

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

**БЕРДАҚ АТЫНДАҒЫ ҚАРАҚАЛПАҚ МӘМЛЕКЕТЛИК  
УНИВЕРСИТЕТИ**

**ФИЗИКА ФАКУЛЬТЕТИ**

**УЛЫЎМА ФИЗИКА КАФЕДРАСЫ**

Физика факультетиниң 4-курс студенти Санавар Айтымбетованың  
питкериў қәнигелик жумысы

**СЖЭ Eu менен легирленген кремнийдиң электрофизикалық  
қәсийетлерин ҳәм терең қәдилердиң энергетикалық  
спектирин үйрениў**

Илимий басшысы үлкен оқытыўшы Ж.Акимова  
(қолы)  
Кафедра баслығы профессор Б.Абдикамалов  
(қолы)

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

## Мазмуны

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Киристиў.....                                                                                                              | 3  |
| I Бап. Терең қәддили қосымталар менен легирленген кремнийде<br>дефект пайда болыў процесслерин үйрениў                     |    |
| §1.1. Киритилген элементлер қосымталары менен легирленген<br>кремнийде терең қәдилердин энергетикалық спектри.....         | 5  |
| §1.2. Өстириў ўақтында кремнийге киритилген сийрек жер<br>элементлери қосымталары.....                                     | 9  |
| §1.3. Диффузия усылында сийрек жер элементлери<br>киритилген кремнийдин қәсийетлери.....                                   | 11 |
| II Бап. Экспериментал методлар ҳәм кремнийди СЖЭ Eu менен<br>легирлеў технологиясы ҳәм қәсийетлери                         |    |
| §2.1. Кремнийде терең қәдилердин сыйымлылық<br>спектроскопиясы тийкарлары.....                                             | 14 |
| §2.2. Терең қәдилерде р-п-өтиў сыйымлылығы.....                                                                            | 15 |
| § 2.3. Киритилген СЖЭ қосымталары бар кремнийдин дефектлик<br>структурасына тәсири.....                                    | 20 |
| § 2.4. Кремнийде технологиялық қосымталар тәсири ҳәм Eu киритилген<br>кремнийде терең қәдилер пайда болыў нәтийжелери..... | 26 |
| Питкериў қәнигелик жумысы бойынша жуўмақлар.....                                                                           | 29 |
| Пайдаланылған әдебиятлар.....                                                                                              | 30 |

### Кирисиў

Хәзирги уақытта легирленген кремнийдеги дефект пайда болыў ҳаққындағы сораўлар материал таныў пәниниң ең баслы машқалаларының бири болып есапланады, себеби кремнийдиң қәсийетлерин түптен өзгертиў ушын ярым өткізгішлердиң қадаған етилген зонасында терең қәддилерди пайда етиўши қосымталар менен легирлеў қолланылады.

Бир қосымтаның киргизилиўи кремнийдиң фото сезгирлигин күшейтсе, басқа қосымталардың киргизилиўи термо қайта ислеўдиң бир қәлиплилигин хәм радиациялық беккемлигин асырыўи мүмкин, ал үшінши бир қосымталардың киргизилиўи, ток тасыўшылардың жасаў уақтын кемеитиўге хәм кремнийдиң басқа рекомбинациялық сыпатламаларының өзгериўине алып келеди. Көрсетилген қосымталардың атомларының кремний пәнжересинде болыўи керек емес хәрекетлерге алып келиўи мүмкин, мысалы, кремнийдиң характеристикасын төменлететуғын хәр қыйлы структуралық дефектлердиң пайда болыўына алып келеди. Буннан басқа, киритилген элементлер қосымтасы атомлары кремний пәнжересинде жоқары хәрекетшенликке ийе, ал бундай аўхал кремнийде арнаўлы киргизилген қосымталардың тексерилмеген қалдық қосымталардың атомлары менен хәр қыйлы комплекслердиң пайда болыўына алып келиўи мүмкин.

Компенсацияланған ярым өткізгішлер терең қәддиге ийе қосымталар ямаса радиациялық дефектлер менен компенсацияланған кремний бурынғыданда көбрек изертлеўшилердиң дыққатын тартты. Компенсацияланған ярым өткізгішлер, терең қәддиге ийе қосымталар ямаса радиациялық дефектлер менен компенсацияланған кремний бойынша изертлеўшилер майда донорлардың хәм терең акцептор қәддилердиң концентрациясына байланысly компенсацияның үш түри бар екенлигин анықлады.

Терең қәддилердиң сыйымлылық спектрскопиясының теориялық тийкарлары келтирилген. Терең қәддили қосымталар менен легирленген кремнийде дефект пайда болыў процесслерин үйрениў, киритилген элементлер қосымталары менен легирленген кремнийдеги терең орайлардың төмен температуралы қыздырыў кинетикасы хәм төмен температуралы қайта ислеўдиң киритилген элементлер қосымталары бар кремнийдиң дефектлик структурасына тәсири бойынша исленген жумыслар нәтийжелери бақланды.

Изертленилген терең қәддили қосымталар менен легирленген кремнийдиң дефект структурасы, киритилген элементлер қосымталары менен легирленген кремнийде терең қәддилердиң энергетикалық спектри, кремнийде технологиялық қосымталар менен терең қәддилер пайда етиўши қосымталардың өз-ара тәсири бақланды.

Усыған байланысly, кремнийдеги хәр қыйлы сийрек жер элементлери қосымталардың жағдайларын, өзін қалай тутыўын, хәмде бул қосымталардың кремнийдеги қәсийетлердиң қәлиплесиўиндеги ролин үйрениў белгили бир қызығыўшылықты келтирип шығарады.

Бул питкериў жумысы Еи ҳәм басқада сийрек жер элементлери менен легирленген кремнийдин электрофизикалық қасийетлерин ҳәм терең қәддилердин энергетикалық спектирин үйрениў ҳәм олардың радиациялық, термикалық ҳәм басқада дефектлер пайда болыў процесслерин үйрениўге арналған.

## **I Бап. Терең қәддили қосымталар менен легирленген кремнийде дефект пайда болыў процесслерин үйрениў**

### **§1.1. Киритилген элементлер қосымталары менен легирленген кремнийде терең қәддилердин энергетикалық спектри**

Кремнийдеги айрым элементлердин қосымта атомларының характеристикасын изертлеуіге кең көлемлі жұмыстар исленген. Бизге белгили, қосымта орайларының энергетикалық қаддилери характери атомлардың электронлық структурасы хәм олардың ярымөткизгиштин кристалл пәнжересинде орналасыуы менен белгиленеди. Ярым өткизгишлердеги көп муғдардағы қосымталарды изертлеуі, кремнийдин қадаған етилген зонасында терең қаддилерди пайда етиуіши қосымталар арасында кремнийдеги қосымталардың характерли қасийетлерин анықлайтуғын 3d-қабықтың ең әхимийетли айрықшалығы олардың тамамланбағанлығы болып есапланатуғын айырым металлар (никель, марганец, ванадий темир хәм т.б.) айрықша орын тутатуғынлығын көрсетти. Бул орайлардың парамагнитлиги кремний пәнжересинде киргизилген қосымталардың қасийетлерин изертлеуі ушын резонанслы усылларды қолланыуға мүмкиншилик береди. 3d- элементлердин кремнийде электрлик активлигин көрсетиуі уқыплылығы сыйымлылық усыллары жәрдемінде киритилген қосымталардың пайда еткен терең қаддилердин энергетикалық спектрин үйрениуі мүмкиншилигин береди. Кремнийдеги элементлердин қасийетлерин үйрениуі бойынша әдебиятлардың анализи, қәлеген бир қосымтаның киритилиуі кремнийде энергетикалық қаддилердин хәм дефект орайларының электрон жағдайларының үлкен өзгешеликлерине алып келетуғынлығын көрсетти. Бирақ, көрсеткишлер барлық уақыттада кремнийде терең қадди пайда етиуіши параметрлерге ийе сол ямаса басқа орайлардың структураларын бир текли байланыстырыу мүмкиншилигин беребермейди. Кремний пәнжересинде сол ямаса басқа 3d-элементтин атомларының белгили бир жағдайлары менен қандайда бир терең қаддини исенимли идентификациялау комплексли изертлеулер жәрдемінде ислеуі мүмкин.

Сийрек жер элиментлери қосымталары менен диффузиялық легирленген кремний қасийетлерин изертлеуіге тийкарланған хәм кремнийдеги европийдин, басқада айырым сийрек жер элементлеринин электрофизикалық қасийетлерин комплекс изертлеуі нәтийжелери келтирилген. Изертленип атырған үлгилер ушын Чохральский усылы менен өсирилген (кислородлы кремний) n-типли өткизгишликке ийе монокристалл кремний хәм тигелсиз зоналық еритиуі (кислородсыз кремний) хәм өсириуі процессинде еритиндиден сийрек жер элементлери атомлары менен легирленген монокристалл қолланылады.

Үлгилердин салыстырмалы қарсылығы  $20 \div 100$  Ом см ны курады, размерлери  $14 \times 7 \times 1$  см<sup>3</sup> тегисликтеги ориентациясы  $\langle 111 \rangle$ .

Изертленип атырылған үлгилердин ВТО сы СУОЛ типиндеги қарсылық типиндеги оптикалық таза кварц трубаларда 1250<sup>0</sup>С бир нешше саат дауаында

күйдирилген хәм билистиляторланған суўда жуўылған. Печьтеги температура  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  дәлликке ийе калибрленген платина–платинородийли термопара жәрдемінде контроль қылынады.

Терең қәддилердиң стационар емес сыйымлылық спектроскопиясы, оны DLTS методы депте айтылады, хәзирги уақытта да ярымөткізгішлерде терең қәддилерди изертлеў хәм бақлаў ушын қолланылады. Бул усыл диодқа терис кернеў берилгеннен кейин  $t_1$  хәм  $t_2$  ўақытларда диод сыйымлылығы айырмасының температураға байланыслылығын өлшеўге тийкарланған:

$$\Delta C = C(t_2) - C(t_1) = f(T) \quad (1)$$

### 1. Методтың теориялық тийкарлары.

Анықлық ушын электрон өткізгішли ярымөткізгіште кескин р-п-өтиў ямаса Шоттки тосқынлығын көремиз. Диод базасына киритилген ионланыў энергиясы кем, концентрациясы  $N_d$  болған майда донорлар бир тегис жайласқан хәмде ионланыў энергиясы анық хәм өзгермес бир ғана терең қәдди қадаған етилген зонаның жоқарғы ярымында жайласқан болсын деп есаплайық. Донорлар толық ионланған температуралар областын көремиз. Терис кернеў секирмели түрде жалғанғанда терең қәдди қайта зарядланыўы экспоненциал нызам бойлап өзгереді:

$$N(t) = N_m + N_t [1 + \exp(-\frac{t}{\theta})] \quad (2)$$

Диод сыйымлылығы:

$$C = W \sqrt{N(t)}, \text{ где } W = S \sqrt{\frac{q(\varepsilon \varepsilon_0)}{2(V_k + V)}} \quad (3)$$

ға тең болады, бунда

$$C_0 = W \sqrt{N_m} \quad \text{буннан} \quad C_m = \frac{N_t}{2N_m} \cdot C_0 \quad (4)$$

Жоқарыда келтирилген терис кернеу қойылғаннан кейін диод сыйымлылығы экспоненциал нызам бойлап өзгереді. Бунда  $t_1$  хәм  $t_2$  ўақытларда диод сыйымлылығы:

$$\Delta C = C(t_2) - C(t_1) = C_m [\exp(-\frac{t_1}{\theta}) - \exp(-\frac{t_2}{\theta})] \quad (5)$$

аңлатпа менен белгиленеди, ямаса

$$\frac{\Delta C_{21}}{C_o} = \frac{N_t}{2N_m} [\exp(-\frac{t_1}{\theta}) - \exp(-\frac{t_2}{\theta})] \quad (6)$$

$\frac{\Delta C_{21}}{C_o}$  қатнас (берилген  $t_1$  хәм  $t_2$  лер ушын) изотермикалық релаксация температурасына күшли байланысқан хәм қандай да бир температура  $T_{\max}$  да максимумға ийе.  $T_{\max}$  – мәниси қандайда бир  $T=T_{\max}$  ушын табамыз. Буның ушын (6) аңлатпаны температура аргументи бойынша дифференциаллап хәм туўындыны нолге теңеп бираз өзгертиўлерден кейин табамыз:

$$\theta_{\max} = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{t_2}{t_1}} \quad (7)$$

$\frac{\Delta C_{21}}{C_o}$  аңлатпаның  $T_1$  байланыслығы, оның  $T=T_{\max}$  деги максимумы -  $\frac{\Delta C_{21}}{C_o}$ , хәмде  $T_{\max}$  ның өзи  $\Delta C_{21}$  шаманың температура өзгериўи ўақтында тәжирийбеден табылады. Кейин (7) аңлатпалардан  $T_{\max}$  есапланады.  $T_{\max}$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  хәм  $\Delta C_{21}$  шамаларды билген ҳалда (6) аңлатпадан терең кәдди концентрациясы анықланады:

$$N_t = 2N_m \frac{\Delta C_{21\max}}{C_o} [\exp(-\frac{t_1}{\theta_{\max}}) - \exp(-\frac{t_2}{\theta_{\max}})]^{-1} \quad (8)$$

Усы  $t_1$  хәм  $t_2$  параметрлерди өзгертп  $\theta(T)$  байланыслылықты таўып, терең кәддилер орайы ионланыў энергиясын анықлаў мүмкин. Терең кәдди параметрлерин анықлаў методы илимий әдебиятларда турақлы кернеу методы деп айтылады, себеби бунда тосқынлыққа терис кернеу қойылғанда сыйымлылық релаксациясы болып өтеди хәм ол белгилеп қойылады. Бул методтың кемшиликлериниң биреўи,  $N_t \gg N_m$   $N_m$  шәрти орынлы болғанында қолланыўға

болмайды. Тәжірийбеде тез-тезден  $N_t \ll N_m$  шәрти өзгериўи мүмкин хәм турақлы кернеў методын қолланыў мүмкин емес. Бунда биринши мәрте авторлар тәрәпинен усыныс етилген турақлы сыйымлылық усылы қолланылады. Усы методта  $t_1$  хәм  $t_2$  ўақытларда кернеў релаксациясы өлшенеди.

Усы жумыста тийкарғы өлшеўлер турақлы сыйымлылық режиминде өткизилген. Бунда терең қәддилер концентрациясы усы аңлатпадан анықланады:

$$N_c = \frac{2\epsilon\epsilon_0}{ex^2} \cdot \frac{\Delta U}{\exp\left(\frac{\ln \frac{t_1}{t_2}}{\frac{t_2}{t_1} - 1}\right) - \exp\left(\frac{\ln \frac{t_1}{t_2}}{1 - \frac{t_1}{t_2}}\right)} \quad (9)$$

бунда  $\Delta U$  -DLTS сигналы,  $x$  – тосқынлық қалыңлығы болып ол:

$$x = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{C} - \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0[(E_c - E_t) - kT \ln \frac{N_c}{N_m}]}{e^2 N_m}} \quad (10)$$

аңлатпадан анықланады.

Сыйымлылық ( $\Delta C$ ) өлшеўлерин терең қәдди параметрлерин анықлаўда өлшеў қәтелиги.

Есаплаў:  $C = 100$  пкФ,  $C = 0,1$  пкФ болса,  $x = 0,01$  пкФ анықлықта болсын, яғный  $\Delta C = (0,1 \pm x)$ ; ондай болса:

$$N_T = 2N_m / \Delta C(\Delta C \pm x). \quad (11)$$

Бунда р-п-өтиўге қойылатуғын турақлы кернеў ( $V$ ) диң кемшиликсиз болыўы ушын қойылатуғын зәрүр талаптар: терең қәддилер қайта зарядланыўындағы изертлеўлерди жетерли үлкен терис кернеўлерде өткерийў усыныс етиледі. Кесими р-п-өтиў ушын усы қатнас орынлы болады:

$$\Delta C / C = 0,5\Delta V / V \quad (12)$$

(бунда  $C$  сыйымлылықтан  $V = Vz$  хәм киши өзгермели кернеўдеги мәниси,  $\Delta C$  киши  $\Delta V$  кернеўге сәйкес иркиўши сыйымлылығының өзгериўи). Сыйымлылықтың  $10^{-3}$  мәнисте өзгериўин өлшеў ушын оның турақлылық ақыбетинде мәнисинен жылжыўы  $10^{-4}$  тен аспаўы керек, яғный  $\Delta V/V \frac{\Delta V}{V}$  қатнас  $10^{-4}$  тен аспаўы керек.

## **§1.2. Өстириў ўақтында кремнийге киритилген сийрек жер элементлери қосымталары**

Белгили қәсийетке ийе кремний монокристалларын алыў әдетте оны өсириў процессинде бир қатар қосымталар киргизиў арқалы әмелге асырылыўы бизге белгили. Тийкарынан бул дәўирлик системаның кремний қадаған етилген зонасында ионланыў энергиясы кишкене тийисли түрде акцептор яки донор қәддили қосымта бериўши элементлери болып есапланады.

Бирақ, кремнийде қандайда анық (электрофизикалық, оптикалық хәм басқа) қәсийетлер пайда етиў ушын барған сайын сийрек жер элементлерин киритиў кеңнен қолланылмақта. Бундай материалдан исленген ярымөткизгишли әсбаплар ыссылыққа хәм нурланыўға шыдамлылығын асырыў мүмкиншилигин береді.

Дәслеп химиялық актив тәсиршең болған хәтте киширек концентрацияларда комплекслер пайда етиўге қолай болған сийрек жер элементлери өсириў ўақтында кремнийге киритилгенде электрлик активлик көрсетпеслигин айтып өтиў керек. Олар дефектлер хәм басқа қосымталар менен электр актив түрде тәсирлеседи. Сийрек жер элементлери киритилген хәм бақланатуғын (СЖЭ болмаған) кремний үлгилеринде нейтрон-активлестирилген анализ усылында углерод концентрациясын бөлистириў бақланатуғын үлгилерде углеродтың улыўма концентрациясы СЖЭ киритилген үлгилерге қарағанда бир қанша көп екенлигин көрсетти.

Сийрек жер элементлери қосымталарының кислород пенен тәсир етисиўи еритпеден өсириў процессинде ақ болып өтеди. Кремний еритпесине сийрек жер элементлери қосылғанда кислород концентрациясы үлгилерде кемейеди. Бундай жағдайда ишки геттерлеў (кремнийден усы элементти сыртқа шығарыў) пайда болып, бул оны кислородтан тазалаўына алып келиўи мүмкин.

Кремнийде сийрек жер элементлеринин дэслеп электрлик актив болган қосымталар менен күшли тэсир етисиўи ҳаққында түрли температураларда Холл эффекти арқалы ток тасыўшылар концентрациясын СЖЭ киргизиў муғдарына байланыслылығын көрсетеди.

Электр өткизгишлик, ЭПР ҳәм ток тасыўшылар жасаў ўақтының бөлистирилиўин европий киритилген кремний үлгилеринде өлшеў нәтийжелери жетерли дәрежеде үлкен өлшемли европий кластерлеринин пайда болыўы анықланған (европий концентрациясы  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  ден үлкен болғанда).

Сийрек жер элементлери қосымталары кремний кристалларында концентрациясының бир қанша кең интервалларында электр активлик көрсетпеген ҳалда болыўы, кислород ҳәм углерод пенен өз-ара тэсир етисиў ақыбетинде электрлик актив болмаған оксид ҳәм карбидлер пайда етиўи белгиленген. Бул кремний монокристалларын жоқары температурада қыздырып қайта ислеў бериў процессинде кислород преципитациясы (ажыралып шығыўы) на тосқынлық қылады. Кислородқа тийисли бул процесс болмағанда ярымөткизгиштиң қадаған етилген зонасында терең қәддили дефектлер концентрациясы бир қанша кемейеди.

Сийрек жер элементлер қосымталарының қыздырып ислеў берилген кремнийде кислород пенен өз-ара тэсир етисиўи үйренилген, онда СЖЭ қосымталарының термодонорлар жыйналыў кинетикасына тэсири көрип шығылған. Сийрек жер элементлери қосымталары муғдары артыўы менен кислородтың улыўма муғдары  $N_0^{\text{опт}}$  ҳәм оптикалық актив кислород муғдары  $N_1^{\text{опт}}$  сезилерли кемейеди. Үлги қыздырылыў процессинде СЖЭ атомлары кислород пенен өз-ара тэсир етисип, электрлик ҳәм оптикалық актив болмаған түрдеги комплекслер пайда етиўи мүмкин.

Сийрек жер элементлери (Eu, Gd, Ho) қосымталарының кремнийде химиялық активлик көрсетиўин СЖЭ болған кремнийди қыздырыў ўақтында ( $1000^\circ\text{C}$ , 30 мин) термодфектлер киргизилиўин үйрениў нәтийжелеринде анықланған. Бунда СЖЭ киргизилген үлгилерде қыздырыў дефектлери тексерилиўши үлгилерине карағанда 3-4 мәрте кемирек пайда болыў нәтийжелери алынған.

Кремний монокристалында сийрек жер қосымталарын пайда етиў қыйыншылық туўдырады. Сийрек жер элементлер қосымталар пуўланыўын кемейтириў ушын әдетте нейтрал газ орталығында өсириў усылы қолланылады. Бундай орталықта өлшенген сийрек жер элементлер қосымталарының пуўланыў эффектив коэффициентлери, авторлардың айтыўы бойынша  $(5-8) \cdot 10^{-4} \text{ см} \cdot \text{с}$  ты

қурайды. Киши бөлистириу коэффициентли қосымталар бөлистирилиуин өсирилген кристаллар узынлығы бойынша изертлеу сийрек жер элементлери қосымталары бөлистириу коэффициентлериниң  $k$  алынған мәнислери ( $10^{-5} - 10^{-6}$ ) сийрек жер элементлер қосымта ушын бөлеклерди баҳалау мүмкиншилигин береді. Бөлистириу коэффициентлери мәнислери тәжірийбеде келтирилген шама

$$k = \frac{C}{C_0}$$

катнастан анықланған, бунда  $C_0$  – еритпедегі қосымта дәслепки концентрациясы,  $C$  – кристалланған материал үлеси  $g \ll 1$  болғанда кристалда қосымта концентрациясы.

Алынған нәтижелер бойынша кристалл узынлығы бойлап әдеттегіше болмаған бөлистирилиуи кластерлердиң пайда болыуы, кристалланыу фронты этирапында болып өтиуине байланыслы деген болжау билдирилген. Сийрек жер элемент қосымталы кремний монокристаллар қәсийетлерин үйрениу бойынша кейингі изертлеулер бул болжаудың туурылығын тастыйықлады.

### **§1.3. Диффузия усылында сийрек жер элементлери киритилген кремнийдиң қәсийетлери**

Сийрек жер элементлер қосымталарын кремнийге киритиу ушын еритпеден өсириу процессинде киритиу ғана емес, диффузия арқалы киргзиуде қолланылады, бунда қосымталар кремнийге жоқары температурада диффузия процессинде дәслеп өстирилген кристаллға киритиледи. Сийрек жер элементлери қосымталары кремнийдегі диффузиялық параметрлери хаққында мағлыұматлар бир-бирине қарама – қарсылықларға ийе, СЖЭ диффузия механизм хаққында мағлыұматлар жүдә аз. Мысалы: тербий хәм гольмийдиң кремнийдегі диффузиясы нейтрон – активлестириу анализи, автордиография хәм р–п өтиу усыллары арқалы комплекс түрде изертленилген. Алынған диффузия профиллериниң нейтрон-активлестириу усылы қолланылып, анализи бул тәжірийбе графиклерде бир қанша ноқатларының бар екенлигин көрсетти. Тербий яки гольмий қосымталы кремний үлгилери автордиограммаларында  $T_b$  хәм  $N_0$  атомларының жыйналып қалған областлары көрилди. Авторлар пикиринше, кремнийде гольмий хәм тербий диффузиясы химиялық реакция қатнасыуында болып өтеді екен. Табылған СЖЭ қосымта топланбалары – бул

жаңа фаза бирліктери болып есапланады. Алынған нәтижелер тийкарында авторлар сийрек жер элементлер кремнийде диффузия механизмин усыныс еткен, оған қарата тербий хәм гольмий диффузиясы эсте химиялық реакция қатнасыуында болып өтеди.

Жумыста европий хәм басқада сийрек жер элементлериниң кремнийдеги диффузиясы үйренілген. Өткизилген тәжірийбелер усы көрсетилген қосымталар диффузиясы нәтижесинде  $n$  – типли өткизгишликке ийе кремний бетинде анық түрде  $p$  – типли өткизгишликке ийе қатламлар пайда болады. Кремнийде базы бир сийрек жер элементлериниң диффузиялық параметрлери жумыс нәтижелери бойынша келтирилген.

Диффузия коэффициенти  $1200^{\circ}\text{C}$  температурада  $1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$  муғдарға тең шыққан.

Сийрек жер элементлер атомларының кремний пәнжересинде жайласуы итималлығы есапланған, және тәжірийбе усылында базы бир сийрек жер элементлер диффузиясы үйренілген. Барлық жағдайларда диффузия нәтижесинде үлгилер сыртында  $p$  – типли өткизгишликке ийе қатламлар алынған.

Қыздырыу (күйдириу) температурасы артқанда активлесиу коэффициентиниң артыуы кислород атомларының кластерлердеги муғдары ( $0,89\text{эВ}$ ) деп үлкенлиги менен түсиндириледі. Усы модель улыуа жағдайда донор орайлары активлесиу коэффициентиниң кислород ионлары имплантациясы дозасына байланыслылығын хәм кислород ионлар имплантациясы хәм күйдириу температурасының донор орайлардың концентрациялық кесимине тәсирин түсиндириуіге имканият береді.

Сийрек жер элементлер кремнийде диффузия коэффициентлериниң температураға байланыслылығы төмендеги формулада көрсетилген:

$$D(T) = D_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) \quad (1-1)$$

Қосымта сырт концентрациясы  $10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$  шамалар интервалында өзгереді. Европий атомларының кремнийде диффузиясы радиоактив изотоплар методы менен үйренілген. Дәслепки үлгилер сыпатында  $n$  – типли өткизгишликке ийе хәм салыстырма қарсылығы  $\rho = 15 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  болған кремний қолланылды. Диффузияланыушы дерек сыпатында радиоактив изотоп  $^{152}\text{Eu}$  болған европий хлорид қатламы хызмет қылды. Нәтижелер температура артыуы

менен кремнийде европий диффузия коэффициенті  $2 \cdot 10^{-12}$  ден  $10^{-11}$  см<sup>2</sup>/с ға шекем асыуын көрсетті. Бунда диффузия коэффициентінің температураға байланыслылығы 1100-1250<sup>0</sup>С аралықта:

$$D(\text{Eu}) = 2 \cdot 10^{-2} \exp\left(-\frac{2,8}{kT}\right) \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$$

қатнас пенен бериледи.

Европийдің 1100-1250<sup>0</sup>С температура интервалында кремнийдеги диффузия шуқырлығы –усы  $2\sqrt{Dt}$  аңлатпаны қолланған хәм бир неше микрометрди кураған. Бунда европий сырт концентрациясы  $10^{18}$  см<sup>-3</sup> дәрежеде болған. Авторлар алған нәтийжелер тийкарында европий қосымтасы кремнийде иттербий сыяқлы кристалл пәнжере түйинлери бойлап диффузия қылыуы хақында шешим қылған.

Қосымта бөлистирилиу кесими бөлимлерге ажыратыу яғный жуқа қатламлар алып тасланып қалдық  $\beta$  – активлик киши фонлы  $\beta$  – санаушысы СБТ–11 болған УМФ–1500М (А.Ф.Июффе номли РФА ФТИ, Санкт-Петербург) курылмада анықланған.

Алып тасланатуғын қатлам қалыңлығы әдетте (0,05-0,5 мкм) үлгиниң хәр бир қатламын алғанда микрометр арқалы өлшенеди. Қатламларды алып таслау процессиниң түрли басқышларында алынған авторадogramмалардан тербий қосымтасы кремнийдеги иттербий хәм европий сыяқлы үлги кесими бойлап тегис бөлистирилгенлиги келип шықты. Буннан басқа тербий қосымтасының киритпелери жоқлығы да белгиленген. Алынған нәтийжелер тербийдің кремнийдеги диффузия коэффициенті  $D_{\text{Tb}}$  температура артыуы менен  $4 \cdot 10^{-14}$  дан  $1 \cdot 10^{-12}$  см<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup> ге шекем артыуын көрсетті. Авторлар пикиринше иттербий хәм европий сыяқлы тербий қосымтасы диффузиясы да кремнийде кристалл пәнжере түйинлери бойлап өтеди.

## **II Бап. Экспериментал методлар хәм кремнийди СЖЭ менен легирлеу технологиясы хәм қәсийетлери**

### **§2.1. Кремнийде терең қәддилердиң сыйымлылық спектроскопиясы тийкарлары**

Кейинги жылларда терең кәддилердің сыйымлылық спектроскопиясы түрлі усыллары ярымөткізгіште дефектлер пайда болыуы және күйдириу-кремний материалының пәнаресінде барқулла бар болған, арнаулы киритилетуғын қосымталар, қыздырыуда және нурландырыуда пайда болыуы процесслери дефектлерин үйрениуде барған сайын кеңірек қолланылмақта. Усы методлар жоқары сезгирлікке ийе, әәмде ярым өткізгіш қадаған етилген зонасына үзлікли кәддилер киритетуғын электрлік актив дефектлерди изертлеуге имканиятлар береді. Усы методлар терең кәддилер концентрациясы және параметрлерин таяр әсбапларда және оларды таярлау технологиясының түрлі басқышларында өлшеу имканиятын береді. Сыйымлылық спектроскопиясының әдеттеги методлары сыйымлылық изотермикалық релаксациясы, қыздырыуда стимулластырылған сыйымлылық, фотосыйымлылық және басқаларда методлар кең қолланылады. Өткізгішлігі  $n$  – типли кремний төменде пайда етилген  $p$ - $n$ - өтиу яки Шоттки тосқынлығында релаксация процесслерин көрип шығайық. Бул  $p$ - $n$ - өтиу яки Шоттки тосқынлығына контакт потенциаллар айырмасы  $V_k$  дан бир қанша теріс болған электр майдан күшлениуін  $V$  қояйық. Бунда КЗҚ (көлемли заряд қатламының) көп бөлімлеринде хәрәкетшен ток тасыушылар концентрациясы қосымта ионласқан концентрациясына қарағанда кем болады.

$W$ –КЗҚ ында хәрәкетшен ток тасыушылар концентрациясын есапқа алмағанда Пуассон теңлемесинен анықланады:

$$\frac{d^2\varphi}{dW^2} = \frac{eN_A(W)}{\varepsilon\varepsilon_0} \quad (2-1)$$

егер  $N_d(W) = \text{const}$  болса, онда

$$W = 2\sqrt{\frac{(V_k + V)\varepsilon\varepsilon_0}{eN_d}} \quad (2-2)$$

Бунда:  $\varepsilon$ - ярымөткізгіш салыстырмалы диэлектрик синдириушилиги,

$\varepsilon_0$  – вакуум диэлектрик турақлысы,

$e$  – электр заряды,

$N_d$  - диод базасындағы өлшеу температурасында толық ионласқан донорлар концентрациясы,

$V_k$  - контакт потенциаллар айырмасы.  $S$  бетке ийе болған p+-n-өтиў сыйымлығы бул жағдайда:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{W} = S \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 N_d e}{2(V_k + V)}} \quad (2-3)$$

ямаса

$$1/C^2 = \frac{2(V_k + V)}{e \varepsilon \varepsilon_0 S^2 N_d} \quad (2-4)$$

(2-4) аңлатпадан  $1/C^2$  тың  $V$  ға байланысы Шоттки тосқынлығы ямаса кескин p+-n-өтиў ушын туўры сызықты береді

Қосымта концентрациясы диод базасында туўры сызық қыялығы менен анықланады, сызықтың абсцисса көшери менен кесилисиў ноқаты контакт потенциал айырмасын береді.

## §2.2. Терең қәддилерде p-n-өтиў сыйымлылығы.

Авторлардың жұмыстарында көрсетілгендей,  $V=0$  болғанда қәдди толған стационар жағдайы  $t = 0$  ўақытта p – n – өтиўде кернеўди нолден терис кернеўге кескин өзгертилгенде электронлар қәддинің  $\square W_1$  қатламынан өткізгішлік зонасына  $\theta$  ўақыт тұрақлысы менен өтеді ( $\theta = e_n^{-1}$ , бунда  $e_n$  – электрон ушын эмиссия тезлиги) хәм кейин майдан тәсиринде тезде электр нейтраллық областына (ЭНО) кетеді. Бунда n – областта жайласқан  $\Delta W_1$  қатламда көлемли заряд тығызлығы артады (терең қәдди донор яки акцепторлығына қарамастан). Ўақыт тұрақлы болғанда аңлатпа төмендегише жазылыўы мүмкин:

$$\theta = (\sigma_n V_T N_c)^{-1} \exp\left(\frac{E_c - E_t}{kT}\right) = (\sigma_n b_n T^2)^{-1} \exp\left(\frac{E_c - E_t}{kT}\right) \quad (2-5)$$

Бунда  $b_n$  – ярымөткізгіш параметри,

Ge ушын  $b_n = 3,6 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ К}^{-2}$ ,

Si ушын  $b_n = 6,6 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ К}^{-2}$ ;

$\sigma_n$  - электронның кесе кесім тутыуы,

$V_T^{V_2}$  – электронның ыссылық тезлиги,

$N_c$  – өткізгішлік зонасындағы эффектив халлар тығызлығы,

$E_c$   $E_c$ - өткізгішлік зонасының ең төмен энергиясы,

$k$  – Больцман турақлысы,

$T$  – абсолют температура,

$t$  – ўақыт.

(2-5) теңлемеден температура  $T$  артыуы менен қадди толыуы релаксация ўақты  $\theta$  кескин кемейиўи келип шығады. (2-5) теңлемени логарифмлеп төмендегини аламыз:

$$\ln(\theta T^2) = \frac{-\ln(\sigma_n b_n) + E_c - E_t}{kT} \quad (2-6)$$

Егер электронларды иркий кескин хәм ионланыў энергиясының температураға байланыслылығын есапқа алмасақ, онда (2-6) усы координаталарда:

$$\ln(\theta T^2) \approx \frac{1}{kT} \quad (2-7)$$

сызықты береді.

Бул туўры сызық қыялық мүйешиниң тангенсін терең қадди ионланыў энергиясына тең, туўры сызықтың өзи ординаталар көшеринде  $e_n(\sigma_n b_n)$  тең кесинди кеседи, буннан усы қадди ушын электронларды иркий кесимин анықлаў мүмкин.

DLTS спектрин өлшеў турақлы кернеў хәм турақлы сыйымлылық режимлеринде бир яки бир неше мәрте өлшеў жолы менен эмиссия тезликлериниң хәр қыйлы айналарында белгилеп барылған қатнастарда  $t_2$  хәм  $t_1$  ( $t_2/t_1=3$ ,  $t_1=1 \div 500$  мс) өткерилип, кери орын өзгертиў сброс импульсиниң тезлиги  $t_f=1\text{мкс}-100\text{мс}$  интервалларында болды. Бир мәртели сканерлеў жолы менен өлшенген спектрлердиң қайта ислениўи экспериментал DLTS иймеклик пенен теоретикалық иймекликти орны-орнына қойыў менен өткерилди, оннан кейин Аррениус  $\ln(\theta) \sim f(T)$  графиги дүзилди. Бул байланыстың қыялығынан терең қаддиниң ионизациялаў энергиясын анықланды.

Вольт-фарадалық характеристикадан  $1/C^2 = f(V_{обр})$  ғәрезлилиги анықланды. Бул байланыстар барлық изертленген диодларда туұры сызықлы болды, бул нәрсе ярым өткізгіш көлемінде қосымталардың теңдей бөлістиргенлигин көрсетеди.

Изертленілген үлгилердің DLTS спектрлері анализи хәм Вольт-фарадалық характеристикасы, көрилип атырылған ГУ концентрациялары, атап айтканда II, III, IV қәддилердің диффузия температурасынан хәм диффузиядан кейинги үлгилердің сууытылуы тезлигинен күшли ғәрезли болады.

Диффузия температурасы қанша жоқары болса, кремний көлеміндеги сийрек жер элементи атомлары концентрациясы сонша көп болады. Керисинше контроль үлгилерде де көринетуғын I-қәдди концентрациясы диффузия температурасының жоқарылауы менен төменлейди.

Кремнийдің гадолиний менен диффузиялық легирлениуине уқсас, кремнийди сондай уақыт дауамында (42 саат) хәм сондай температурада ( $1200^{\circ}\text{C}$ ) самарий менен диффузиялық легирлеу өткерилди. Өлшеулер хәр қайсысында төрт үлгіден болған еки серияда өткерилди. Үлгилердің сериялары өткізгішлик типлері менен ажыралып турады. Салыстырмалы қарсылықты төрт зондлы усыл менен өлшеу нәтижелеринен, n-типли барлық үлгилерде кремнийди самарий менен легирлегеннен кейин өткізгішлик типинің өзгериуі хәм салыстырмалы қарсылық мәнісинің бирден күшейип кетиуі бақланады. Бирақ кремнийди самарий менен легирлегеннен кейин салыстырмалы қарсылық мәніси гадолиний менен легирленген үлгилердің салыстырмалы қарсылығы мәнісине қарағанда анағұрлым төмен.

p-типли үлгилерде салыстырмалы қарсылық мәніси аз муғдарда төменлейди, бирақ бунда өткізгішлик типі өзгермей қалады. Термикалық қайта исленген контроль образецлерди өлшеу нәтижелеринен салыстырмалы қарсылық мәніслері дерлік өзгериссиз қалады.

Eu менен диффузиялық легирленген үлгилер ушын, контроль үлгилер (PЗЭ қосымтасыыз) ушын салыстырмалы қарсылықлар тереңдиклері бойынша өлшеу өткерилди. Бул нәтижелердің анализинен, Сийрек жер элементлері атомлары менен легирленген кремний үлгилерінде хәм контроль үлгилерде терең қәддилер концентрациясы DLTS пиклеринің максимумы менен, вольт-фарадей характеристикасы жәрдемінде анықланады. n-Si<Eu> образецлерінде бөлістириу профили еки участкадан турады: дәслеп  $\rho$  ның  $\sim 80$  мкм тереңликке шекемги бирден өсиуі бақланады, кейинирек  $\rho$  мәніси турақласады хәм  $\rho$  ның

тереңлик пенен өзгериуі көрінбейді. Ал контроль үлгилер ушын, жоқарыда айтқанымыздай  $\rho$  мәніслерінің тереңлиги сезилерлі дәрежеде өзгермейді.

Усы сериядағы үлгилерде ИК-жutyылыуы спектрлерін өлшеу өткериледи. Дәслепки үлги европий менен легирленген үлги ушын ИК-жutyылыудың әдеттеги спектрлери көрсетилген. Алынған нәтижелердің анализинен кремнийге годолинийдикиңдей европий қосымталары диффузиялық киритиу оптикалық актив түйинлер аралық кислород ушын характерли болған жutyылыу полосасы (жолағы) интенсивлигинің төменлеуіне алып келеди.

Eu қосымталы кремний қасийетлерін изертлеу нәтижелери бойынша кремнийге диффузиялық жол менен киритилген европий атомларының қатнасуы, өсириу уақтында қандайда болмасын терең қаддинің белгили концентрацияда пайда болуына алып келмейди.

Диффузионлы-легирленген  $n\text{-Si}\langle\text{Eu}\rangle$  үлгилердің қатламлы профилленилиуінен үлгилердің бетиндеде көлеминде де европий атомлары менен байланысқан электроактив орайлар жоқ екенлиги анықланды.

Нейтронлы-активацион анализ (НАА) жәрдеміндеги қосымша экспериментлер диффузиялы, легирленген үлгилердеги кремний көлемінде европий атомларының жоқ екенлигин көрсетти, буның менен кремнийде европий атомларының диффузия коэффицентинің төменлигин көрсетеди, Бул уақытта еритиндиден өсириу уақтында легирленген үлгилерде европий жүдә жоқары концентрацияларда ( $10^{15}$  тен  $10^{18}$   $\text{см}^{-3}$  шекемги) қатнасуы анықланды.

Термикалық тәсир етиу уақтында европий атомларының активация мүмкиншиликлерін үйрениу мақсетінде хәм оларда термонуксанлардың пайда болуы процессине тәсирін үйрениу ушын  $n\text{-Si}\langle\text{Eu}\rangle$  үлгилерін 0,5-50 саат дауамында  $900\text{-}1200^\circ\text{C}$  интервалда жоқары температуралы қайта ислеулер өткерилди.

Өсириу уақтында Eu менен легирленген хәм 2 саат дауамында  $1000^\circ\text{C}$  тан  $1200^\circ\text{C}$  да (жоқапры температуралы қайта ислеу) ВТО лы өткен  $n\text{-Si}$  үлгилеринің DLTS спектри келтирилген. Бул спектрдің анализинен, ВТО өткизилген  $n\text{-Si}\langle\text{Eu}\rangle$  үлгилеринің DLTS спектрлериде  $T_{\text{max}}=110\text{K}$  (пик А)  $250\text{ K}$  (пик В) хәм  $256$  (пик С) деги максимумлары бар үш пик бақланады.

Есаплаулардан бул пиклерге  $E_C-0,23$  эВ,  $E_C-0,40$  эВ хәм  $E_C-0,46$  эВ ионизация энергиялары терең қадди (ГУ) туура келеди. Бул қаддилерге  $\sigma n$  электронларын иркиу кесимлери  $10^{-17}$   $\text{см}^2$ ,  $2 \cdot 10^{-16}$   $\text{см}^2$ ,  $5 \cdot 10^{-15}$   $\text{см}^2$  курайды. ВТО дан кейин  $1200^\circ\text{C}$

кәддилердің концентрациялары  $N_{\text{гy1}}=1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{\text{гy2}}=8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{\text{гy3}}=3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  лерге тең.

ВТО өткізілген контроль үлгилерде Ес-0,23 эВ кәдди бақланады. n-Si<Eu> деги Ес-0,40эВ хәм Ес-0,46эВ кәддилериниң концентрациясы европий муғдарынан, қайта ислеў температурасынан хәм үлгилердің ВТО дан кейинги суўытыў тезлигине байланысly болады. Керисинше, контроль үлгилердеде тексерилетуғын Ес-0,23эВ кәдди концентрациясы европий концентрациясына байланысly емес хәм ВТО температурасы көтерилген сайын ол күшейип барады. n-Si<Eu> үлгилерде ГУ концентрациясы контроль үлгидегиге қарағанда бир қанша кемлеў.

DLTS, ФЕ хәм ИК жутылыў спектрлерин өлшеў нәтижелериниң анализи соны көрсетеди, термикалық қайта ислеўдеги n-Si<Eu> де ГУ ниң пайда болыў эффективлиги дәслепки европийли кремнийдің кислород муғдарына байланысly болады. Дәслепки n-Si<Eu> де  $N_0^{\text{опт}}$  қанша көп болса, ВТО менен стимулланған ГУ концентрациясы сонша кем болады.

Солай етип, өсириў процессинде кремнийге киритилген европий атомлары электрлик активлик көрсетпейди хәм сезилерли концентрацияда кремнийдің қадаған етилген зонасында терең кәддилерди пайда етпейди.

Жоқары температуралы қайта ислеў европий атомларының активлигине алып келеди хәм бунда кремнийдің қадаған етилген зонасынын жоқарғы ярымында европий атомлары менен байланысқан еки ГУ пайда болады. Оннан басқа Si көлеминде Eu атомларының қатнасыўы термикалық нуқсанлардың пайда болыў эффективлигин төменлетеди.

Радиациялық дефект пайда етиў процессиниң эффективлигин төменлетиў гадолиний хәм европий қосымталары бар кремний үлгилеринде де бақланды. Бул факт шамалаўымызша, үлгилердеги сийрек жер элементлери қосымта преципитатлары тек ғана ваканциялар емес, технологиялық қосымталар (мысалы кислород) атомлары ушын ишки геттерлер ролин атқарады. Бул эффектлерди шамалаўымызша сийрек жер элементлери атомларының структуралық дефектлер менен хәм нурланыў арқалы киритилген дефектлер менен өз-ара тәсир етисиў айрықшалығы менен байланыстырыў орынлы. Si<Sm> үлгилеринен өзгеше, Si<Gd> хәм Si<Eu> үлгилеринде А-орай (ваканция кислород комплекслери) хәм Е-орай (ваканция фосфор комплекслери) концентрациялары- тийкарғы радиациялық дефектлер бир қанша кемлеў.

### § 2.3. Киритилген СЖЭ қосымталары бар кремнийдің дефектлік структурасына тәсири

Жоқары температуралы қайта іслеулерде кремнийде пайда болатуғын термикалық дефектлерге тийисли болған хәр қыйлы энергетикалық қәддилерди салыстырыу усы дефектлердің параметрлеринин тексерилмейтуғын хәм арнаулы киритилген қосымталардың қәддилери менен идентификациясының көрсеткениндей, оларды кремнийдеги темир қәддилеринен айырыу қыйын. Бундай жағдайда темир атомлары менен байланысқан термикалық дефектлер бөлме температурасында турақлы емес: изертлеушилер тарепинен түйинлер аралық темир атомлары менен байланыстырыушы  $E_v + 0,4$  эВ терең қәдди FeV комплекслери менен байланыстырылған  $E_c - 0,51$  эВ донорлық қәддиге трансформацияланыуы анықланған. Қәддилердің бундай трансформациясы жоқары температуралы термо қайта іслеулерден кейинги жүдә әсте суўытылыуда да болып өтеди.

Қосымталар диффузиясы үлгилер бетинен бетти арнаулы тазаланған ямаса термо қайта іслеудің жүдә аз ўақыт даўам етиўи нәтийжесинде шығарып тасланады, сонлықтан табылған термоорайлар ярымөткізгіш көлеминде болып өтетуғын процесслер менен байланыстырылған. Шынықтырылған деп аталыушы бул орайлар майда хәм терең қәддилердің донорлық хәм акцепторлық характердеги спектрин пайда етеди. Бақланып атырған қәддилердің параметрлери жоқары температуралы қайта іслеуден кейинги шынықтырыу тезлиги менен, бақлаўға алынбаған қосымталардың мазмуны менен хәм дәслепки материалдың структурасының жаңаланыу дәрежеси менен анықланады.

Бул жумыста n-Si деги термодефектлердің пайда болыуы хәм төмендеги параметрлерге ийе үш термоорай табылды:  $E_c - (0,17 \div 0,21)$  эВ, :  $E_c - (0,28 \div 0,31)$  эВ хәм :  $E_c - (0,42 \div 0,53)$  эВ оларға сәйкес электронлардың орналасыу кесимлерине ийе

$$\sigma_n \sim (7 \cdot 10^{-15} \div 2 \cdot 10^{-17}) \text{ см}^2, (10^{-16} \div 10^{-17}) \text{ см}^2 \quad \text{хәм} \quad (5 \cdot 10^{-14} \div 10^{-17}) \text{ см}^2.$$

Бул жерде қәддинің энергетикалық халы термо қайта іслеуден кейинги суўытыу тезлигине көбирек байланысly болады. Әстелик пенен суўытыу қәддинің зона шетине жылысыуына алып келеди, бундай жағдайда оның ионизация энергиясы  $E_c - 0,42$  эВге тең болып қалады. Жоқары температуралы қайта іслеу процессинде хәм

оннан кейинги суўытыўда қадаған етилген зонаның ортасына жақын жерде бир қанша терең қәддилер пайда болады хәм суўытыў тезлигине байланыслы бир ямаса оннан басқа қәдди үстемирек болады. Бул қәддилердиң параметрлери жақын болғанлықтан тәжирийбе ретинде олардан тек ғана биреўин бақлаўға болады. Термошынықтырыўшы орайлардың тәбиятын анықлаўда,  $E_c-0,32$  эВ қәддини олар кремнийдеги вакансиялық комплекслер менен байланыстырады.  $E_v+0,41$  эВ шынықтырыў дефекти тәбиятын кремнийде термикалық күйдириўде қатнасуғын хәм олардың шынығыў процессинде өз-ара тәсир етисиўинде қатнасуғын ноқатлық дефектлер менен байланыстырады. Темир менен арнаўлы легирленген кремний үлгилеринде ионизация энергиясы мәнислерине жақын болған еки терең қәдди бақланады, бирақ темир менен арнаўлы легирленген үлгилерде де хәм алдын-ала арнаўлы тазаланған термоқайта исленген үлгилерде де бақланатуғын геўеклердиң орналасыў кесими  $\sigma_p \sim 10^{-16} \text{ см}^2$  изертлеўшилердиң пикиринше темир атомлары менен байланыспаған, шынықтырыў орайы болып есапланады.

Термикалық дефектлердиң жақын спектрин кремний пластинкаларында термодфектлердиң кеңисликтеги бөлистирилиўин хәм пайда болыў шәртлерин үйрениў ўақтында табылған:  $E_c-0,28$  эВ,  $E_c-0,34$  эВ,  $E_c-0,54$  эВ,  $E_v+0,33$  эВ хәм  $E_v+0,43$  эВ. Термикалық дефектлердиң пайда болыў себеби, шлифовка ямаса акцепторлық қосымтаның жоқары концентрацияда қатнасыўы менен белгиленген пластинканың бетлик қатламларының бузылыўы болып есапланады. Термикалық дефектлердиң бақланып атырған қәддилери донорлық болып есапланады хәм n-Si де салыстырмалы қарсылықтың төменлеп кетиўине,  $\rho$  ның көбейиўине хәм p-Si де өткизгишлик белгисиниң инверсиясына себепши болады. Бақланып атырған термодфект кремнийде температура  $1000^0$  С тан жоқары болса пайда болады, ал бул температурадан төмен болса олардың пайда болыў эффективлиги жүдә төмен болады. Дефектлердиң пластина қалыңлығы бойлап бөлистирилиўи хәр қыйлы технологиялық жағдайларға байланыслы, ең биринши беттеги бузылыўлардың дүзилиў усылларына байланыслы болады.

Кремнийдеги термикалық дефектлердиң лантанойдлардың қоспа атомларына тәсириниң нәтийжелерин үйрениўде изертлеўшилер үлгилер ушын Чохральский усылы менен өсирилген (кислородлы кремний) n-типли өткизгишликке ийе монокристалл кремний хәм тигелсиз зоналық еритиў (кислородсыз кремний) хәм өсириў процессинде еритиндиден лантанойд атомлары менен легирленген монокристалл қолланылады.

Кислород хәм углерод мұғдарларын тексеріу мақсетінде ИК-жұтылуы спектрін өлшеу үшін үлгілер механикалық жол менен полировкаланады.

Бұл өлшеулер барлық n-типтегі кремний үлгілерді гадолиний менен легирлегеннен кейін өткізгішлік типінің өзгеріуі хәм салыстырмалы қарсылығының күшейіуі бақланатуғынлығын көрсетті. Усы типтегі іслеу берілгенде p-типі үлгілерде салыстырмалы қарсылық мәніслері киші шамаға төменлейді, ал өткізгішлік типі өзгеріссіз қалады. Өлшеулер нәтижелері таза n- хәм p-типі кремнийде өткізгішлік типі термикалық іслеу беріу нәтижесінде өзгермейтуғынлығын көрсетті. Бунда n-типі үлгілерде салыстырмалы қарсылық шамасының киші шамаға кемейіуі, ал p-типі үлгілерде киші шамаға көбейіуі бақланады.

DLTS спектрін өлшеу тұрақлы кернеу хәм тұрақлы сыйымлылық режимлерінде бір яки бір неше мәрте өлшеу жолы менен эмиссия тезліклерінің хәр қыйлы айналарында белгілеп барылған қатнастарда  $t_2$  хәм  $t_1$  ( $t_2/t_1=3$ ,  $t_1=1 \div 500$  мс) өткеріліп, кері орын өзгертіу сброс импульсінің тезлігі  $t_f=1\text{мкс}-100\text{мс}$  интервалларында болды.

Вольт фарадалық характеристикадан  $1/C^2=f(V_{обр})$  ғәрезілігі анықланды. Бұл байланыстар барлық изертленген диодларда тууы сызықты болды, бұл нәрсе ярымөткізгіш көлемінде қосымталардың теңдей бөлістіргенлігін көрсетеді.

p-типі үлгілерде салыстырмалы қарсылық мәнісі аз мұғдарда төменлейді, бірақ бунда өткізгішлік типі өзгермей қалады. Термикалық қайта ісленген контроль образецтерді өлшеу нәтижелері, оларда салыстырмалы қарсылық мәніслері дерлік өзгеріссіз қалатуғынлығын көрсетті.

Самарий менен диффузиялық легирленген үлгілер үшін хәм контроль үлгілер үшін салыстырмалы қарсылықтар тереңліктері бойынша өлшеу өткерілді. Бұл нәтижелердің анализінен,  $Si < Sm >$  образецтерінде бөлістіріу профили  $Si < Gd >$  образецтері үшін болғанындай  $ezfc$  функциясы менен жазылмайды екі участкадан тұрады: дәслеп  $\rho$  ның  $\sim 80$  мкм тереңлікке шекемгі бірден өсіуі бақланады, кейинірек  $\rho$  мәнісі тұрақласады хәм  $\rho$  ның тереңлік пенен өзгеріуі көрінбеді. Ал контроль үлгілер үшін, жоқарыда айтқанымыздай  $\rho$  мәніслерінің тереңлігі сезілерлі дәрежеде өзгермейді.

Еу қосымталы кремний қасиетлерін изертлеу нәтижелері берілген. Кремнийге диффузиялық жол менен кірітілген европий атомларының

катнасыуы, өсириу ўақтында да терең қәддинің белгили концентрацияда пайда болыуына алып келмейди.

Диффузионлы-легирленген Si<Eu> үлгилердің қатламлы профилленилиуинен, үлгилердің бетінде де көлемінде де европий атомлары менен байланысқан электроактив орайлар жоқ екенлиги анықланды.

Нейтронлы-активацион анализ жәрдеміндеги қосымша экспирементлер диффузионлы, легирленген үлгилердеги кремний көлемінде европий атомларының жоқ екенлигин көрсетти, бул кремнийде европий атомларының диффузия коэффициентинің төменлигин көрсетеди, Бул ўақытта еритиндиден өсириу ўақтында легирленген үлгилерде европий жүдә жоқары концентрацияларда ( $10^{15}$  тен  $10^{18}$  см<sup>-3</sup> шекемги) қатнасыуы анық.

Термикалық тәсир етиу ўақтында европий атомларының активация мүмкиншиликлерин үйрениу мақсетінде хәм оларда термикалық дефектлердің пайда болыуы процессине тәсирин үйрениу ушын n-Si<Eu> үлгилерин 0,5-50 саат даўамында 900-1200<sup>0</sup>С интервалда жоқары температуралы қайта ислеўлер өткерилди. Анализ хәм алынған нәтийжелерден, термикалық қайта ислеўге хәм жоқары температуралы қайта ислеўден кейинги n-Si<Eu> үлгилеринің суўытыу тезлигинде еки европийге тийисли қәддилер бақланды. Солай етип, жоқары температуралы қайта ислеў европий атомларының активлигине алып келеди хәм бунда кремнийдің қадаған етилген зонасынын жоқарғы ярымында европий атомлары менен байланысқан еки терең қәдди пайда болады. Оннан басқа Si көлемінде Eu атомларының қатнасыуы термикалық дефектлердің пайда болыу эффективлигин төменлетеди.

Изертлеу нәтийжелеринің анализинен, лантанойдлар менен дәслепки кремнийдің кислород концентрациясы қанша көп болса, жоқары температуралы қайта ислеў менен стимулланған терең қәддилердің концентрациялары сонша көп болатуғынлығы анықланды. Бул эффект технологиялық қосымталардың лантанойдлар менен өз-ара тәсир етисиу мүмкиншилиги бар деген ой жүритиуіге алып келеди.

Еритпеден өсириу процесінде европий хәм лантан менен легирленген кремний үлгилери n-типли өткизгишликке ийе, салыстырмалы қарсылығы ( $\rho$ ) 20 –100 Ом см ди қурады. Эталон образецлер ушын өсирилген  $\rho$  20 –100 Ом см болған әдеттеги n-Si қолланылды. Сыйымлықлы өлшеўлер алтын менен пуўландырылып таярланған Шоттки барьерлерінде өткерилди, бунда Омлық кантакт ушын сурьма пуўландырылды. DLTS спектрлерин турақлы кернеўлилик режимінде де эмиссия тезликлери  $t_1=2$  мс хәм  $t_2=6$  мс болған айнасы бар бир

мәртелі сканерлеу жолы менен турақлы сыйымлықлы режимде алып барылды және хәр қыйлы тезлік эмессиялы айналар менен көп мәртелі 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 шекемгі аралықта өзгереді. Қайтыу кернеулигиниң өлшеу импульсиниң узынлығы 1 мкс –100 мс интервалларында өзгерип турады. Бир мәртелі сканерлеу хәдийсесинде спектрлердиң есабы экспериментал DLTS–иймекликти теоретикалық иймеклик пенен салыстырыу жолы менен өткерилди.

n-Si (Eu) образециндеги оптикалық актив (түйинлер аралық) кислород ( $N_0^{\text{опт}}$ ) тың концентрациясын 300K де еки нурлы схемада Specord –IR –75 спектрофотометр жәрдемінде өлшенди. Кремнийде жайласқан түйинлер аралық кислород  $\lambda=9,1$  мкм максимумлы жутылуы полосасын береді. Жутылуы полосасы интенсивлиги образецтеги кислород концентрациясына тууры пропорционал.  $N_0^{\text{опт}}$  шамасының бахасы 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 менен легирленген кремний образецлеринде ИК-жутылуы спектрлерин өлшеу нәтийжелеринен, түйинлер аралық кислородтың муғдары ( $0,6-7$ ) $\times 10^{17} \text{ см}^{-3}$  интервалында хәрекет ететуғынлығы анықланды.

Термикалық тәсир етиу уақтында европий атомларының активация мүмкинлигин үйрениу эталон үлгилерде өткерилди. Активация мүмкиншилигин үйрениу максетинде хәм олардың терминалық дефект келтирип шығаруы процессине тәсирин үйрениу ушын n-Si(Eu) хәм n-Si(La) үлгилерин 900-1200 °C температуралы интервалларда 2-50 саат дауамында терминалық қайта ислеу өткерилди.

n-Si(Eu) үлгилериниң әдеттеги DLTS спектрлери 2 саат дауамында 1000 хәм 1200 °C да өткерилген терминалық қайта ислеу спектрлери келтирилген. Спектрлерди 77-320 K температура интервалларында турақлы сыйымлықлы (DLTS) режимде түсирилген. Терең қәдди параметрери көп мәртелі сканерлеу жолы менен DLTS спектрлеринен алынған.  $\ln(OT^2)=f(1/LT)$  Аррениус ғәрезлигинен алынған.

Есаплаулардан,  $E_c-0,23$  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 орналасуы кесімлері  $2 \times 10^{-17}$ ,  $2,5 \times 10^{-15}$  хәм  $1 \times 10^{-16} \text{ см}^2$  сәйкеслікті қурайды.

Тексеріліп атырған бағаналардың концентрациялары  $1200^\circ\text{C}$  термикалық қайта іслеуден кейін  $1 \times 10^{12}$ ,  $8 \times 10^{13}$ ,  $3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$  ге тең. Усыған ұқсас термикалық қайта іслеулерге қойылған контроль үлгілерде бір пик көрінеді.  $E_c - 0,23 \text{ эВ}$

Анализ хәм алынған көрсеткішлерді салыстырулардан, европий атомларының қатнасуына, қайта іслеу температурасына хәм n-Si (Eu) үлгілерінің қайта іслеуден кейінгі сууы тезлігіне екі теңдеме сезгір екенлігі анықланады.  $E_c - 0,40 \text{ эВ}$  хәм  $E_c - 0,23 \text{ эВ}$  Eu ның қатнасуына онша тәсір етпейді, усыған ұқсаған параметрлерге ийе бағана лантанойдлардың қосымтасыз болған эталон үлгілерінде ушырасады. Шамасы  $E_c - 0,23 \text{ эВ}$  ионизация энергиялы терең қәдді n-Si (Sm) үлгілерінде де, n-Si (Eu) үлгілерінде де термикалық қайта іслеу дефекті болып есапланады.

Термикалық қайта іслеуден алдыңғы хәм кейінгі ИК-жұтылуы спектрлерінің өлшеу нәтижелері термикалық қайта іслеу ақыбетінде n-Si (Eu) үлгілерінде оптикалық актив ксилородтың концентрациясының көбейіуін көрсетеді. Температураның жоқарылауы менен үлкейіу эффективлігі  $N_0^{\text{опт}}$  күшлірек хәм  $1200^\circ\text{C}$  термикалық қайта іслеуден кейін хәм де шынықтырылғаннан кейін  $N_0^{\text{опт}}$  ның күшейіуі  $\sim 15\text{-}20\%$  ке жетеді. Солай етип,  $1100^\circ\text{C}$  температурада n-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.

#### **§ 2.4. Кремнийде технологиялық қосымталар тәсірі хәм Eu киритілген кремнийде терең қәдділер пайда болуы нәтижелері**

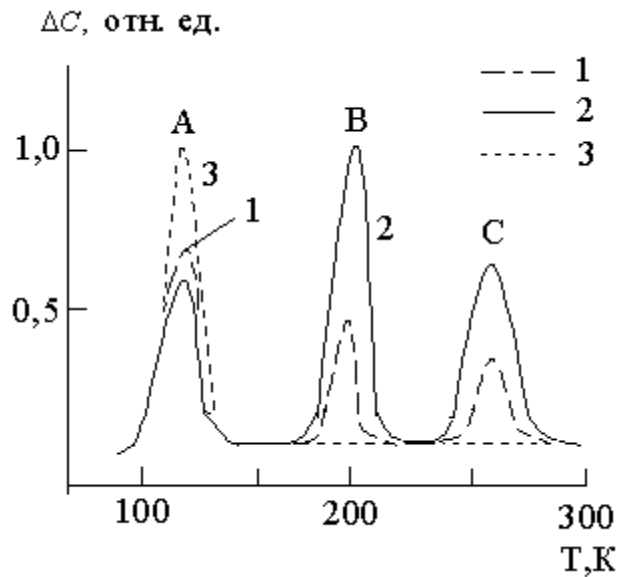
DLTC хәм ФЕ спектрлерінің көрсеткішлері бойынша жоқарыда көрсетілген қосымталардың кремнийде қатнасуы сезілерлі концентрацияларда терең қәдді(ГУ) пайда болуына алып келмейді. Нейтронла-активацион анализ жәрдеміндегі қосымша экспериментлер Eu атомларының Si көлемінде жүде жоқары концентрацияларда бар екенлігін көрсетеді ( $10^{15}$  тен  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  шекем). Бул көрсеткішлер еритіндіден өсіріу процессінде кремнийге киргізілген сийрек жер элементлеріндегі қосымталарының электрлік нейтраллығы хаққында хәр қыйлы авторлардың пикирлерін тастыйықлайды.

Термикалық тәсир етиў ўақтында европий атомларының активация мүмкинлигин үйрениў эталон үлгилерде өткерилди.

Активация мүмкиншилигин үйрениў мақсетинде хәм олардың термикалық дефект келтирип шығарыў процессине тәсирин үйрениў ушын n-Si(Eu) үлгилерин 900-1200 °C температуралы интервалларда 2-50 саат даўамында термикалық қайта ислеў өткерилди.

1-сүўретте n-Si(Eu) үлгилериниң әдеттеги DLTS спектрлери 2 саат даўамында 1000 хәм 1200 °C да өткерилген термикалық қайта ислеў спектрлери келтирилген.

Спектрлерди 77-320 K температура интервалларында турақлы сыйымлықлы (DLTS) режимде түсирилген. ГУ параметрери көп мәртели сканерлеў жолы менен DLTS спектрлеринен алынған.  $\ln(OT^2)=f(1/LT)$  Аррениус ғәрезлигинен алынған. Бул өлшеўлерден, термикалық қайта ислеў өткерлген n-Si(Eu) үлгилериниң DLTS спектрлеринде 110(A), 205(B), 256(K) температураларында максимумлы үш пик барлығы анықланады. Есаплаўлардан бул пикирлерге  $E_c-0,23$  эВ,  $E_c-0,4$  эВ хәм  $E_c-0,4$  эВ хәм  $E_c-0,46$  эВ ионизация энергиялы ГУ ге тең екенлиги анықланады.



1-сүүрет.  $t=1000$  (1),  $1200^{\circ}\text{C}$  (2) дағы термикалық қайта іслеуден кейинги  $n\text{-Si}(\text{Eu})$  үлгилериниң DLTS спектрлери, 3- Si эталон үлги.

Тексерилип атырған үлгилердиң концентрациялары  $1200^{\circ}\text{C}$  термикалық қайта іслеуден кейин  $1 \times 10^{12}$ ,  $8 \times 10^{13}$ ,  $3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$  ге тең. Усыған уқсас термикалық қайта іслеулерге қойылған контроль үлгилерде бир пик көринеди.  $E_c - 0,23 \text{ эВ}$  (1-сүүрет, 3 иймеклик) бирақ оның концентрациясы легирленгендегиге қарағанда анағұрлым жоқары. Бул пик контроль үлгидеги пикке сәйкес келетуғынлығы анықланды.

ФЕ жәрдемінде өлшенген  $n\text{-Si}(\text{Eu})$  үлгилериндеги терең қәддиниң ионизациясының оптикалық энергия мәнислери ионизацияның термикалық энергия мәнислери менен бирдей болады.  $1200^{\circ}\text{C}$  да термикалық қайта іслеуден өткен европийли кремний үлгилериниң ФЕ спектринде  $h\nu \sim 0,23, 0,40, 0,46 \text{ эВ}$  та үш анық көрсетилген пиклер бақланады.

Анализлерден хәм алынған көрсеткишлерди салыстырыудан, европий атомларының қатнасыуына қайта іслеу температурасына хәм  $n\text{-Si}(\text{Eu})$  үлгилериниң қайта іслеуден кейинги сууыу тезлигине еки теңлеме сезгир екенлиги анықланады.  $E_c - 0,40 \text{ эВ}$  хәм  $E_c - 0,23 \text{ эВ}$  Eu диң қатнасыуына онша тәсир

етпейди,  $E_c - 0,23$  эВ ионизация энергиялы ГУ n-Si (Sm) үлгилеринде де, n-Si (Eu) үлгилеринде де термикалық қайта іслеу дефекти болып есапланады.

Термикалық қайта іслеуден алдыңғы хәм кейинги ИК-жutyылыу спектрлериниң өлшеу нәтийжелери термикалық қайта іслеу ақыбетинде n-Si (Eu) үлгилеринде оптикалық актив кислородтың концентрациясының көбейиуин көрсетеди. Температураның жоқарылауы менен үлкейиу эффектив  $N_0^{\text{опт}}$  күшлирек хәм  $1200^{\circ}\text{C}$  термикалық қайта іслеуден кейин хәм де шынықтырылғаннан кейин  $N_0^{\text{опт}}$  ның күшейиуи  $\sim 15-20\%$  ке жетеди. Солай етип,  $1100^{\circ}\text{C}$  температурада n-Si (Eu) үлгилериниң қайта іслеуи шынықтырылғаннан кейин  $N_0^{\text{опт}}$   $\sim 15-20\%$  ке көбейиуине алып келеди, температураның көтерилиуи менен үлкейиу эффекти  $N_0^{\text{опт}}$  күшлирек болады. n-Si (Eu) үлгилеринин DLTS спектринде бул эффект пенен “синхрон түрде” ГУ пайда болыуы бақланады.

### **Питкериу қәнигелик жумысы бойынша жуўмақлар**

- 1 Питкериу жумысында кремнийге европий хәм басқада сийрек жер элементлери атомлары диффузия ямаса радиациялық дефектлер менен өз-ара тәсирлесиу

процессин хэм өсирий жәрдеминде легирленгенде болып өтетуғын физикалық қәсийетлер хэм термикалық, раиациялық дефектлер менен өз-ара тәсирлесиўин үйрендик.

- 2 Лантаноидлар қатарындағы элементлерди металлларда, ярымөткізгішлерде хэм қуймаларда легирлеўши қосымта түрінде пайдаланыў олардың механикалық хэм физикалық қәсийетлериниң жақсыланыўына алып келеди.
- 3 Жоқары температуралы қайта ислеўден өткен,  $n - Si < Eu >$  үлгилериниң қадаған етилген зонасының жоқарғы ярымында терең қәддилер табылды.
- 4  $n - Si < Eu >$  үлгилериниң жоқары температуралы қайта ислеўи  $110^0 K, 205K, 256K$  ли максимумға ийе пиктиң пайда болыўына алып келетуғынлығы анықланды.
- 5 Хәр қыйлы режимлерде жоқары температуралы қайта ислеўге шекемги хэм оннан кейинги  $n - Si < Eu >$  үлгилериниң салыстырмалы қарсылығын өлшеў, термо қайта ислеў қыздырыў ўақтының өсиўи менен  $\rho$  ның үлкейиўине алып келетуғынлығын көрсетти. Жоқары температуралы қайта ислеўлердеги европий атомларының активациясы менен белгиленетуғын орайлар акцепторлық характерге ийе деген жуўмаққа келди.
- 6 Бақлаўлардан европий атомларының кремнийде болыўы дефектлер пайда болыў тезлигин кемейтеди.

#### Пайдаланылған әдебиятлар

1. Далиев Х.С., и др. Влияние термической обработки на образование центров с глубокими уровнями в кремнии, легированном европием или лантаном. Неорганические материалы, 2001, т. 37, 5, 527-529 с.

2. Макаренко Л.Ф. Проверка применимости модели моновалентного дефекта для описания свойств комплекса вакансия--кислород в кремнии GaAs ФТП, 2000, т. 34, вып. 10 с.1162. <http://www.ioffe.ru/journals/ftp/2000/10/>
3. И.Г. Атабаев, Н.А. Матчанов О модели деффектообразования в сплавах  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ . «Фотоэлектрические явления в полупроводниках», Ташкент 2004. ст. 100-102.
4. Е.Ф.Венгер, М. Грендел и др. Структурная релаксация в полупроводниковых кристаллах и приборных структурах «Фенікс» Киев. 1994, 246с.
5. Александров О.В. Модель сегрегации примесей редкоземельных элементов при твердофазной эпитаксиальной кристаллизации кремния. Санкт-Петербург. 1999, т.1, №4.С. 283-286.
6. Зайнабиддинов С.З., ДалиевХ.С., Емкостная спектраскопия дефектов в кремнии, легированном европием. Уз.ФЖ.1997, 5-6, 38-41 с.
7. М.С.Бреслер, О.Б.Гусев, Е.И.Теруков, А.Froitzheim\*, W.Fuhs\* Краевая электролюминесценция кремния: гетероструктура аморфный кремний-кристаллический кремний. ФТИ им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия \*Hahn-Meitner-Institut, Abt. Silizium-Photovoltaik,D-12489 Berlin, Germany ФТТ, 2004, том 46, вып. 1.
8. Далиев Х.С., Акбаров А.Ж. Об активации атомов Eu и La в кремнии под воздействием внешних факторов. Сб. Трудов Межд. конференции. <<Прикладные проблемы физики полупроводников>> Ташкент, 1999, С. 16-17.
9. Зайнабиддинов С.З, Далиев Х.С. Емкостная спектроскопия дефектов в кремний, легированном европием.Уз.ФЖ.1997,№ 5-6,с.38-41.
10. С.З.Зайнабаддинов и др. Ярим ўтказгичлар физикаси. Т. «Ўқитувчи»1999 й. С. 59-80.
11. Садыгов З.Я., Бурбаев Т.М., Курбатов В.А. Лавинный фотодиод со свойствами структуры металл--диэлектрик—полупроводник
12. 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/>