластерлериниң пайда болыу хәдийсеси болып өтиуи мүмкин. Бул кластерлар радиациялык дефектлер менен актив түрде өз-ара тәсир етисиуи мүмкин, мысалы, самарий атомларының бир бөлеги, гадолиний атомлары сыяқлы, Si де дисперсли жағдайда орналасады хәм белгили бир шараятларда олар аннигиляция орайлары болып хызмет етиуи мүмкин.

Солай етип, жокарыда исленген болжаулар экспирементте бақланып атырған n-Si<Sm> сийрек жер элиментлердеги <СЖЭ> А хәм Е-орайларының кирисиу тезлиги контроль кремнийге салыстырғанда шегараланғанлығын түсиндирип береді.

Питкериу қәнигелик жумысы бойынша жуўмақлар

1. Питкериу жумысында Кислород хәм углерод концентрациясын аныклау ушын хәм спектрлерди өлшеу ушын үлгилер таярлау хәм кремнийди сийрек жер элементлери менен легирленгенде болып өтетуғын физикалық қәсийетлер хәм термикалық, раиациялық дефектлер менен өз-ара тәсирлесиуин үйрендик.
2. Лантаноидлар қатарындағы элементлерди металларда, ярымөткізгішлерде хәм қуймаларда легирлеуши қосымта түрінде пайдаланыу олардың механикалық хәм физикалық қәсийетлериниң жақсыланыуына алып келеди.
3. Жокары температуралы қайта ислеуден өткен, n – Si <Sm> үлгилериниң қадаған етилген зонасының жоқарғы ярымында терең қәдилер табылды.
4. Самарийли кремнийдин үлгилериниң жокары температураның 900-1250⁰С интервалларында бул преципитатлардың тарқалып кетиуине алып келеди, сонлықтан оптикалық актив кислородтың концентрациясы көбейип кетеди хәм самарий атомларының активациясы менен бир неше терең қәдилер пайда болады.

5. Бақлаўлардан самарий атомларының кремнийде болыўы дефектлер пайда болыў тезлигин кемейтеди.

Әдебиятлар

1. Фистуль В.И. Атомы легирующих примесей в полупроводниках. М., Физматлит, 2004, 432 с.
2. В.В. Кирсанов « Радиационные дефекты и связанные с ним эффекты». Соросовский образовательный журнал 2001 №10, с-88-94
3. Баграев Н.Т., Власенко Л.С., Волле В.М. и др. Термостабильность кремния, легированного примесями РЗЭ при выращивании методом Чохральского. ЖТФ, - 1984, - т.54, - в.1, - с.207-208.
4. Александров О.В. Модель сегрегации примесей редкоземельных элементов при твердофазной эпитаксиальной кристаллизации кремния. Санкт-Петербург. Том1, N4 стр 283-286, 1999 г.
5. Макаренко Л.Ф. Проверка применимости модели моновалентного дефекта для описания свойств комплекса вакансии--кислород в кремнии GaAs ФТП, 2000, т. 34, вып. 10 с.1162. <http://www.ioffe.ru/journals/ftp/2000/10/>
6. А.П.Барабан, Л.В.Милоглядова, В.И.Тер-Нерсисянц. Влияние электрического поля на зарядовое состояние ионно-имплантированных структур кремний-диоксид кремния. НИИ физики С.-Петербургского государственного университета. ПЖТФ, 2001, т. 27, в.3.
7. Бочкарева Н.И., Хорев С.А. Влияние низкотемпературного межфазного переноса заряда на границе Si/SiO₂ на фотоответ кремниевых барьерных структур ст.1228
8. <http://www.ioffe.ru/journals/ftp/2000/10/>
9. Медведкин Г.А. Влияние диффузионной длины и поверхностной рекомбинации на фотолюминесценцию анизотропных кристаллов ФТП, 2000, том 34, выпуск 5 с.533. <http://www.ioffe.ru/journals/ftp/2000/05/>
10. Гасан-заде С.Г., Старый С.В., Стриха М.В., Шепельский Г.А. Низкотемпературные особенности фотоэлектрических свойств кристаллов Cd_xHg_{1-x}Te с дырочной проводимостью: влияние вымораживания дырок и упругого напряжения ФТП, 2000, т. 34, вып.10 с.1187 <http://www.ioffe.ru/journals/ftp/2000/10/>

11. Физика и материаловедение полупроводников с глубокими уровнями. Под ред. Фистуля В.И., М., Металлургия, 1987, 232 с.
12. Садыгов З.Я., Бурбаев Т.М., Курбатов В.А. Лавинный фотодиод со свойствами структуры металл--диэлектрик—полупроводник ФТП, 2001, том 35, выпуск 1 ст.115. <http://www.ioffe.ru/journals/ftp/2001/01/>
13. Лебедев А.А., Лебедев А.А., Давыдов Д.В. Емкостные измерения в случае сильной зависимости последовательного сопротивления базы диода от приложенного напряжения фтп с.113. <http://www.ioffe.ru/journals/ftp/2000/01/>