

**ЎЗБЕКИСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ЖОҚАРЫ ҲӘМ ОРТА
АРНАЎЛЫ БИЛИМЛЕНДИРИЎ МИНИСТРЛИГИ**

**БЕРДАҚ АТЫНДАҒЫ ҚАРАҚАЛПАҚ МӘМЛЕКЕТЛИК
УНИВЕРСИТЕТИ**

МАГИСТРАТУРА БӨЛИМИ

Қол жазба хуқықында

УДК. 621.315.592

Утемуратова Хушнида Юсупбековна

**«АРСЕНИД ГАЛЛИЙ ЯРЫМӨТКИЗГИШЛИ ЭСБАПЛАРДЫҢ
ЭЛЕКТРОФИЗИКАЛЫҚ ПАРАМЕТРЛЕРИНЕ ИМПУЛЬСЛИ
ЛАЗЕРИНИҢ ТӘСИРИН ҮЙРЕНИЎ»**

5А-140204 « Конденсацияланған орталықлар физикасы хәм материалтануы
(түрлери бойынша)» кәнигелиги бойынша магистр академиялық

дәрежесин алыў ушын жазылған

ДИ С С Е Р Т А Ц И Я

МАК да жақлаўға рухсат

Магистратура бөлими баслығы:

_____ доц. А. Гулимов

Илимий басшы: _____ **проф. Тагаев М. Б.**

Кафедра баслығы: _____ **проф. Исмайлов Қ. А.**

Нөкис - 2017

Мазмуны

Кирисиў	3
I Бап. Әдебий шолыў	8
§1.1 Ярымөткізгіш материалларының дефектлі структураларына импульслы лазер нурының тәсири	9
§1.2. Шоттки диодларының вольт-амперлік характеристикасына ультрасес толқынларының тәсири.....	13
§1.3. Арсенид галлий материалында лазерлік отжиг арқалы контакт алыў.....	29
II Бап. Эксперимент методикасы	35
§2.1. Ярымөткізгішли материаллардың электрофизикалық қасиетлерин изертлеўде қолланылатуғын приборлар	35
§2.2. Микроплазмалы характериограф жәрдеминде модуляциялық дифференциаллаў методикасының айрықша өзгешелиги.....	43
III Бап. Эксперимент нәтижелери	48
§3.1. Лазерлік нурландырыўдың металл-GaAs контактинің электрофизикалық қасиетлерине тәсирин изертлеў	48
§3.2. Аса жоқары жийиликте ислейтуғын GaAs тийкарындағы диодлар ушын барьер контактларына қойылатуғын тийкарғы талаптарды изертлеў.....	54
Жуўмақлаў	67
Әдебиятлар	68

К И Р И С И Ы

Диссертация жұмысының тийкарланыуы хәм актуальлығы. Арсенид галий ярымөткизгишли материалы өзиниң қолланылыуы областлары бойынша кремнийден кейинги ярымөткизгишли материаллар болып, оның тийкарында хәр қыйлы квантлы өлшемлердеги жуқа пленкаларды өсиреди, соның менен бирге арсенид галийден таярланған ярымөткизгишли әсбаплық үскенелер дерлик барлық тарауларда пайдаланылады. Сонлықтанда арсенид галий тийкарындағы ярымөткизгишли материалдың лазер нуры тәсиринен кейинги курамындағы релаксациялық процесслерди хәр қыйлы усыллар менен изертлеуі хәзирги ўақыттағы физик алымлардың ең тийкарғы актуаль мәселериниң бири болып есапланады.

Хәзирги ўақытта ярымөткизгишли әсбаплық үскенелердиң қолланылыуы областлары дерлик барлық тарауларда бар болып саналады. Солардың ишинде арсенид галий ярымөткизгишли материалы өзиниң қолланылыуы областлары бойынша кремнийден кейинги туратуғын ярымөткизгишли материаллардың бири болып есапланады. Ең киши өлшемге ийе хәм шыдамлылығы жүдә жоқары болған ярымөткизгишлерден таярланатуғын барлық әсбап-үскенелердиң алыныуы ушын подложка есабында арсенид галий ярымөткизгишли материалы пайдаланылады. Себеби, оның кристаллық решеткасы ярымөткизгишли екилик, үшлик ямаса бир неше ярымөткизгишли материаллардан туратуғын бирикпелердиң барлығының кристалл решеткаларына арсенид галийдиң кристалл решеткасы жақын болып келеди. Усыған тийкарлана отырып, оның үстине дерлик көпшилик ярымөткизгишли жуқа пленкалар, квантлы ямалар хәм квантлы точкалар өсириледи. Арсенид галий ярымөткизгишли материалларының алыныуы технологиясы қыйын болғаны менен басқа көп ярымөткизгишли материалларға қарағанда оның өзине түсер бақасы жүдә қымбат емес болып есапланады. Сонлықтанда арсенид галий тийкарындағы барлық қатламлы пленкалардың хәр қыйлы тәсирлерден кейинги оның

электрофизикалық характеристикаларын үйрениу арқалы оның қолланылуы областарын жәнede асырылуыын тәмийинлеуге болады. Усындай себеплерге тийкарланып бизлер өзлеримиздиң магистрлик илимий диссертация жұмысымызда арсенид галий тийкарындағы ярымөткизгишли материалларға импульсли рубин лазериниң тәсир етиуинен кейинги оның электрофизикалық характеристикаларын изертлеп шықтық.

Изертлеу объекти хәм предмети. Бул жұмыста изертлеу объекти сыпатында GaAs, ярымөткизгишли структурасы алынды.

Жұмыста GaAs ярымөткизгишли материалының хәр қыйлы қалыңлыққа хәм қатламға ийе болған үлгилериниң ток өткерийу процесслериниң импульсли лазер нуры тәсиринен кейинги өзгерийулерин изертленди.

Жұмыстың мақсети хәм ұазыйпалары. GaAs ярымөткизгишли материалының импульсли лазер нуры тәсиринен кейинги қурамындағы пайда болатуғын релаксациялық процесслерге байланыслы электрофизикалық характеристикаларының өзгерийуин изертлеу магистрлик диссертация жұмысымыздың мақсетти болып есапланады. Усы мақсетке жетиу ушын төмендеги ұазыйпаларды атқаруйу керек.

1. Арсенид галий ярымөткизгишли материалының импульсли лазер нурының қууатлығына байланыслы оның электрофизикалық характеристикаларын вольт-амперлик, вольт-фарадалық кубылыслары бойынша анықлау.

2. Жеке халында алынған GaAs қатты структурасының қатламлы структураларға қарағанда оптикалық қәсийетлериниң өзгешеликлерин анықлау.

Изертлеудиң илимий жаңалығы.

а) GaAs ярымөткизгишли материалының рубин импульсли лазери тәсиринен кейинги қурамындағы болып өтетуғын релаксациялық процесслер анықланды.

б) Ярымөткізгішли GaAs диодлық структураларындағы токтың тасылуы механизмлерінің өзгерістері үйренілді.

в) Температураға байланысты GaAs жуқа пленкасындағы ток өтуі процессі үйренілді.

г) Көлемлік кристалларға салыстырғанда GaAs /GaAs структурасының қалыңлығының артуы менен электрофизикалық қасиеттерінің өзгерістері анықталды.

Изертлеудің тийкары мәселелері хәм болжаулары.
Ярымөткізгішли материаллардың көп түрлілігіне байланысты, оларға басқа элементтің атомларын киргизуі арқалы ямаса сыртқы хәр қыйлы тәсир етуі арқалы олардың қолланылуы областларын өзгертуге болады. Импульсли лазер нурының GaAs ярымөткізгішли материалына тәсир еткеннен кейингі оның электрофизикалық хәм оптикалық қасиеттерінің өзгеруін хәм оның усы лазер тәсірінен кейингі қолланылуы областларының өзгерулерін байқауға болады. Сонлықтанда биз, бул магистрлик диссертация жұмысымызда GaAs ярымөткізгішли материалына импульсли лазер нуры тәсир еткеннен кейингі электрофизикалық хәм оптикалық қасиеттерінің өзгерулерін изертлеуді мақсет етип алдық.

GaAs жуқа структурасының курамында импульсли лазер нуры тәсир еткеннен кейин структуралық өзгерістердің пайда болатуғынын анықлауды хәр қыйлы изертлеу ұсыллары менен уйренип шығуы, бизлердің магистрлик диссертация жұмысымыздың тийкары ұазыйпасы болып есапланады.

Изертеу темасы бойынша әдебиятлар түсіндірмесі (анализі).

Көпшилик илимий әдебиятлардан бизге белгили, лазер нурларының ярым өткізгішлер менен өз-ара тәсірлері өз ишине бир қанша аспектерді қамтыйды. Сол аспектердің ишінде нурланыудың точкалық дефектер системасына тәсірі бүгингі күнги ярымөткізгішли

материаллардың хәм эспаблардың қәсийетлерин анықлаўшы актуал мәселелердиң бири болып есапланады.

Оптикалық орталықтан киши узынлықтағы күшли жақтылық импульси тарқатылғанда сызықлы емес оптикалық қубылыслардан басқа бир қанша эффектлер жүз береді, мысалы: механикалық кернеўдиң толқын генерациясы, кристалдың фонон системасының қозыўы, соққы толқынларының тәсири хәм тағы басқалар усы эффектлердиң хәр бири өз гезегинде дефект пайда ете алады, хәттеки кристал решеткасында структуралық өзгерислерди енгизеди, яғный бул жерде лазер нурына қосымша басқада эффектлердиң барын байқаймыз.

Бул эффектлердиң дерлик барлығы материалдың балқыў процесси менен байланыста екенин анықлайды. Ал лазер нурының балқыў температурасына жетпейтуғын қуўаттылық тығызлығындағы материалларға тәсири, әсиресе A_3B_5 бирикпелериндеги ярым өткізгішлердиң қәсийетлери дерлик изертленбегенликтің қасында. Илимий әдебиятларда көрсетилгениндей ярым өткізгішлерге лазер нуры тәсиринде диффузия примеслерин хәм кристалдағы деффектлердиң тереңге кеткенлигин байқаймыз.

Сол себепли Шоттки барьерли ярым өткізгішли структураларға импульсли лазер нурының тәсирин үйрениў үлкен илимий қызығыўшылық туўдырады.

Изертлеў методлары. Эксперимент қойыў ушын арналған бизиң қурылмамыз тийкарынан төрт бөлимнен турады: рекомбинациялық нурланыўды пайда етиўши лазерлерден криостаттан, монохроматордан хәм регистрациялаўшы қурылмадан турады. Ярымөткізгішлердиң нурланыўының рекомбинациялық спектри мүмкин болғанынша қысқа хәм интенсивлиги киши болған спектрлерден турады, сонлықтанда жақтылық күши үлкен болған монохроматордан пайдаланамыз. Бизлердиң берилген жумысымызда MDR-23 монохроматор қолланылды. MDR-23

монохроматорының жақтылық күши призмалық монохроматорларға карағанда бир неше есе күшли болады.

Жумыстың теориялық хэм әмелий әхмийети. Өзбекистан Республикасы Президентиниң “Өзбекистанды раўажландырыўдын харекетлер стратегиясы¹”ның бес бағдарынан бири жәмийетлик тараўды раўажландырыўға каратылған болып бунда тәлим хэм пән тараўын раўажландырыўға бағдарланған. Бул бағдардын тийкарғы бөлимлеринен бири илимий-изертлеў хэм инновация искерлигин коллап-куўатлаў, илимий хэм инновация жетискенликлерин әмелиятқа еңгизиўдин нәтийжели механизмин жаратыў, жокары оқыў орынлары хэм илимий-изертлеў институтлары касындағы кәнигелестирилген илимий-экспериментал лабораториялар, жокары технология орайларын хэм технопаркларды шөлкемлестириўге бағдарланған.

Арсенид галийден таярланған ярымөткизгишли материаллардын ток өткерий процесслери, оптикалық қәсийетлери хәр қыйлы мәмлекетлердеги алымлар тәрәпинен изертленбекте, бирақ бундай ярымөткизгишли структуралардын алыныў усылларына байланыслы хэм өсирилиў тәртибине байланыслы олардын барлық характеристикалары бир-биринен парк қылады. Ярымөткизгишли арсенид галий тийкарындағы структуралардын нурланыў орайларын аныклай отырып, олардын қайсы ярымөткизгишли әсбаплық үскенелердин актив областында мүмкиншилигин туўдырып береди.

Диссертация жумысының қурылысы. Диссертация жумысы кирисиў, тийкарғы бөлим жуўмақлаў хэм пайдаланылған әдебиятлар бөлимлеринен ибарат. Тийкарғы бөлим 3 бап хэм 7 параграфтан турады.

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2017-yil 7-fevraldagi "O'zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirish bo'yicha harakatlar strategiyasi to'g'risida" gi PF-4947-sonli Farmoni. O'zbekiston Respublikasi qonun hujjatlari to'plami, 2017-y., 6-son, 70-modda.

I Бап. Әдебий шолыў

Электронлық оптикада, интеграллық оптикада хәм квантлық электроникада кеңнен қолланылатуғын A_3B_5 группасындағы кристалларға **лазер** нурының тәсир етиўин үйрениўге қызығыўшылық олардың электротехникалық, фотоэлектрлик хәм оптикалық қәсийетлерин басқарыўға мүмкиншилигин жаратады.

Бул жумыста хәр қыйлы қуўатлылықтағы хәм импульс узынлығындағы лазер нурының жоқарыдағы айтылған кристаллардың электрлик, оптикалық, фотоэлектрлик қәсийетлерине тәсири изертленилди.

Көпшилик илимий әдебиятлардан бизге белгили, лазер нурларының ярым өткизгишлер менен өз-ара тәсирлери өз ишине бир қанша аспектлерди қамтыйды. Сол аспектлердиң ишинде нурланыўдың точкалық дефектлер системасына тәсири бүгинги күнги ярымөткизгишли материаллардың хәм әспаблардың қәсийетлерин анықлаўшы актуал мәселелердиң бири болып есапланады.

Оптикалық орталықтан киши узынлықтағы күшли жақтылық импульси тарқатылғанда сызықлы емес оптикалық қубылыслардан басқа бир қанша эффектлер жүз береді, мысалы: механикалық кернеўдин толқын генерациясы, кристалдың фонон системасының қозыўы, соққы толқынларының тәсири хәм тағы басқалар усы эффектлердиң хәр бири өз гезегинде дефект пайда ете алады, хәттеки кристал решеткасында структуралық өзгерислерди енгизеди, яғный бул жерде лазер нурына қосымша басқада эффектлердиң барын байқаймыз.

Бул эффектлердиң дерлик барлығы материалдың балқыў процесси менен байланыста екенин анықлайды. Ал лазер нурының балқыў температурасына жетпейтуғын қуўатлылық тығызлығындағы материалларға тәсири, әсиресе A_3B_5 бирикпелериндеги ярым өткизгишлердиң қәсийетлери дерлик изертленбегенликтің қасында. Илимий әдебиятларда көрсетилгениндей ярым өткизгишлерге лазер нуры

тәсиринде диффузия примеслерин хәм кристалдағы дефектлердин тереңге кеткенлигин байқаймыз.

Сол себепли Шоттки барьерли ярым өткізгішли структураларға импульсли лазер нурының тәсирин үйрениў үлкен илимий қызығыўшылық туўдырады.

§1.1 Ярымөткізгіш материалларының дефектли структураларына импульсли лазер нурының тәсири

Материалдың қызығы, толқын кернеўиниң генерациясы хәм кристалдың электронлық системасының қызығы ярым өткізгішлерде дефектлердин пайда болығы менен түсиндириледі [1,3].

Ярымөткізгішли материаллардың қадаған етилген зонасының ени ΔE_g -ның хәм жақтылық нурланығының $h\nu$ квантының, еркин зарядлардың концентрациясы араларындағы байланыс жақтылық энергиясының жутылығының еки тийкарғы механизмине алып келеді.

1-механизм $h\nu > E_g$ болып, бул механизм «Индуцированлы металлық» деп аталады. Бунда еркин заряд тосығышылардың тең салмақлылық концентрациясы хәм нурланбай өтиў ұақытының мәнислери үлкен болады. Демек, жақтылық энергиясының жутылығы тең салмақлы емес зарядлардың өз-ара тәсири менен болады.

2-механизм $h\nu < E_g$ болып, бул механизм «ярымөткізгішли» деп аталады. Бунда еркин заряд тасығышылардың теңсалмақлылық концентрациясы хәм нурланбай өтиўлер ұақытлары аз болады, демек бул жағдайда меншикли жутылығы болып өтеди усы түсиндирип өткен еки механизм тәсиринде жақтылық атомының энергиясы, еркин заряд тасығышылардың хәдден тыс қызығығына хәм артықмашлы электрондыркалы жуптың пайда болығына алып келеді. Бул процесс олардың избеиз хәдден тыс қызығы түринде ярымөткізгіштиң электронлы подсистемасына бериледи.

Бул процесслердің эффективлигин төмендегі формулалар жәрдемінде анықлауымызға болады.

$$\alpha = \frac{4\tilde{I}\tilde{O}}{\lambda} [\tilde{n}\tilde{i}^{-1}] \quad (1.1.1)$$

Бунда: α – жутылыу коэффициенті

$$k = \frac{(n-1)^2 + x^2}{(n+2)^2 + x^2} \quad (1.1.2)$$

Бунда: k – шағылысу коэффициенті n хәм x -лар сыныу көрсеткішлери

Бул биз келтирип отырған α хәм k -коэффициентлери ярымөткізгішли материаллардың бир қанша параметрлерине байланыссы болып есапланады. Материалдың бундай параметрлери қатарына структураның бетлик қатламының тәртипсизлик дәрежеси, нұсқаның дәслепки температурасы қусаған параметрлерин атап өтсек болады. Бул айтылғанлардан басқа жутылыу коэффициентине тәсир ететуғын бир қатар факторлар бар. Бул факторлар ярымөткізгіш пенен жақтылық ағымының өз-ара тәсиринің сызықлы емес характерине тийкарланған болады. Бул өз-ара тәсирлерди механизми бойынша төмендегідей группаларға бөліуге болады.

1-группа факторлары, тең салмақлы емес заряд тасыушылардың жоқары генерациясына тийкарланған болады.

2-группа факторлары, лазер импульсинің тәсирінде решетканың термикалық қызыуына тийкарланған болады.

1-группа факторларына толығырақ түсиник берип өтсек, тең салмақлы емес заряд тасыушылардың фотоэнергиясы, әсиресе нурланыуды қолланғанда α ның мәнісинің өсиуіне алып келеди. Бизге әдебиятлардан [3] белгили болғанындай Si-кремнийди $\lambda = 1,06$ мкм хәм интенсивлиги $5 \cdot 10^7$ Вт/см² болған лазер импульси менен нурландырғанымызда α – ның мәніси 10см^{-1} ден 10^3см^{-1} ге шекем өседі. Лазер импульсинің кейинги өсиуіндеги жутылыу коэффициентинің өзгеріулери Бурштейн-Мосс

эффекти менен түсіндириледі, яғның меншикли жутылыўдың ең кейинги катарларының қысқа толқынлар менен араласыўы болып өтеди.

2-группа факторларына толығырақ түсиник берип өтсек, лазер импульсиниң кристалл решетканың термикалық қызыўына алып келиўи ярымөткізгіш пенен жақтылықтың өз-ара тәсири нәтийжесинде эффективликтің мәнисиниң өсиўине ямаса төменлеўине алып келеди ал қыздырыў бул нұсқаның хәр қыйлы фазалық өтиўлерине алып келеди, яғның аморф жағдайдан кристаллық жағдайға өтиўи мүмкин. Кристаллдың қатты жағдайдан суйық жағдайға өтиўи өз гезегинде α – коэффициентиниң бирден өзгериўине алып келеди. Бундай жағдай ярымөткізгіш металл (яғның p-n) типтеги өтиўлерге туўра келеди, яғның бул өтиў Si-кремний ярымөткізгіш ушын орынлы болып есапланады. Ярымөткізгіш пенен жақтылықтың өз-ара тәсирлесіў процессин характерлейтуғын шағылысыў коэффициентини k – екинши параметрге тәсир ететуғын параметр болып есапланады. Егерде ярымөткізгішли элементлер Si-кремний, GaAs-арсенидгалий, Ge-германийлерге лазер импульси жәрдемінде тәсир етсек, онда шағылысыў коэффициентиниң мәниси $1,5 \div 2$ есеге шекем өседі [4].

Биз сөз етип отырған бул еки коэффициенттиң өзгерислери тийкарынан төмендегилерге байланыслы:

1. Заряд тасыўшылардың концентрациясына
2. Нұсқаның температурасына
3. Фазалық өтиўлерге

Еркин заряд тасыўшылардың хәдден тыс қызыўы хәм тең салмақлы емес электрон-дыркалы жуплардың генерациясы нәтийжесинде көбинесе жақтылық нурланыўдағы жутылыў процесси жүз береді. Наносекундлы лазердин тәсиринде (яғның $w=1$ Дж/см², $\tau_u=20$ Нс) электрон-дыркалы жуплардың генерациясының тезлиги:

$(1-R)hw/2^{-1} h\nu\tau_u \cong 10^{30} \div 10^{31} \text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$ ды қурайды хәм сонлықтанда аз ғана импульстин өзінде-ақ заряд тасыўшылардың мәниси шама менен 10^3см^3 ке жетеди, хәттеки оннанда асыўы мүмкин. Жақтылықтың иркинишли

жұтылыуы мөлдір ярымөткізгіштерді лазер менен нурландырғанда дефект қасыл болыу процессінде әһмийетли роль ойнайды хәм бул жағдайда жақтылықтың ишки зоналық жұтылыуындағы электронлардың шашырауы тийкарғы мәниске ийе болады. Бул ўақыттағы кристалл решетканың тўйинлеріндеги атомлардың жылжыулары бар элементар квант механикалық ўақыт даўамлылығында өтеди. Қозыўдың жоқарғы кәддилерінде ($I > 100 \text{ МВт/см}^2$) жақтылықтың шашырауының атомлардың жыллылық тербелиси нәтийжесінде лазер нурланыуының Мандельштамм-Бриллюнның зәрүрлиги шашырауы (МБЗШ) решеткасы менен өз-ара тәсири болады, бул өз гезегінде когорентли фононлардың пайда болыуына алып келеди [5].

Егерде ярымөткізгіштин өткізгішлик зонасы қадаған етилген зонасынан үлкен болса, онда күшли лазер нурланыуы арқалы заряд тасыушылардың нурланыуының жұтылыуы пайда болып, бул өз гезегінде ударлық ионизация процессин күшейтиуи мүмкин. Егер электромагнит майдан арқалы тезлениуе ийе болған электронның энергиясы E_g –ға жетсе, онда бул электрон ударлық ионланыу жолы менен өткізиушендик зонасына өтеди, яғный ол валентли электрон болып қалады.

Еркин электронлар санының экспоненциаллық өсиуи, электромагнит майдан тәрәпинен решеткаға берилип атырған энергия, материалдың жеткиликли дәрежеде қызыуына, химиялық байланыслардың бузылыуына хәм дефектлердин хәр қыйлы түрлериниң пайда болыуына жеткиликли екенлигин көрсетеди. Дефект пайда болыуының бундай механизми, тек ғана жоқарғы дәрежедеги таза материаллар ушын тийисли болып есапланады.

Ярымөткізгішли материалларда дефект пайда етиуе алып келетуғын эффектлер ретинде көп фотонлы процесслерди айтып өтсекте болады. Бул процесслер нано хәм пикосекундлы диапазонда лазер импульсларын ($I > 1 \text{ МВт/см}^2$) қолланыуда фундаменталь механизмлер болып есапланады [5-6]. Еркин заряд тасыушылардың концентрациясының еки фотонлы

жұтылыу процесси есабынан өсиуи, шама менен 10^{14} сек. дауамында өтеди хэм оның мәниси 10^{17}см^{-3} ге жетиуи мүмкин. Мине, усы уақытта материалда комната температурада хэм эzzi жақтылық тәсиринде болмайтуғын ишки зоналы еркин заряд тасыушының жеткилики дәрежеде жұтылыуы жүз береди. Қызыуға электрон подсистемасынан решеткаға энергияның избе-из берилиуи хэм тең салмақлы емес заряд тасыушылардың биригиуи нәтийжесинде еркин заряд тасыушылардың жұтылыуына алып келинеди. Ионлы дефектлердің пайда болыуына қадаған етилген зонада қосымша қәддилердің пайда болыуы сәйкес келеди. Бул факт температура көп фотонлы хэм көп текшели ионизация нәтийжесинде еркин электронлардың өсиуине хэм Ферми қәддисинин жылжыуы нәтийжесинде заряд тасыушылардың теңсалмақлылық концентрациясының өзгерисине байланысly. Бул эффектлердің барлығы жыллылық турақсызлыққа хэм кристалдың ыдырауына алып келеди [6].

§1.2. Шоттки диодларының вольтамперлик характеристикасына ультрасестолқынларының тәсири

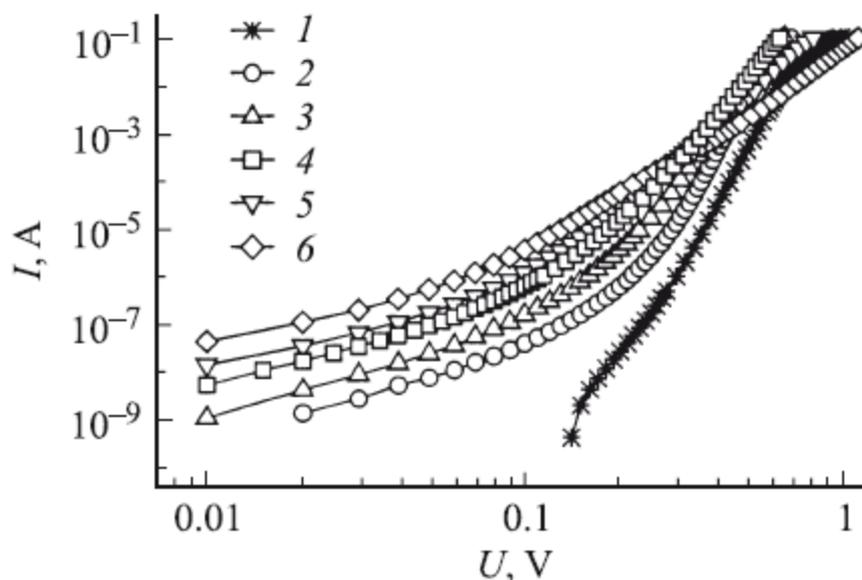
Бүгинги күнде ярымөткізгішлер электроникасының хэм микроэлектроникасының тез пәт пенен рауажланып атырған уақытларында сыртқы тәсирлер менен олардың электрофизикалық параметрлерин басқарыу олардың ишинде ең әпиуайы хэм эффективлиси болған ультрасестолқынларының тәсири жәрдемінде дефектли ярымөткізгішли структуралардың электрофизикалық характеристикаларына атап айтқанда (n-фактор качество, ϕ -барьер бийиклиги, $I_{\text{обр}}$ — кери бағыттағы тоқтың мәниси хэм тағы басқада параметрлерине) тәсирин үйрениуе көбирек итибар бермекте. Әдетте әдебиетлардың көрсетиуинше [1] акустикалық тербелислер нәтийжесинде ярымөткізгішли материал хэм сол материал тийкарында таярланған ярым өткізгішли әсбапларда дефектлердің қайта өзгериси хэм хәр түрли кишкене точкалық дефектлердің дислокация дөгерегине жыйналыуы болады. Лекин бундай болжауларды дәлиллеу

ушын ярымөткізгішли эсбаптарда акусто дефектлик өз-ара тәсирлердин механизмин жәнede тереңирек изертлеўлерди талап етеди. Бизлер бул магистрлик диссертация жумысымызда усындай изертлеўлерди Шоттки диодларында қарастырдық. Буның тийкарғы себеплериниң бири Шоттки диодлардың электрофизикалық қәсийетлерине тәсир етиўши факторлардың жақсы изертленгенлиги менен түсиндириледи. Соған карамастан бул бағытта исленген жумысларды едеде изертлеўди талап ететуғынлығы хәммемизге мәлим. Магистрлик диссертация жумысымыздың әдебий бөлиминде анализ етилип атырған объектимиз хәр қыйлы қуўатлықтағы хәм жийиликте Au-TiB_x-n-n⁺-GaAs тийкарындағы Шоттки диодының вольтамперлик характеристикасына ультрасестин тәсири изертленген.

Әдебий шолыў бөлиминде қарастырылып атырған бул n-n⁺-GaAs тийкарындағы Шоттки диоды структурасы газофазлық эпитаксия усылы менен таярланылған, n- қатламының қалыңлығы 3 мкм, ал n⁺-қатламының қалыңлығы 350 мкм ди қурайды. Киргизилген қоспа элементтин (теллурдың) концентрациясы пленкада 6·10¹⁵ см⁻³, ал подождкада 6·10¹⁸ см⁻³ ди қурайды. Омлық контакт алтын-гумис (Au:Ge) эвтектикасы тийкарында таярланды. TiB_x хәм Au қатламлары магнетронлық ушырыў усылы тийкарында таярланылды. Шоттки диодының диаметри 40 мкм ди қурайды. Үлгилер 20-25 диодты қурап, олардың хәр қайсысы ушын ультрасес тәсирине дейинги хәм ультрасес тәсиринен кейинги вольтамперлик характеристикасы (ВАХ) А қа шекемги диапазонда өлшенилди. Өлшеўлер комната температурасында қараңғы жағдайда өткизилген. Ультрасес тәсирлер f_{US}=4-30 МГц жийилик хәм объектке акустикалық түсип атырған күштиң қуўатлылығы W_{US}-3 Вт/см² пенен, тәсир ўақты хәр бир W_{US} ушын 5 саатты қурайды. Шокли теориясына муўапық туўры бағытта Шоттки диодының ВАХ төмендеги формула менен анықланады:

$$I_F = SA * *T^2 \exp(-\varphi_b/kT) \exp(qU_F/nkT), \quad (1.2.1)$$

бул жерде S омлық контакттың майданы, A^{**} -модифицирленген Ричардсон турақлысы, φ_b - Шоттки контактининң эффективлик тосықлық (барьер) бийиклиги, n – идеаллық коэффициенти (фактор идеальности), U_F – образецке берилген кернеу. Жоқарыда келтирилген теңликтен тууры бағыттағы тоқты өлшеуі усылы арқалы φ_b хәм n анықланылған Олих, Пинчуктинң жумысларында [2,3]. Ультрасес толқынлары тәсирине дейинги φ_b -динң мәниси хәмме диодлар ушын (0.730÷0.750) эВ қа, ал n –ниң мәниси (1.06÷1.08) ға тең еди. Жоқарыдағы келтирилген физикалық шамалардың өлшениуі дәллиги n хәм φ_b лар ушын сәйкес ± 0.01 хәм ± 0.004 эВ ты курайды. n ниң бирге жақын мәнислери дерлик рекомбинацион-генерациялық процесслердинң сезилерли емес дәрежеде екенлигининен дерек береди (бул жерде тоқтың мәниси нәзерде тутылған). Ультрасес тәсиринен кейин n хәм φ_b физикалық шамаларының өзгериуі үлкен емес. $W_{US=(1\div 2)}$ Вт/см² кууатлыққа ийе тәсирде φ_b ның мәниси шама менен ~ 0.010 эВ қа артады хәм n шамасы 0.02 ден үлкен емес мәниске кемийди. Тәсир етиуі кууатлылығын $W_{US>2.5}$ Вт/см² шекем арттырғанда, жоқарыда келтирилгенлерден улыуа басқаша өзгерислер алынды. Атап айтқанда, φ_b шамасы 0.0150÷0.030 эВ қа кемиди, ал n шамасы 0.02÷0.03 мәнисине артатуғынлығы корсетилген. Бул жерде соны айтып өтиуі керек, ультрасестинң тәсиринен кейин Шоттки диодларында ВАХ кери шақабына тәсири айтарлықтай үлкен болды. $W_{US<2.5}$ Вт/см² да өзгерислердинң характери дәслепки, яғный ультрасес тәсирине шекемги, кери токтың I_R шамасына ғәрезли болып қалады. Киши токқа ийе диодлар ушын ($I_R < 10^{-7}$ А, $U_R = 2$ В) I_R динң 1÷2 мәнисине ультрасестинң артыуы нәтийжеси жүз береди (1.2.1-сүүретти қараң, 1 хәм 2 иймекликлер); екинши группадағы, яғный кери токлары үлкен ($I_R > 2 \cdot 10^{-7}$ А) диодлар ушын, ультрасес толқының тәсири I_R шамасының 10-500 есе азайыуына алып келди (1.2.1-сүүрет, 3 хәм 4 иймекликлер).



1.2.1-сүўрет. Вольт-амперлик характеристиканың кері шақабы. (1,2) иймекликлер 1-ши группа диодлар ушын хәм (3,4) иймекликлер 2-ши группа диодлар ушын орынлы. 1 хәм 3 иймекликлер ультрасес тәсирине дейин, ал 2 хәм 4 иймекликлер ультрасес тәсиринен кейин $W_{US} \approx 1.8 \text{ Вт/см}^2$.

Бизлердиң пикиримизше вольт-амперлик характеристиканың акустикалық тәсир нәтийжесинде өзгерислери хәр қыйлы диодлардың дәслепки ҳалындағы тосқын арқалы өтиўши токлардың механизмлери менен байланыслы екенлиги атап көрсетилген. Мейли дәслеп 1-ши группа диодларын, яғный $I_R(U_R)$ полулогарфимлилик ғәрезлилиги туўры сызықтан ибарат диодларды қарап өтейик. Бундай ғәрезлилик ток өтиўдиң туннельлик механизми ушын орынлы. Себеби Падовани-Стреттон теориясына [4] сәйкес есаплаўлар соны көрсетеди, изертленип атырған структурада майданлық (полевая) хәм термомайданлық (термополевая) эмиссия тек ғана $T < 10 \text{ К}$ да үлкен рол ойнайды. Сонлықтан берилген жағдайда токтың өтиў механизми жоқарыда айтылғаннан басқаша болыўы керек. Мәселен, [4,5] жұмысларда көрсетилгениндей тийкарғы емес

(избыточный) ток тасыўшылар терең орайлардың дизбеги бойынша электронлардың аўысыўы арқалы анықланады. [5] Тағаевтың докторлық диссертация жумысында көрсеткеніндей, бундай дефектлер дислокациялар болыўы мүмкин. Бул жағдайда ВАХ төмендеги қатнаста жазылады: [5,6]

$$I_R = I_0 \exp\left(\frac{qU_R}{\xi}\right) \quad (1.2.2)$$

бул жерде I_0 көпшилик жағдайда терең қәддилерди пайда етиўши дефектлердің концентрациясы менен, ал ξ -дефектледің түри менен анықланады.

Екинши группа диодлары ушын U_R дан $\ln I_R$ ғәрезлиги полулогарфимлилик үлкен емес аўысыўларда ($U_R < 2.5$ В) сызықлы емес (1.2.1-сүўрет, 3-иймеклик), тек ғана $U_R > (3 \div 3.5$ В) да туннельлик механизм орынлы болады. Басланғыш орын аўысыўларда экспериментальлық берилгенлер төмендеги ғәрезлилик пенен аппроксимацияланады.

$$I_R = I_0^1 \exp\left(aU_R^{1/4}\right) \quad (1.2.3)$$

I_0^1 - хәм a – берилген турақлы шамалар. Бундай $\ln I_R \sim U_R^{1/4}$ ғәрезлилик ток өткеріўдің термоэмиссионлық механизми ушын характерли [7], I_R ниң үлкен абсолют мәнислери ярымөткізгіштің шегерасында энергетикалық халлардың бар болыўы менен, сондай-ақ металл-ярымөткізгіш контактинің бир тексизлиги менен де анықланады [8].

Ультрасес толқынлары тәсири жәнede $I_R = f(U_R)$ ғәрезлигиниң характерине тәсирин тийгизеди. Биринши группа диодларында U_R -дың үлкен емес мәнислеринде (< 2 В) ультрасеслик тәсирлерден кейин термоэмиссионлық процесслер, ал екинши группа элементлеринде туннельлик процесслер U_R -дың бир қанша киши мәнислеринде ($\ln I_R$ хәм U_R арасындағы сызықлы ғәрезлилик) байқала баслады (1.2.1-сүўрет, 2,4 иймекликлери).

Ультрасес толқынлардың үлкен қуәатлықтағы тәсирлерінде ($W_{US} > 2.5$ Вт/см²) еки группа диодлары үшін I_R шамасының мәніси 1÷2 дәрежеге артты хәм де термоэмиссиялық механизмнің үлеси көбейди.

f_{US} артыуы менен биз бақлап атырған өзгерислер бурынғысынша қалды, тек ғана олардың санлық характеристикалары 10% этирапында өсти.

Бундай бақлаған өзгерислерди төмендегише түсиндириу мүмкин: Ультрасес толқынлардың тәсирінде: 1) еки материал шегерасында бир тексизликтің биртеккликке келиуі [9,10] хәм усының нәтийжесінде екинши группа диодларының I_R шамасының сезилерлик дәрежеде кемейиуі; 2) ярымөткизгишлердің қалыңлығы бойынша киргизилген қоспалардың қайта бөлистирилиу процессинің [11] болып өтиуі хәм усының нәтийжесінде металл-ярымөткизгиш шегерасында энергетикалық қәддилердің өзгериуінің биринши группа диодларының I_R шамасына тәсири өзгереді, бул өз гезегінде еки группада да n хәм φ_b шамаларының өзгерисине алып келеди. Қуәатлылықтың басланғыш мәніслерінде ярымөткизгиштиң көлемінде хәм бетлик областында Заверюхин Б.Н., Заверюхина Н.Н., О.М.Турсункуловлардың көрсеткениндей [12], дефектлердің генерациясы басланады структураың бөлиниу шегерасында дефектлердің қайта бөлистирилиуі жүзеге келип, бул φ_b кемейиуіне хәм n артыуына алып келеди. Бир ўақыттың өзінде диод арқалы термоэмиссиялық тоқ хәм I_R артады.

Солай етип, бул жұмыста биринши мәрте Au-TiB_x-n-n⁺-GaAs Шоттки диодының вольтамперлик характеристикасына ультрасес толқынларының тәсири изертленген. Ультрасестің ВАХ тың туўры шақабшасына карағанда кері шақабшасы тәсир етиуі эффекти жоқары екенлиги анықланды. Әсиресе ВАХ-тың пробой обласына, сондай-ақ ультрасес толқынларының тәсири тоқ өткериудің механизмине байланыслы: туннельлик механизм ўақтында ультрасес толқынларының тәсири I_R артыуына, ал термоэмиссиялық механизмде I_R дің кемейиуіне алып

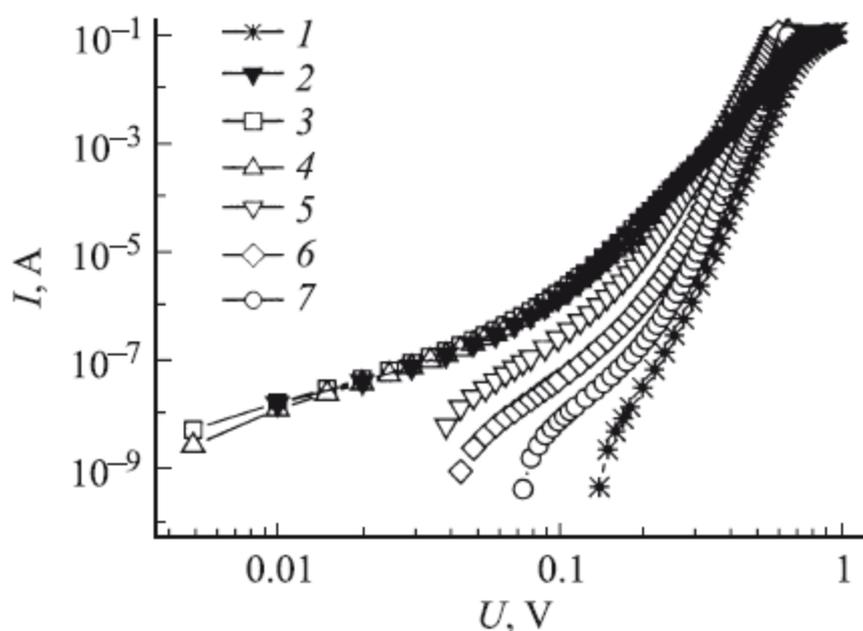
келеди. Соны да айтып өтиў керек ультрасеслик қайта ислеў структураның характеристикасының биртеклигиниң жоқарылаўына (2.1-сүүретте көрсетилгениндей) алып келеди.

$$I_T = I_T \left[\exp\left(\frac{eu}{KT} - 1\right) \right] \quad (1.2.4)$$

Бул жерде I_T -тойыныў тогы деп аталып ол төмендегише анықланады:

$$I_S = I \left(\frac{D_p}{h_p} P_n + \frac{D_n}{L_n} n_p \right) \quad (1.2.5)$$

Бул жерде U-p-n-өткелге түсирилген кернеў, L_n , L_p - лар сәйкес диффузия узынлықлары. D_n , D_p - сәйкес диффузия коэффицентлери; P_n , n_p - тийкарғы емес ток тасыўшылардың концентрациялары.



1.2.2-сүүрет. Au-TiB_x-p-n⁺-GaAs структурасы ушын кери ток шамасының гистограммасы. 1- ултрасес тәсирине дейинги хәм 2,3,4- ультрасес тәсиринен кейинги

Әдебиятларда көрсеткениндей [5,6] сыртқы тәсирлердин нәтийжесинде анығырақ айтқанда радиация, лазер, ультрасес толқынлары хәм тағы басқа да сыртқы тәсир нәтийжесинде дефектлердин өз-ара

тәсирлесийи энергетикалық уровенлердин хәм қадаған етиў зоналарының өзгериўине сәйкес тийкарғы емес тоқ тасыўшылардың өзгериўине улыўма диод арқалы тоқ ағысының өзгериўине алып келеди (ВАХ-ның аўысыўында) сонлықтанда әдебиятларда көрсетилгениндей бул өзгерислерди есапқа алыў мақсетке муўапық деп есапланылады [13].

Әдетте р-п-өткелдеги тойыныў тогы I_s -тийкарғы емес тоқ тасыўшылардың концентрациясы менен анықланады. Сонлықтанда дифференциалланған объектте, қадаған етиў зонаның өзгермеўи, kT -ның өзгериси менен барабар болады, мине усы жағдайда тоқ сыртқы тәсирге сезгир функция болып табылады.

Сәйкес электронлы тоқ, сыртқы тәсир нәтийжесинде төмендегише анықланады:

$$I_P^{(e)} = \left(\frac{\mu_n \tau_{n0}}{\mu_{n0} \tau_n} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{KT} \right) \quad (1.2.6)$$

бул жерде I - р-п-өткелдеги дәслепки тоқ,

Сондай – ақ көпшилик Шоттки диодларында жоқарыда айтылғанындай тоқ ағысының өзгериси сыртқы тәсирге сезгир болады.

Бизин жағдайымызда тоқ тасыўшылардың тийкарғы механизми термоэмиссиялық тоқ болып есапланады хәм оның тығызлығы төмендегише анықланады:

$$j = AT^2 \exp\left(-\frac{e\phi_B}{KT} \right) \cdot \left(\exp\left(\frac{eU}{KT} \right) - 1 \right) \quad (1.2.7)$$

Бул жерде U-диодтағы кернеў, ϕ_B -потенциаль барьердин бийиклиги (металл менен ярим өткизгиштин шығыў жұмысының айырмасына тең болған), А-Ричардсон турақлысы хәм ол төмендегиге тең болады:

$$A = 4\pi e m_n K^2 / h^3$$

Әдебиятларда көрсетилгендей тоқ тасыўшылардың бет арқалы рекомбинация хәм генерациясы себебинен реал диодларда жоқарыда айтылған кемшиликлерге байланыслы вольт-амперлик характеристика

идеаль жағдайдан аўысады. Кристалл структураларда дефекттиң бар болыўы ямаса пайда болыўы менен көп физикалық эффектлерди түсиндириўге болады, мысалы деформацияланған орында система бузылған (напряженный) ҳалда болып ол өз гезегинде электрофизикалық параметрлердиң өзгерисине алып келеди, яғный ишки механикалық кернеўди пайда етеди [13].

М.Б.Тағаев хәм Байымбетовлардың [5,14] жумысларында ультрасес толқынларының дислокацияға тәсирин үйренилген. Бундай акустикалық метод структураның бетин бузбайтуғын методлар қатарына жатып басқа методларға салыстырғанда ультрасеслик толқынлар менен қатты денелерди қайта (обработка) ислеўде үлкен артықмашылықларға ийе болады. Атап айтқанда структураны бузбай эпиўайы, арзан баға жолы менен ярым өткизгишли материал хәм ярым өткизгишли таяр эсбапларды қайта ислеў мүмкиншилигине ийе болатуғынлығы көрсетилген.

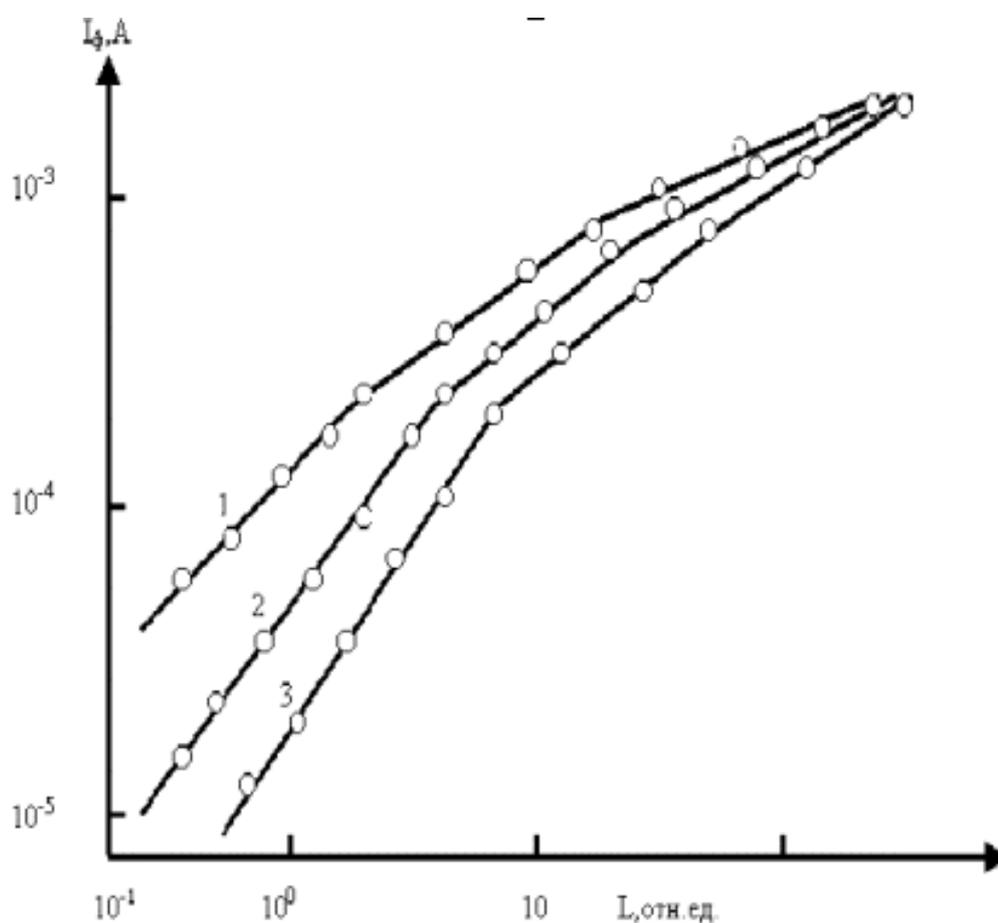
Бул метод жәрдеминде илимий басшым М.Б.Тағаевтың илимий жумысында кремнийден таярланылған $p^+ - p - n - n^+$ -диодлы структураларға ультрасес толқынларының тәсирин үйренип хәм оның тәсири нәтийжесинде автордың жумысларында көрсетилгениндей структурадағы дефектлерди базыбир муғдарда кемейтиўге болатуғынлығы көрсетилген.

Сонлықтанда ультрасес толқынларының қатты денелерге тәсирин, жоқарыда айтылған кемшиликлерди сапластырыў мақсетинде кеңнен қолланылады

Ярым өткизгишли эсбапларда реал жағдайда $2 \cdot 10^7$ Па басым муғдарында сырттан тәсир болған жағдайда сәйкес A^3B^5 группадағы бирикпелерде механикалық қысылыў есабынан, жыллылық кеңейиў коэффициентиниң хәр қыйлы болыўы есабынан хәм тағы басқада дефектлердиң пайда болыўы есабынан ярым өткизгишли эсбаплар тезирек деградацияланады яғный сапасын жоғалтады.

Жоқарыда айтылғанларға уқсас A^2B^6 группасындағы ярым өткизгишли материалларға ультрасес толқынларының тәсирин атап

айтқанда Н.Е. Корсунскаяның жұмысында CdSe монокристалына ультрасес толқынларын тәсир еткенде акустикалық хәм оптикалық характеристикаларының тәсири нәтийжесинде фотоөткізгішлік азаятуғынлығы көрсетілген, сәйкес хәр түрлі кернеуде сызылмада көрсетілгениндей жағдайда, салыстырмалы қарсылығы $\rho = 10^7 - 10^9 \text{ ом}\cdot\text{см}^{-1}$ тең болған жағдай үшін CdSe монокристалына ультрасес толқынларының тәсири көрсетілген. Ультрасес толқынларының жийлиги $f = 200 \div 500 \text{ Гц}$. Жәнеде бұған қосымша люкс-амперлік характеристикасыда қарастырылған: 1.2.3-сұуретте $T=300^\circ\text{К}$ температурада люкс-амперлік характеристикасы көрсетілген. Бул сұуретте көрсетілгениндей фототок ультрасеслік толқынларының тәсири нәтийжесинде кемедей.



1.2.3-сұурет. Кадмий күкирт материалы үшін люкс-амперлік характеристикасы

Сызылмада көринип турғанындай дәслеп $\alpha = 1$ яғный сызықлы люкс-амперлик характеристика орынлы болады, ал соңынан $\alpha < 0,5$ болып тойыныу тоғы байқалады.

Жоқарыда айтылғанларға уқсас Р.А. Муминовтың жұмыстарында $\text{Si}\langle\text{Li}\rangle$ таярланған детекторларда электр майданының биртеккли емес бөлистирилиуінде ультрасестин тәсиринин үлкен екенлиги үйренілген.

Солай етип Р.А. Муминовтың жұмысында көрсетилгениндей 1.2.4-сүүретте λ -ның, $2/E$ ге байланыслылығы сызықлы емес, екенлиги көрсетилген яғный буннан сондай жуўмақ шығарыуға болады $\text{Si}\langle\langle\text{Li}\rangle\rangle$ детекторда примеслердин локаль жыйындысы есабынан электр майданының бир теклиги бузылады деп түсиниуе болады, ал бул өз гезегинде тоқ тығызлылықларының локалласқан областларын пайда етеди яғный тоқ бир текли емес бөлистириледиди. Тоқтың рабочий область бойынша бир текли емес бөлистирилиуи өз гезегинде ярым өткизгишли материал хәм сол материалдан таярланған таяр ярым өткизгишли эсбаплардың ертерек истен шығып деградацияланыуына алып келеди. Сонлықтанда бундай машқалаларды үйрениу хәм оны сапластырыу ярым өткизгишлер электроникасында хәм микроэлектроникасында тийкарғы мәселелердин бири болып табылады.

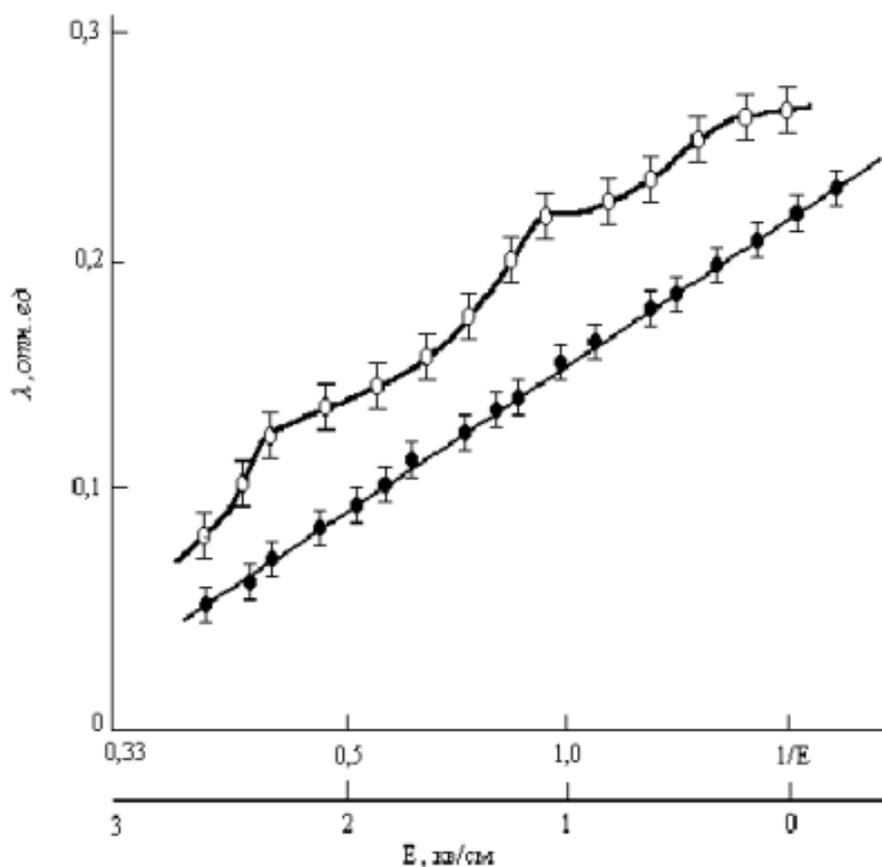
1.2.3-сүүретте де көрсетилгениндей дефектлар менен байланыслы болған электрлик актив хәр қыйлы центрлар (орайлар) пайда болады.

Бул пайда болған қосымша орайлар донорлы -D хәм акцепторлы -A орайлар қосымталардың локаль жыйындысының есабынан пайда болып, ол 1.2.4-сүүреттин II-интервал аралығында көрсетилгениндей өз гезегинде λ -ның кемейип $\lambda (1/T)$ өсиуине алып келеди.

Р.А.Муминовтың жұмысында кварцлы түрлендиргиш жәрдемінде ультрасестин $\text{Si}\langle\langle\text{Li}\rangle\rangle$ детекторға тәсирин үйренген, генератордың тербелис жийилиги $5 \div 25$ өзгерген, уақыт аралығы 8 саат, 200 В кернеуде.

Бул жұмыстада жоқарыда келтирилген үлкен масштабтағы дефектлерди хәм олардың локаллы жәмлесиуин ультрасестин жәрдемінде

сапластырыўға болатуғынлығы келтирилген. Гарягдиевтың жумысында A^2B^6 -группасында ярым өткізгішли материаллардың, механикалық электрлик, фотоэлектрлик хәм люминесцентлик характеристикаларына пьезокермикалық түрлендиргіш жәрдеминде ультрасес толқынларының тәсирин үйренілген. Бул авторлардың пикири бойынша CdS хәм CdS_xS_{3-1-x} кристалларына ультрасес толқынларын тәсир еткенде точкалық дефектлер хәм дислокациялар менен эффектив тәсирлесіўи нәтийжесинде A^2B^6 -группаларындағы кристалларда гетерирования (патаслықтан тазалаў) процессиниң орынланатуғынлығы көрсетилген. М.К.Шейкманның [1] түсиндириўи бойынша гетерирование деген бул – изертленип атырған объекттиң рабочий областын дефектлерден тазалаў дегенди аңлатып ол төмендегише болыўи мүмкин:



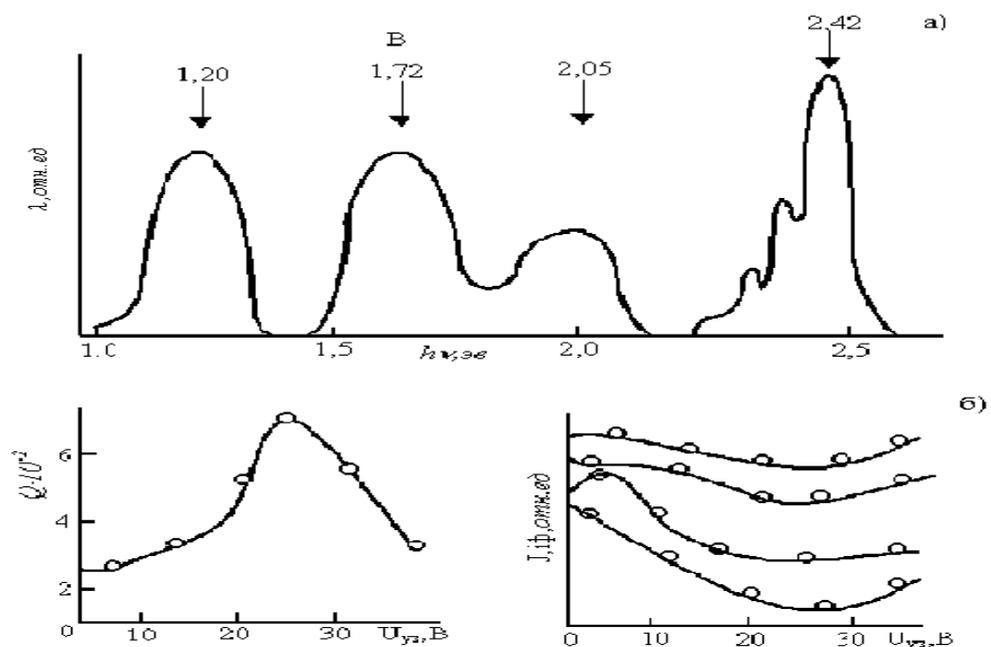
1.2.4 -сүүрет. Зарядтың азайыўының электр майданының кернеўилигине байланыслылығы

Әдетте диод технологиялық таярлаў уақтында структуралық бир текли емес система формасында болады. Усындай диодлы структураға

ультрасес толқынлары тәсир еткенде диодлы структурадағы бир текли емес орынға ультрасес толқынлары эффектив жутылады деген пикирлер бар. Нәтийжеде дефектлердің орын алмастырыу процесси жүзеге келип, бул процесс өз гезегинде дислокациялар менен өз ара тәсирлесип дефектлердің аннигиляциясы (бир-бирин жоқ етиу процесси) болыуы мүмкин ямаса дислокацияның актив областтан актив емес областқа – мысалы бетке қарай жылжыу процесси болыуы мүмкин. Фотосезгирликти характерлеуши параметр $M = \mu\tau$ -үлкейгенлиги, жақтылықты сезгирлигиниң турақлылығы улыуа CdS хәм $\text{CdS}_x\text{S}_{1-x}$ кристаллында фотосезгирликтің еки дәрежеге үлкейгенлиги көрсетилген.

Кейинги уақытлары ультрасес толқынларының тәсири менен бир қатарда кең көлемде лазер нурларының тәсирлериде үйренилмекте. Атап айтқанда М.К.Шейкманның жұмысларында да [15] ультрасестің тәсири менен бирге лазер нурының қатты денелерге тәсирин, анығырағында дефектли структуралардың фотолюминесцентлик характеристикаларына лазер нурының тәсири үйренилген.

Т.В.Торчинская хәм М.К.Шейкманның жұмысларында ультрасес толқынларының тәсиринде фото-люминесцентлик жолақлардың интенсивлигиниң кемейгенлигин (терең энергетикалық қәддилердің бар болыу есабынан пайда болған) сондай-ақ фототоктың кемейтилгенин тәжрийбеде көрсеткен, жәнеде соның менен бирге ультрасес толқынының тәсири нәтийжесинде акустикалық сызықлы тербеліслердің резонанслық қәсийетлериниң артқанлығы байқалған. Акустикалық добротность деп аталатуғын бул параметр сызықлы тербеліслердің резонанслық методы менен М.К. Шейкманның жұмысында [1] анықланған. Бул еки жағдайда төмендеги 1.2.5 -сүўретлерде көрсетилген.

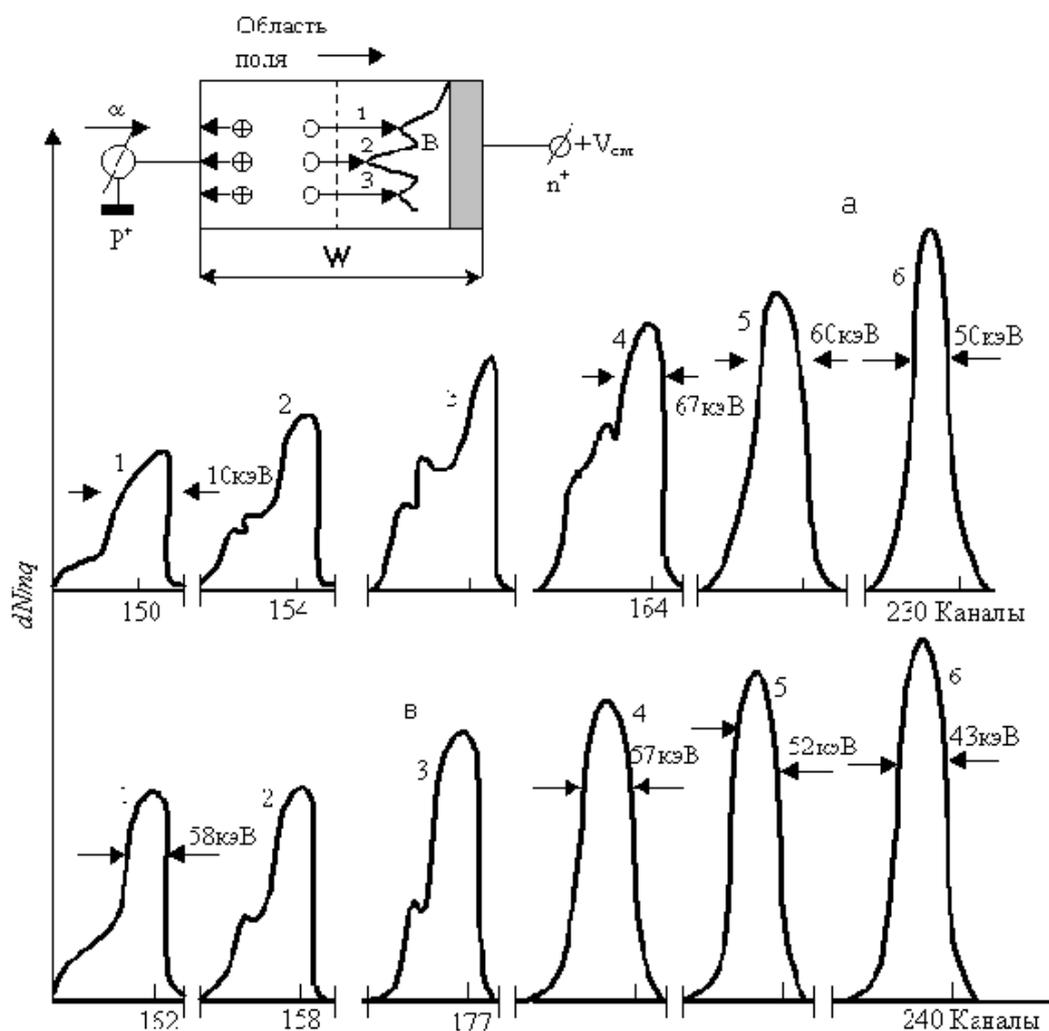


1.2.5-сүүрет. Кадмий күгирт монокристалында акустикалык добротностиның кернеўге байланыслығы а) хэм примесли сызықлардың фотолуминесценсиясының б) кернеўге байланыслығы

Сүүретте көринип турғанындай акустикалык добротности хэм фототок, ультрасес толқынларының амплитудасына – CdSe монокристаллына түсирилген электр кернеўине байланыслы екенлиги мәлим. 1.2.5-сүүретте көрсетилгениндей акустикалык добротности дәслеп үлкейеди, соның менен ультрасес кернеўи белгили бир мәниске жеткенде 1-акустикалык добротность максимум мәниске жеткенде кристалл структурада атомлардың жайласыў тәртиби тәртиплескен яғный дефектлер тығызлығы азайды деп түсинийге болады.

1-максимум мәниске жетип, соң кемейе баслайды, бул кемейиў меншикли дефектлердиң генерациясынан деп түсинемиз. Демек ультрасестиң үлкейиўине алып келип хэм олардың аннигиляция етилиў итималлығы болыўы мүмкин. Дислокация дөгерегиндеги точкалык дефектлердиң концентрациясының көбейиўине алып келип хэм олардың аннигиляция етилиў итималлығы болыўы мүмкин. Бундай дефектлердиң аннигиляциясы В.Г.Литовченко, Н.Л.Дмитруктың илимий жумысларында

дәслеп радиациялық сыртқы тәсірлерде де байқалған. Оптимал радиациялық доза $10^6 \div 10^8$ Р. ге тең екенлиги көрсетілген.



1.2.6 - сүүрет. Кадмий күкүрт монокристалына ультрасес толқынларының тәсири

Сондай-ақ 1.2.6-сүүретте ишки сүйкеліу коэффициентиниң ультрасес толқынының амплитудаға байланыслылығы көрсетілген (T=300K температурада).

Әдетте әдебиятларда келтирилгениндей, бул жерде де (1.2.6 -сүүретте көрсетилгениндей) η -ишки сүйкеліс коэффициентиниң киширейіуи, дәслепки ўақытлары $U_{yc}=20V$ шамасына сәйкес, структурадағы дефектлердин кемейіуи менен түсиндириледі. Демек киши интенсивликке ийе ультрасес толқынларында ишки сүйкеліс коэффициентиниң хәм қосымша примесли хәм қосымта люминесцентли (сызықлардың

күшшилигинің) полосалардың интенсивлікке азаятуғынлығын көрийге болады.

Усының менен бир қатарда ультрасес толқынларының тәсири туннельли диодлардың шумлы хәм вольт-амперлик характеристикаларына қалай тәсир ететуғынлығыда үйренілген.

Бул жұмыстада ультрасес толқынларының тәсиринен соң вольт-амперлик характеристикасын өлшегенде тийкарғы емес тоқ тасыўшылардың муғдары хәм шумның уровеннинің кемейгенлиги көрсетилген. Автордың түсиндирийи бойынша бул жоқарыдағы айтылған жағдай точкалық дефектлердің концентрациясының кемейгенлиги менен түсиндириледі деп жуўмақластыра отырып автор төмендегіше механизмлердің болыў итималлығын айтқан:

1. Қурамалы сызықлы дефектлер яғный дислокациялар дөгерегіндеги точкалық дефектлердің азайыўы ямаса басқаша сөз бенен айтқанда гетерировать очищение (тазаланыўы) мүмкин, яғный бул механизм бойынша, дислокация дөгерегінде киши размердеги точкалық дефектлер жыйналысып, ультрасестің тәсири нәтийжесінде, көлемнен (рабочий областтан) бетке шығарылыўы мүмкин, ямаса электр өткізгішлікке қатнаспайды. Нәтийжеде тийкарғы емес тоқ тасыўшылардың муғдары хәм шум азаяды. Демек ярым өткізгішли эсбапларда ВАХ-да (кери бағыттағы) тоқтың муғдары азайып сапасы жақсыланады.

2. Екинши бир болжаў бойынша ультрасес толқынларының тәсири нәтийжесінде точкалық дефектлердің көлемнен (рабочий областтан) диффузиясы ямаса дрейфи. Демек бул механизмнің мағанасы сонан ибарат ультрасестің тәсири нәтийжесінде примеслердің диффузиясы тезлестіриледі. Ал бул өз гезегінде дефектлердің қозғалыўшаңлығын үлкейтип нәтийжеде дефектлердің рабочий областтан бетке шығыўына себепши болады. Бул жерде соны қосып айтыў керек энергия активациясы өзгеріп диффузионлы механизмнің болыў итималлығы көбірек болады дегенди аңлатады.

3. Үшінші болжаудың мәнісі соннан ибарат ультрасес толқынларының тәсири нәтижесінде точкалық дефектлердің қайта зарядланыуы мысалы арсенид-галлийден таярланған p-n-өткелли тунелли диодларда электр майданы үлкен болады шама менен 10^6 В/см, ал бул өз гезегінде бундай үлкен майдан, деффектлердің жылжыуына алып келеди яғный бул ионизацияланады дегенди аңлатады. Мине усы ўақытта сәйкес орайлардың (энергетикалық уровенлердин) қайта зарядланыу итималлылығы үлкен болады. Демек ультрасес толқынының тәсиринде пайда болған заряд дәслепки дефект пенен байланыслы зарядка қарама-қарсы белгиде болса, олар диполь хызметин атқарып электрөткизгишликке қатнаспайды.

4. Төртінші бир болжау М.Б.Тағаевтың докторлық диссертациясында көрсетилгениндей кремний хәм галлий арсенид материалларында да жоқарыда айтылған механизмлерге уқсас илимий нәтижелер алынған хәм бул жерде дефектлердің жайласуу тәртиби, саны анық көрсетилген хәм белгили бир диапазон аралығында дефектлердің санының азайып соның менен бирге тийкарғы емес тоқ тасыушы зарядлардың муғдарының кемейгенлиги көрсетилген, оның дәлили ретинде вольт-амперлик характеристиканың кери бағыттағы тоқтың кемейгенлигин лавинно-пролетлы диодларда көрген.

§1.3. Арсенид галлий материалында лазерлик отжиг арқалы контакт алыу

Магистрлик диссертация жұмысының мақсети соннан ибарат үлкен қарсылыққа ийе арсенид галлий материалына лазерлик отжиг усылы арқалы индий материалын отырғызыу болып табылады. Усынылған методтың мақсети үлкен температурада омлық контактты формировать етиу болып табылады. Бундай үлкен температурада ислесию ярымөткизгишлер технологиясында үлкен әхмийетке ийе хәм қыйын мәселелердің бири болып табылады, себеби ярымөткизгишли

материаллардың айрықша қасиетлерінің бири температураның артыуы менен электрлік қасиетлердің өзгеріп барыуында. Демек усы уақытларды электр потенциалы образецтің бағытында сызықлы өзгеріп сәйкес ток тек көлемлік зарядлардың қарсылығы менен байланыссы болып қалады. Олай болса омлық контактағы болатуғын өзгеріс, көлемге тәсірін тийгизбеуі керек. Әдетте хәм көлемлік хәм контактағы бетлік зарядлар бир уақытта электрөткізгішлікке қатнасып өзіннің оң ямаса теріс тәсірін тийгизиуі мүмкін. Ал [4, 5] жұмыстағы көрсетілген идея соннан ибарат бул метод ярымөткізгішли эсбаптар жаратыуда ямаса микроэлектрониканың басқада элементтерін жаратыуда үлкен әхмийетке ийе методлардан болып табылады.

Хәзирги уақытта омлық контактты көпшилик жағдайларда $Sn-Ge-Au-Au-Ge-Ni$ ямаса $Pd-Ge$ материаллардың қатламларынан термикалық пууландыруу жолы менен таярлайды. Әдетте бундай технология бир неше қурамалы болған технологиялық этаптарды өтиуди талап етеди.

Енди бизің қәнийгелик питириу жұмысымызда қарастырылып атырған хәзирги лазерлік технология бир қанша артықмашылықтарға ийе, артықмашығы соннан ибарат материалдың бетинің стехиометриясының өзгеріси басқа методларға салыстырғанда кем болады, мысалы ток утечки кем болады, омлық контакт сыртқы тәсірлерге шыдамлы болады.

Әдебиятлардан көргениміздей [6] ионлы имплантациядан соң кристаллық структурасын өз қаддине келтириуде оптимальный метод ретінде кишкене қууаттылыққа ийе импульсли лазерлік отжит қолланылады. Себеби үлкен қууаттылыққа ийе импульсли лазерлік отжиглар ярымөткізгіштің бетинде стехиометрия сыпатын өзгертип жиберіуі мүмкін. Нәтийжеде ол материалдан таярланған ярымөткізгішли эсбаптың сапасы төмен болады хәм ол ертерек истен шығады.

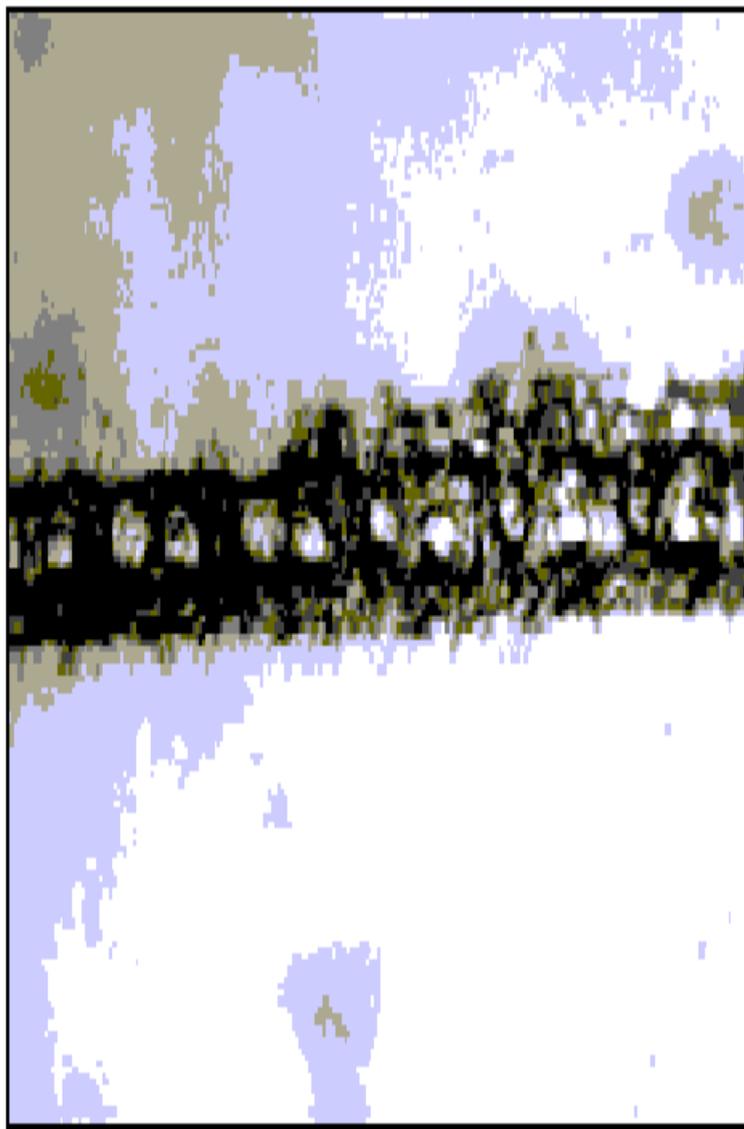
Арсенид галлий ярымөткізгіш материалына омлық контакт ретінде индий материалын алғандағы мақсет төмендегіше бір қанша өзгешеліктерге ийе мысалы $Au.Ge / Ga As$ материалынан айрықша өзгешелікке ийе болып индий изовалентли примести дүзип, тийкарғы материалларда дислокация тығызлығын кемейтүүге себепши болады. Нәтийжеде зарядлардың өзгерисиниң (ағысының) сапасының жақсыланыуына себепши болады. Бул ярымөткізгішлер электроника хәм микроэлектроникасының тийкарғы әхмийетли мәселелериниң бири болып табылады.

Атап айтканда $I_n / Ga As$ типтеги омлық контакт $AuGe/GaAs$ типіндеги сыяқлы өзиниң $n+$ областқа кері тәсирин тийгизбейди. Демек бул жағдайда молекуляр-нурлы эпитакция жағдайдағыдай плавный переход хасыл етиледі. Бундай плавный переходларды бурын Казлаускене, Кажукаускас хәм тағы басқалардың жұмыстарында алынған [7].

Бул айтылған жұмыстардың көпшилигинде үлкен температурада алынған, ал бизиң анықланып атырған жұмысымызда лазерлик отжиг жағдайы менен омлық контакты алыу методлары көрсетилеген. Солай етип бул метод төмен температурада индийдиң ериуин лазер арқалы тәмийинлеуіге болатуғынлығы көрсетилген.

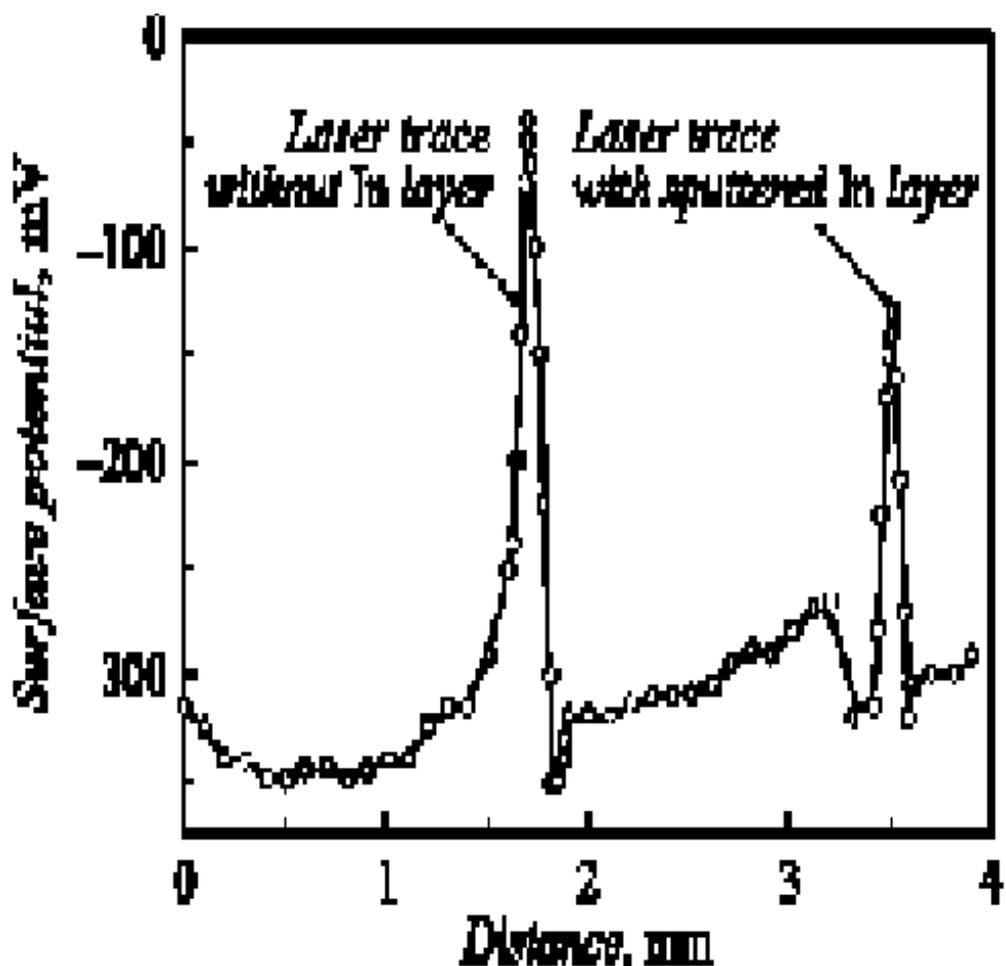
Әдебиятлардың көрсеткенинде индий жетерли дәрежеде беккем, сыртқы тәсирлерге шыдамлы материал болып есапланады. Әсиресе алтын хәм германий ортасында контактқа келтириуіши тийкарғы материал ретінде кеңнен қолланылатуғын материалдан болып табылады.

1.3.1-суўретте галлий арсенид материалына индийди лазерлик отжиг усылы менен отырғызғаннан кейинги бетиниң көриниси. 50 нм қалыңлықта индий қатламын отырғызғаннан кейин механикалық беккемлигин тәмийинлеуі мақсетинде алюминий қатламы отырғызылады.



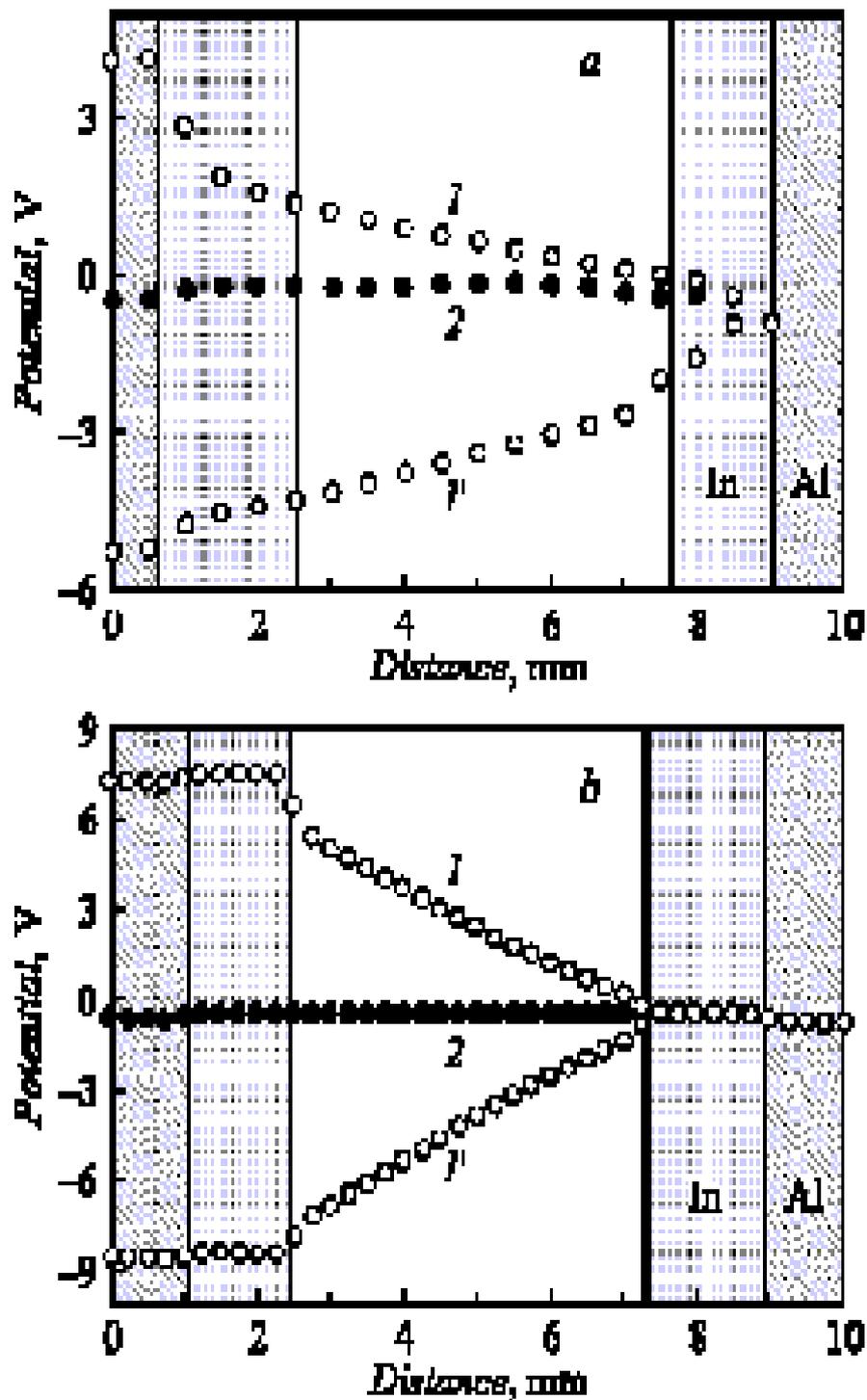
1.3.1-сүўрет. Арсенид галлий материалының бетиниң морфологиясы.

Сәйкес усы ўақытлары бетлик потенциалдың өзгериси 1.3.2-сүўретте көрсетилген. Суўретте көрсетилгениндей лазерлик отжиг усылы менен индийди отырғызған ўақытларымызда потенциал барьер бийиклиги киширейеди.



1.3.2-сүүрет. Арсенид галлий материалына лазерлик нурландырыў усылы менен индийди отырғызған уақытлары бетлик потенциалдың бөлистирилиўи

1.3.3-а хәм б суўретлерде көрсетилгениндей арсенид галлий материалына индийди термикалық пуўландырыў хәм импульсли лазерлик қайта ислеў усыллары нәтийжелериниң көриниси көрсетилген. 1.3.3-сүүретте көрсетилгениндей термикалық пуўландырыў жолы менен алынған жағдайда галлий арсенид материалы менен индий арасында контакта барьер пайда болады, ал ол өз гезегинде вольтамперлик характеристикаға кери тәсирин тийгизеди. Екинши жағдайда, яғный 1.3.3 б- сүүретте көрсетилгениндей лазерлик отжиг усылында арсенид галлий материалы менен индий шегарасында биринши жағдайға салыстырғанда жақсырақ болады.



1.3.3–сүүрет. Арсенид галлий материалының бетине термикалық усылда а) хәм лазерлик нурландырыў усылы менен (б) индийди отырғызған уақытлары бетлик потенциалдың бөлистирилиўи

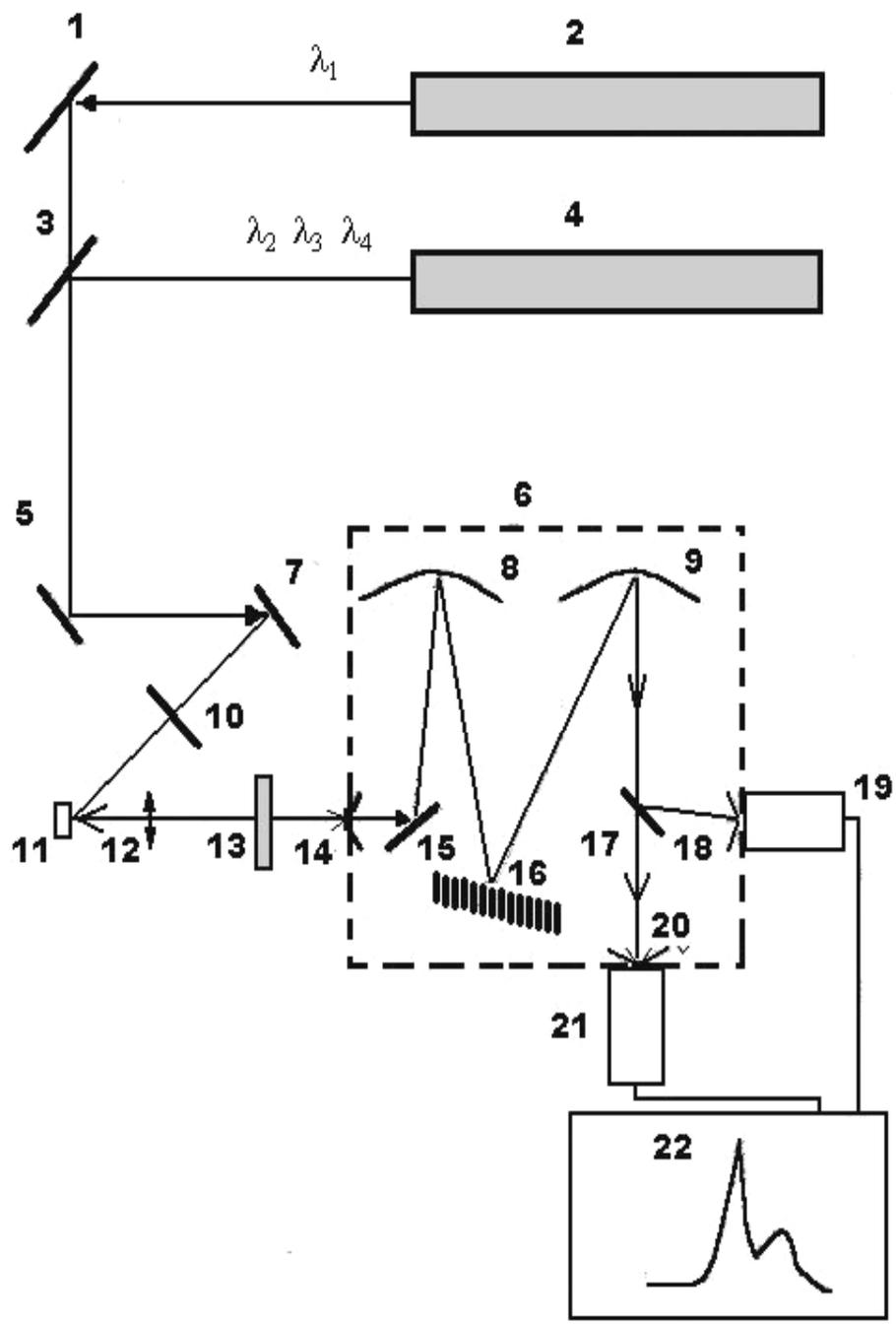
Солай етип, бул метод жәрдеминде алынған омлық контакт басқа термикалық усылларға салыстырғанда анағурлым артықмашылыққа ийе екенлигин көриўге болады.

II Бап. Эксперимент методикасы

§2.1. Ярымөткізгішлі материаллардың электрофизикалық қасиетлерін изертлеуде қолланылатуғын приборлар

Эксперимент қойыу үшін арналған бизің қурылмамыз тийкарынан төрт бөлімнен турады: рекомбинациялық нурланыуды пайда етиуші лазерлерден криостаттан, монохроматордан хәм регистрациялаушы қурылмадан турады. Бул қурылманың блок-схемасы 2.1.1-сүўретте көрсетілген.

Ипульсли лазер тийкарынан хәр қыйлы толқын узынлығына ийе нурларды өзінен шығарады (көк, жасыл, фиолетовый х.т.б.). Лазерди қоспастан бурын оны суўытып турыушы кранды ағызып қойыуымыз керек, егер крандағы суўдың ағымы әстен болатуғын болса лазерди қосыуымызға болмайды. Себеби, лазер қызып тез истен шығыуы ямаса күйип кетиуі мүмкин. Суўдың хызметі бул лазердің газлы трубкасын суўытып турыу болып суў аркалы газлы трубка қоршалған болады. Суў трубкасы еки параллель шлангадан турады. Биринши шлангадан краннан суўық суў келип газлы трубканы суўытады, ал екинши шлангадан ислетілген қызған суў шығарып тасланады. Лазер менен ислесиу ўақтында суў ағып турған шлангаларды сыртынан ўақыты-ўақты менен ушлап турыуымыз керек. Егер шлангалардың екеуінде қызып кеткен болса онда суўдың айланысы жоқ екенін билдиреди. Демек бул суўды жоқарыға газлы трубкаға айдаушы насостың ислемегенін билдиреди. Насостың ислеуі үшін насос багинде барлық ўақытта диссоацияланған суўдың муғдары сақланып турыуы керек. Суўдың аз ямаса көплигин биз бактиң айнасы аркалы билимизге болады, Егер суўдың муғдары көрсетілген қызыл сызыктан төмен болса онда насосды қосыуымызға болмайды. Аргонлы лазердің хәр қыйлы қуўаттылықтағы ислеуін тәмийинлеу үшін лазер блогинде трубканың анод катодларына берилетуғын токтың муғдары көрсетілген болады.



2.1.1-сүүрет. Эксперимент құрылмасының блок-схемасы

Бул берилиўши ток щитке тутастырылған болады. Лазерге тийисли блок каробкасына ток басқарыўшы рукятка бар болады, усы рукаятка аркалы токтың шамасын көрсетиўши амперметр аркалы токтың қәлеген муғдарын бериўимизге болады. Берилетуғын токтың шамасы 12 амперден 24 амперге шекем жетеди. Киши ток аркалы ислегенимизде лазердиң 6-7 саатлап толық ислеўине исениўимизге болады. Себеби, суўдың ағыў тезлиги үлкен болғанда бундай токтың қуўатлылығында лазердиң қызып кетиўи мүмкин емес. Егер токтың шамасын 18 амперден жоқары токта лазер менен жұмыс алып баратуғын болсақ онда хәр 10-20 минуттан суў келиўши хәм суў кетиўши шлангаларды услап тексерип турўымыз керек. Егер лазер қызып кетсе тез истен шығады. Лазердиң бир толқын узынлығынан екиншисине өтиўи ушын газлы трубкадан пайдаланамыз. Газлы трубканың бир ушында кишкене арнаўлы ключ сыятуғын саңлақ болады. Усы саңлақ аркалы ключ пенен лазердиң шығыўшы толқн узынлықларын өзгертиўимизге болады. Дал максимал иреңдеги нурды алыўымыз ушын лазердиң иреңине тийисли нурланыў шыңын (нурланыў пикин) табыўымыз керек. Лазерден шығыўшы нурдың иреңиниң өзгериўи дегенде газлы трубкадағы ҳар қыйлы ионланыў дәрежесиниң өзгериўин түсинсек болады. Лазердиң суўытыў үскенесиниң лазердиң ток пенен тәмийинлеўши үскенени қосқанан кейин 10-15 минуттан соң автомат түрде газлы трубканың өзи қосылады хәм де 3-5 минийттан соң қәлеген токтың муғдарын берсек болады. Усы жоқарыдағы айтылған ўақыт ишинде лазер өзиниң ислеў дәрежесиндеги температураға ийе болады. Лазерди өшириўде дәслепп токты минимал мәниске шекем қайтарып алып соңынан газлы трубканы ток бөлегинен ажратамыз. Газлы трубкаға келип турған суўдың температурасы параллель газлы трубкадан шығып турған суўдың температурасына теңлескен ўақытта лазерди толығы менен өшириўимизге болады.

Гелий-неонлы лазер бул 5000 саат жұмыс ислеў ўақтына тийкарланып исленген. Бул лазер менен ислескенде дәслепп лазерди токқа тутастырып

15-20 минут өткеннен соң лазердің трубкасын іске түсіреміз. Гелий-неон лазери 220 Вольттық әпiуайы ток дерегине жалғанады. Бул лазердің максималъ шығаратуғын толқын узынлығы (қызыл ирендеги) $\lambda = 632 \text{ нм}$ болып есапланады. Бул лазер аркалы қадаған зонасы киши болған ярымөткизгишлер материалларды қоздырады.

Криостат. Ярымөткизгишли квантлы ямалардың, квантлы точкалардың нурланыў рекомбинациялары хәм шағылысыў спектрлери $4,2^\circ \text{ К}$ нен 300° К температуралары аралығында изертленеди. Бундай температуралық диапазонларда изерлеў жүргизиў ушын криостаттың үш түри қолланылады.

1. $4,2^\circ \text{ К}$ нен 100° К ге шекемги температуралар областында еки хәр қыйлы типтеги металл криостатлар (КР, 15) қолланылады. Бундай криостатлар бир-биринен өзиниң төменги бөлими аркалы айрылып турады. Криостаттың төменги бөлими дегенде криостаттың ишки ыдысына кепсерленген яғный суўытыўшы суйықлылык қуйылатуғын (гелий, азот, водород) бөлимин түсинсек болады. Биринши типтеги криостат ишки ыдысқа мыстан исленген стержень хлдопровод кепсерленген болады. Оның шлиповка етилген бетине гүмис паста аркалы үлгимиз орналастырылады. Криостаттың төменги бөлимінде үш тегис параллель кварцтан исленген диаметри 40 мм ге тең болған айнасы бар болады. Биринши айнасы аркалы қоздырыўшы фотолюминесценция жақтылығы ал қалған еки айнасы аркалы үлгиден нурланған рекомбинациялық нурлар шығады. Бундай исленген конструкция үлгиниң тегис бетинен рекомбинацияланыўшы нурланыўды алыўға мүмкиншилик береди. Термопара гүмис паста аркалы үлгиге бекитиледи. Термопараның мыс, константан хәм алтын-мыс түрлери қолланылады. Алтын-мыс термопарасы 80° К температурадан киши температурада жүдә жақсы характеристиканы береди. Сонлықтанда 80 К ге шекемги температурада алтын-мыс $(\text{Au} + 3\% \text{ Fe}) - (\text{Cu})$ термопарасы қолланылады. Термопараның электр қозғаўшы қушин (ЭҚК ин) өлшеў ушын тұрақлы ток

потенциометри R 306 қолланылады. Прибордың нольлик режими иретінде вольтлық сезгирликтеги $0,3 \cdot 10^{-6} B / дел$ гальванометр қолланылады. Температураның дәл өлшениуі $T \approx 1^\circ K$ тең болады. Биринши типтеги криостат бир қанша кемшиликлерге ийе болады. Бул криостатда $13^\circ K$ температурадан киши үлгиниң температурасын алыу мүмкин емес. Қоздырыудың интенсивлигиниң хәр қыйлы муғдарда өзгериуі менен үлгиниң температурасы өзгерип отырады. Усыған тийкарланып бундай криостатда өлшенген ямаса алынған спектрдиң формасы бирден еки фактордың тәсири менен хәр қыйлы болып өзгерип отырады: Температура хәм қоздырыу интенсивлигиниң өзгериуі. Бундай тәсирлерди айырым уақытлары айыруу мүмкин емес. Соның менен бирге бундай криостатда үлгини өзгертиу жүдә көп уақытты алады. Тәжрийбе уақтында үлгини өзгертиу мүмкин емес. Екинши криостаттың түринде ишки ыдысқа мыстан исленген өткериуши трубка кепсерленген болып ол трубка кварц стаканы менен тамаланған болады. Мыс, кварц өтиуі тат баспайтуғын полат хәм инваровой дөңгелек компенсатор аркалы пайда етиледі. Стаканның түбиде инвардан таярланған болады. Инвар-кварц тутасып $200^\circ C$ темеперутурада аралдид аркалы клейлеу жолы менен иске асырылады. Трубка жоқары сапаңа ийе оптикалық кварцтан таярланған болып келип турған нурларды, шығыушы нурларды шашыраушы нурлардың интенсивлигин пәсейтирмейтуғын айна болып есапланады.

Сууыттырыушы суйықлық стаканға толтырылады. Үлги болса криостаттың суйықлық куйыушы трубкасы аркалы усы стаканға түсириледі. Суйықлықта турған үлгини атмосфералық басымда услағанымыз ушын тәжрийбе уақтында үлгини тез өзгертиуимизге болады. Үлгилеримиз сууытыушы суйықлық пенен барлық уақытта байланыста болғанлықтан $4,2^\circ K$ де, $20^\circ K$ де, $77^\circ K$ температуралардағы спектрлерин регистрирлеуимизге болады. Нурландыруу интенсивлигин эксперимент уақтында елиу ирет өзгертсекте үлгиниң температурасы турақлы болып калады, максимал қууаттылықта үлгиге түсетуғын нурлар

үлгинің бетін өзгерте алмайды. 77°К температурадан 300°К температурада нурланыў спектрлерин изертлегенимизде оптикалық кварцтан исленген криостат қолланылады.

Кварцлық дюардың төменги бөлиминде үш тегис параллель айнасы болады. Криостаттың бундай түріндеде үлгинің барлық ўақытта суўытыўшы суйықлық пенен байланысы болады.

Монохраматор. Ярымөткизгишлердин нурланыўының рекомбинациялық спектри мүмкин болғанынша қысқа хәм интенсивлиги киши болған спектрлерден турады, сонлықтанда жақтылық күши үлкен болған монохраматордан пайдаланамыз. Бизлердин берилген жумысымызда MDR-23 монохраматор қолланылды. MDR-23 монохраматорының жақтылық күши призмалық монохраматорларға қарағанда бир неше есе күшли болады. Монохраматордың саңлағынан шығыўшы жақтылықтың ағымы төмендегише анықланады.

$$\Phi = \beta_{\lambda} \tau_{\lambda} (\Delta \lambda)^2 \frac{h}{f} S \frac{d\varphi}{d\lambda} \quad (7)$$

бунда β_{λ} -деректиң монохраматорлық жақтыртылыўы, τ_{λ} - монохраматордың жиберий коэффициенти, $\Delta \lambda$ -монохраматордың шығыў саңлағының спектраллық кеңлиги (монохраматорларда кирий саңлығының өлшеми шығыў саңлығының өлшеминен тендей етип алынады). Монохраматордың жақтылық күши жақтылық ағымының Φ шығыў саңлағындағы мәниси менен анықланылады, егер $\beta_{\lambda} = 1$ хәм $\Delta \lambda = 1$ болғанда.

$$L = \tau_{\lambda} \frac{h}{f} S \frac{d\varphi}{d\lambda} \quad (8)$$

Жоқарыдағы формулада диффракциялық решетканың тәсир етийши диафрагманың шамасы менен байланысы есапқа алынбайды. Бул байланысты есапайтуғын коэффициентлер бирге тең болып есапланады.

Монохраматорларда дисперциялық элемент иретинде диффракциялық решетка қолланылады. Монохраматорларға кирий

саңлағы алдында КС 19 фильтри қойылады хәм фильтр арқалы қоздырыўшы нурларды усланып калынады.

Монохроматордан шыққан оптикалық нурлар (ФЭУ-62 ФЭУ-100) фотоэлектрик күшейткиш арқалы күшейтилген электр сигналарына айландырылады. Жоқарыдағы сүүретте көрсетилгениндей схемада ең соңында электрон есаплаў машинасы арқалы биз интенсивликтин толқын узынлығына байланыслы графигин аламыз. Фотошағылысыў спектрлерин өлшеген ўақтымызда дерек ретинде аргонлы гелий-неон лазер менен бирликте ДРШ-250 лампаларында қолланылады.

Гетероструктуралардың қурамына кириўши теллурид-цинк оптоэлектрониканың ең ахмийетли материалларының бири болып есапланады. Оның қадаған зонасының ени ($E_g=2,26$ эВ 300 К температурада) ол жеке ҳалында киши өлшемли материалларда барьер есабында қолланылады [6-7]. Бул материал GaAs-арсенид галлий подложкасына хәр қыйлы эпитаксиялық метод арқалы өсириледи. Бул гетероструктураның ең бир әхмийетли жеке термикалық хәм қалдық кернеўлерге тийкарланған характеристикасы оның дифформацияланыўы болып есапланады. Бизиң барлық квантлы ямаларымыз хәм квантлы точкаларымыз молекуляр пучковой эпитаксиал методы арқалы “Катунь” установкасында өсирилди. Бул курылмада молекуляр пучкалардың белгили бир системасы қайта исленип хәм оларда эквивалент басымда турақлы усланып турады. Пленкаларды өсириўде хәр қайсысы жеке дереклер арқалы парланыў жолы менен өсириледи. GaAs-арсенид-галлий подложкасының бети дәслеп тәбийғый окислерден тазаланады. Соңынан (100) ориентациясында 3° ийилиў менен $\langle 110 \rangle$ бағытында $570^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ға шекем подложканы қыздырып $250^\circ\text{C} - 280^\circ\text{C}$ температураға шекем подложка суўытылады. Усы процесслер өткеннен кейин Ga_2Te_2 бирикпесин пайда етиў ушын цинк парында узақ ўақыт услап турылады. ZnTe-Тиллурид-цинк пленкасының пайда болыўы усы температурада болады. Тез қозғалыўыш электронлар диффракциялық электронлар

картинасында стержень формасынан рефлекслердің пайда етилгеннен кейін яғный 100 нм қалыңлықта эпитаксиал структура өсирилгеннен кейін подложка температурасын 320-350°C температураға шекем усланып турыўы керек. Бундай гетероэпитаксиал қатламның өсирилиў тезлиги 0,2 нм/с тең болады. Жеке дереклерден келип турған (молекуляр пучкалардан шығыўшы) Zn цинк хәм Te₂ теллурдың эквивалент басымы алынғаннан соң өсип киятырған пленканың реконструкциясы C(2x1)+(2x1) түринде алынады. Моноқатламларға кириўши CdTe кадмий-теллур пленкасында молекуляр пучкавой эпитаксия методы менен алынады.

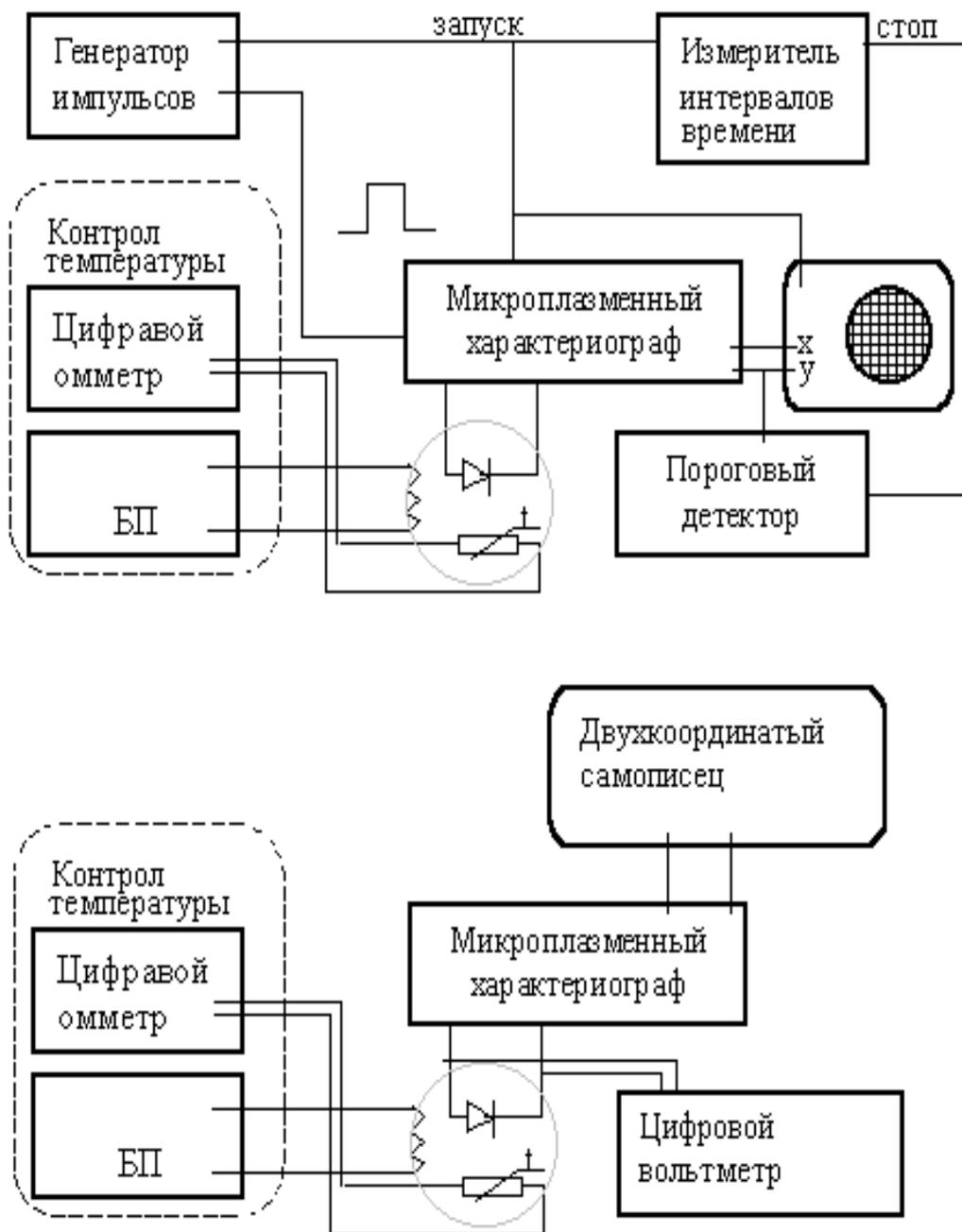
Ярымөткизгишлерде хәм изоляторларда металларға қарағанда заряд тасыўшылардың концентрациясы турақлы болмайды. Кристалларда электрон хәм геўиклердің (тең салмақлы хәм теңсалмақсыз) жоқ болып кетиўи ямаса аннигиляцияланыўи рекомбинация деп аталады. Электрон хәм геўиклердің рекомбинациясы нурланыўсыз болыўыда мүмкин (рекомбинация ўақтында бөлинип шыққан энергия кристаллдың элементар қоздырыўына генерациясына кетеди). Электрон хәм геўиклер рекомбинациясының нурланыўды пайда етиўи де мүмкин (бөлинип шыққан барлық энергия жақтылық кванты ретинде нурланады).

§2.2. Микроплазмалы характериограф жәрдеминде модуляциялық дифференциаллау методикасының айрықша өзгешелигі

Характериограф "Модель-2" өтиу токларын изертлеу модели "Фарада", осциллографлар, санлы сыйымлылық көпірлері, спектр анализаторы, электромагниттер, фотоэлектрлік эффекттерде фотолюминесценцияны изертлеу үшін ЖСВУ-23, Specord 75 UR оптикалық әсбаптар, рентген структуралық изертлеулер үшін қурылмалар, оптикалық әсбаптар. Изертлеу объектері булар ярым өткізгішли кремнийли хәм арсенидгаллийли материаллар хәм СВЧ әсбаптар, олар тийкарында стабилитронлар. Модуляциялық дифференциаллау методикасының жәрдеминде дефекттердің жайласуы тәртібин анықлай отырып, дефекттердің геометриялық размерлері тууралыда мағлыұматқа ийе бола аламыз. Әдетте әдебиятлардың көрсетиуі бойынша, атап айтқанда Грехов, Сережкин хәм Т.Я.Пуритислердің көрсеткеніндей [2,21-23] дефекттер менен байланыслы болған ток тығызлығының жәмлескен орны микроплазма деп аталады.

Бул методика тийкарынан жоқарыдағы айтылғандағыдай микроплазмаларды анықлауға есапланылған. Сонлықтанда бул методиканы “микроплазмалы характериограф” деп атаймыз.

Микроплазмалы характериограф 2.2.1 - сүүретте көрсетилгениндей ярым өткізгішли структураларды хәм сол структура тийкарында исленген әсбаптардың (силовой диодлардың, куұатлы транзисторлардың, тиристорлардың) сапасын болжауда ең бир үлкен әқмийетке ийе методикалардың бири болып табылады. Жәнеде соны айтып өтиу керек, оптикалық методикадан айрықша өзгешелигі соннан ибарат бул методика жәрдеминде структураны ямаса сол структура тийкарында исленген ярым өткізгішли әсбапты бузбай болжау (диагностировать өтиу) мүмкиншилигине ийе бола аламыз [22].



2.2.1-сүүрет. Микроплазмалы характеристографтың блок схемасы. Бунда а)-осциллографтың жәрдеминде вольт-амперлик характеристиканы өлшеу үсылы, б)-самописец жәрдеминде вольт-амперлик характеристиканы хэм оның пробой участкасы алдында дифференциаллау үсылы көрсетилген.

Микроплазмалы характернограф методы ярым өткізгішли структуралардағы локаллық микроплазмалық пробой кубылысына тийкарланып микроплазмаларды характерлеуде жүдә әхмийетли параметр болған қосылыў (включение) кернеўи, микроплазмалардың жайласыў тәртиби, қарсылықлары хәм геометриялық размерлери туўралы мағлыўмат алыўға мүмкиншилик береди. Микроплазмалы характернограф жәрдемінде жоқарыда аты аталған ярым өткізгішли диод хәм диодлы структуралардың электрофизикалық параметрлерин анықлаўда хәм хәр қыйлы сыртқы тәсирлер жәрдемінде жақлаўда керек болған тийкарғы методикалардың бири болып табылады.

Әдебиятлардың көрсетиўинше атап айтқанда Россиялы илимпазлар Грехов, Сережкин, Украиналы илимпазлар Р.В.Конакова, Ю.А.Тхорик, Прибалтика илимпазлары Т.Я.Пуритислердин көрсетиулерин бойынша ярым өткізгішли диод хәм диодлы структураларда микроплазмалар хәр қыйлы дефектлер менен байланыслы болып р-п өткел бойынша микроплазманың жайласыў тәртиби дефектлердин тийипине байланыслы болады [24]. Жоқарыда аты көрсетилген илимпазлар р-п өткелдин көлеміндеги микроплазмалардың пайда болыўын дислокациялар менен байланыстырған болса, ал соңғы жыллары атап айтқанда Н.Л.Дмитрук хәм М.Б.Тагаевлардың жұмысларында көрсетилгениндей микроплазмалардың пайда болыўы металл менен ярым өткізгіш шегарасындағы бетлик биртексизликлер (рельефлер) мененде байланыслы болады. Атап айтқанда М.Тагаевтың докторлық жұмысында металл менен ярым өткізгіш шегарасындағы бетлик биртексизликлер яғный микрорельефлердин бийиклиги $h > 20\text{нм}$ болған жағдайда микроплазмалық кернеўге күшлирек тәсир етеди яғный пробойлық кернеў киширейип пробой ерте басланады. Ал бул параметр туўралы мағлыўматқа ийе болыў хәм оларды сапластырыў ярым өткізгішлер электроникасында үлкен әхмийетке ийе мәселелердин бири болып табылады.

Жәнеде қосымша соны айтып өтіу керек микроплазманың жайласуы тәртібин, геометриялық размерлерин анықлай отырып микроплазма каналларындағы температура хакқындада толық мағлыұматқа ийе болуыға болады. А.И.Шкретийдің жұмысында көрсетигениндей микроплазма бар жердеги температура санаатта таярланған таяр лавинно-пролетный диодларда шама менен 600К ге шекем жетеди. Демек микроплазманы точкалық жыллылық орайы деп есаплауға болады. Солай етип микроплазма бар жерде тоқ тығызлығы, басқа бир текли жерлерге салыстырғанда анағурлым үлкен болады:

$$T(r, t) = A_s \frac{T_{MM}}{t} \exp \left[- \frac{r^2}{4 \left(\frac{\chi}{C_p} \right) t} \right] \quad (2.2.1)$$

Бул жерде T-температурада, r-актив микроплазмаға шекемги аралық $\frac{\chi}{C_p}$ температура өткизгишлик, A_s -жыллылық өткизгишлик активлигин характерлеуши коэффициент, микроплазманың қосылуы уақтында. Енди микроплазмалардың саны көп болған жағдай ушын

$$T(r, t) = A_s \sum_{i=1}^{j=1} \frac{T_{mni}}{(t - t_i)} \exp \left[- \frac{(r - r_i)^2}{4 \left(\frac{\chi}{C_p} \right) (t - t_i)} \right] \quad (2.2.2)$$

r_i -i- микроплазманың жайласуы аралығы,

t_i -i-ти микроплазманың қосылуы уақты.

Буннан соны керіуге болады j-ши микроплазманың қосылуы моментинде T –температура микроплазманың санына хәм қосылуы уақтының узақ дауам етиу уақтына байланыслы яғный $U < U_j$. Жоқарыда айтылғанындай микроплазманың қосылуы кернеуи, T-ға кери байланыста болады. Солай етип хәр бир микроплазманың қосылуы уақтынының импульстың созылуы уақтына, кернеуіге байланысшылығын биле отырып,

ең бир әҳмийетли процесс болған микроплазмалардың жайласыу аралығын анықлай аламыз. Бул ярым өткізгішли әсбаптарды диагностировать етиуде жудә кеңнен ен жайған методикалар қатарына жатады. Ал бизлердің питириу қәнийгелик жұмысымызда теориялық хәм эксперименталь түрде микроплазма каналларындағы температураны хәм микроплазманың қосылыу кернеуи сыяқлы парметрлерди анықлау менен шекленемиз. Яғный бул методика жәрдемінде вольтамперлик характеристиканы дифференциаллай отырып, хәр қыйлы температураларда $\Delta u(T)$ -байланыслығы анықланады. Усы мақсетте бул методика “микроплазменный характернограф” Украина миллий Академиясына қараслы ярым өткізгішлер физикасы институтында профессор Ю.А.Тхорик хәм профессор Р.В.Конаковалардың басшылығында разработка етилген. $\Delta U(T)$ байланыслылықты анықлау ушын вольтамперлик характеристикасы хәр қыйлы температураларда дифференцияланады. Микроплазманың қосылыу кернеуин анықлау, диодқа түсип атырған импульсли нағрузкадан соң микроплазманың каналларындағы температураны анықлауға мүмкиншилик береді. Пробой кернеуиниң температураға байланыслылығын анықлау ушын резистивный қыздырғыш (нагреватель) қолланылады. Усы мақсетте изертленип атырған р-п өткелге импульсли кернеу қосылады, микроплазма кернеуинен зыят болыуы ушын микроплазманың хәр қыйлы жасау уақты менен – τ хәм буннан соң микроплазманың қосылыу кернеуин өлшеу қайталанады.

Бундай методика жәрдемінде микроплазмалардың жайласыу тәртибин анықлауға хәм олардың базыбир геометриялық өлшемлери тууралы мағлыұмат алыуымызға болады.

Ш-Бап. Экспериментте алынған нәтижелерди талықлау

§3.1. Лазерлик нурландырыудың металл-GaAs контактинин электрофизикалық қәсийетлерине тәсирин изертлеу

Кейинги жылларда ярым өткізгішли материалларды, приборлық структураларды хәм приборларды лазер нурлары хәм микротолқынлық тәсирлер жәрдеминде изертлеуге болған қызығыушылық сезилерли дәрежеде артты [14-16]. Бул болса, ярым өткізгішли эсбаплардағы ишки тәсирлердин (температура, күшли электр хәм магнит майданлары, радиация, аса жоқары жийликтеги нурландырыу х.т.б.) нәтижесинде пайда болатуғын деградацияға алып келиуши механизмлерин изертлеудин жаңа технологияларын табыу менен байланыслы.

Лазерлик нурландырыулардан соң әдебиятларда көрсетилгениндей бир уақытта бир нешше физикалық процесслер болыуы мүмкин, атап айтқанда жыллылық эффекти, фотоэффект, механикалық толқынлардың генерациясы хәм тағыда басқада. Сондай-ақ Шоттки барьерли металл-ярымөткізгішли структуралардың параметрлерине тәсир етиу механизми жыллылық, яки болмаса атермикалық (жыллылық емес) болыуы мүмкин [10-13]. Бизин жағдайымызда температура ондай үлкен болмаған жағдайлар ушын атермикалық тәсир етиу қарастырылады.

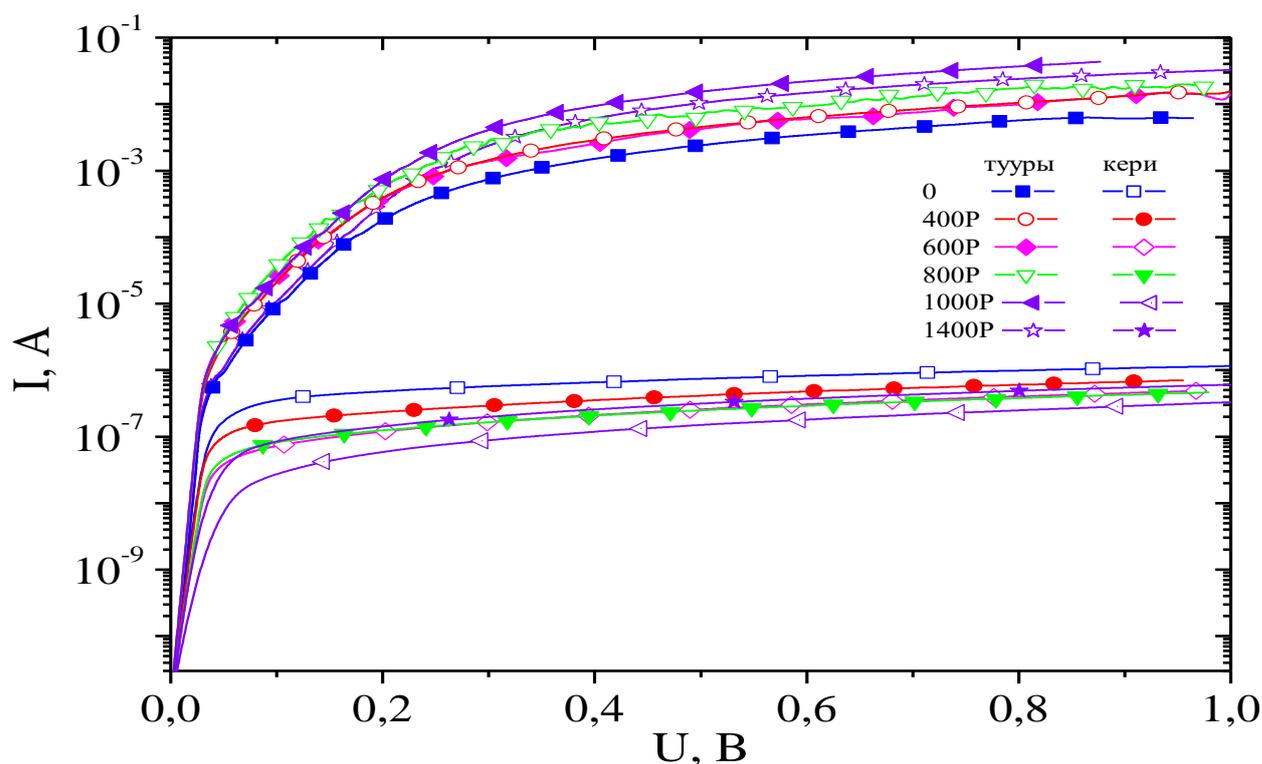
Бул магистрлик диссертация жумысымызда Шоттки барьерли диодлардың вольт-амперлик характеристикасын үйрениу методикасын өзлестириуди, Шоттки барьерли диодлардың вольт-амперлик характеристикасына лазер нурының тәсирин үйрениуди хәм диодлы структуралардың параметрлерин жақсылау ушын лазер нурының тәсирин хәм оптимал эффектив муғдарын анықлауды мақсет етип алдық.

Изертлеу объектимиз ретинде арсенид галлий тийкарында таярланған аса жоқары жийликте ислеуши приборлар технологиясында кеңнен қолланылатуғын Шоттки барьерли Pt-n-n⁺GaAs структурасын таңладық.

Жұмысымызда нурланыў тығызлығы критикалық мәністен киши болған хәм интенсивликтеги лазер нурланыўдың Шоттки барьерли арсенид галлийли Cr-n-n⁺-GaAs диодлы структураға тәсириде изертленди. Cr-n-n⁺-GaAs диодлық структура n-n⁺-GaAs ның алдын-ала химиялық жақтан тазаланған ысытылмайтуғын сыртына ~1.3 мм диаметрли маска арқалы ~80 нм қалынлықтағы хромды шаңлатыў жолы менен алынды. Бул жағдайда диодлы структураның бети $1,3 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$ ды қурады.

Лазер дереги сыпатында 0.69 мкм толқын узынлықтағы рубинли лазер қолланылып, (дақтың бети 10^{-3} см^2 , импульс узақлылығы 40 нс, нурланыў интенсивлиги $P=400-1400 \text{ Вт/см}^2$ аралықта өлшенди).

Диодлы структуралар туўры шақасы өжире температурасында лазерлик ислеўден алдын хәм кейин өлшенди. Оннан барьер бийиклиги хәм идеаллық коэффициенти анықланды.



3.1.1-сүүрет. Cr-n-n⁺-GaAs Шоттки барьерли диодлар ВАХ сының лазерлик нурланыў интенсивлигине байланыслы жағдайдайы туўры хәм кери шақасы

Жоқардағы 3.1.1-сүўретте Cr-n-n⁺-GaAs диодлы структураның лазерлик ислеўден алдын хэм кейин өжире температурасында өлшенген ВАХ ның туўры хэм кери шақасы логарифмлик масштабта көрсетилген.

Төмендеги 1- таблицада туўры шақасынан есаплап шығылған барьер бийиклиги φ_B хэм идеаллык коэффициентини n шамаларының мәнислери келтирилген. 1-таблицадан көринип турғанындай GaAs диодлы структуралар параметриниң лазер нурланыў интенсивлигине байланыслығы монотон характерге ийе, яғный биресе өсип, бир кемейип, және өсип отырады. 400 хэм 600 Вт/см² интенсивликтеги лазер нурландырыўда диодлы структураның параметрлари өзгермейди. Лазерлик нурланыўы 800 хэм 1000 Вт/см² ге арттырыў барьер бийиклиги φ_B кемейип хэм идеаллык коэффициентиниң n артыўы байқалады.

1- таблица

Cr-n-n⁺GaAs Шоттки диодларының лазерлик ислеўден алдын хэм кейин электрофизикалык параметрлери

Параметрлер	Лазер нурланыў интенсивлиги, Вт/см ²					
	Бошл.	400	600	800	1000	1400
$\varphi_B, В$	0.71	0.71	0.71	0.70	0.69	0.71
n	1.13	1.13	1.13	1.15	1.21	1.08
$I_s, А$	$9,8 \cdot 10^{-8}$	$9,2 \cdot 10^{-8}$	$9,0 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5,7 \cdot 10^{-8}$

Шоттки диодларына 1400 Вт/см² нурланыў интенсивлигинде ислеў бериў барьер бийиклигин φ_B дәслепки мәниси салыстырғанда 0,04 ке арттырыўына алып келеди, n шамасы болса 0,08 ге кемейеди. Бунда тойыныў тогының мәниси (Шоттки барьерли бийиклиги сыяқлы) нурланыў интенсивлиги 400 Вт/см² ден 1400 Вт/см² ге өзгергенде монотон өзегереди (1-таблицаны қараң).

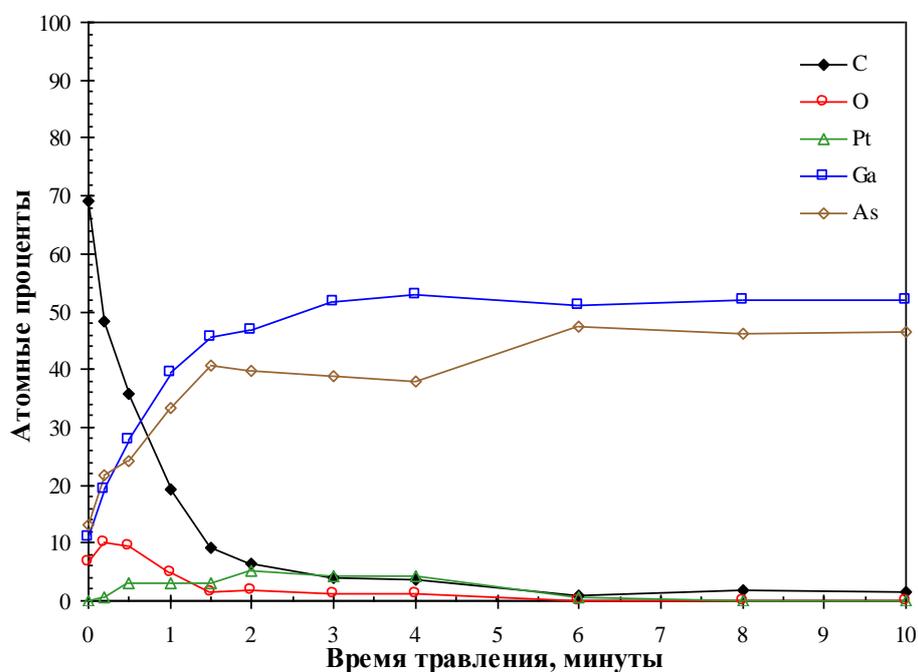
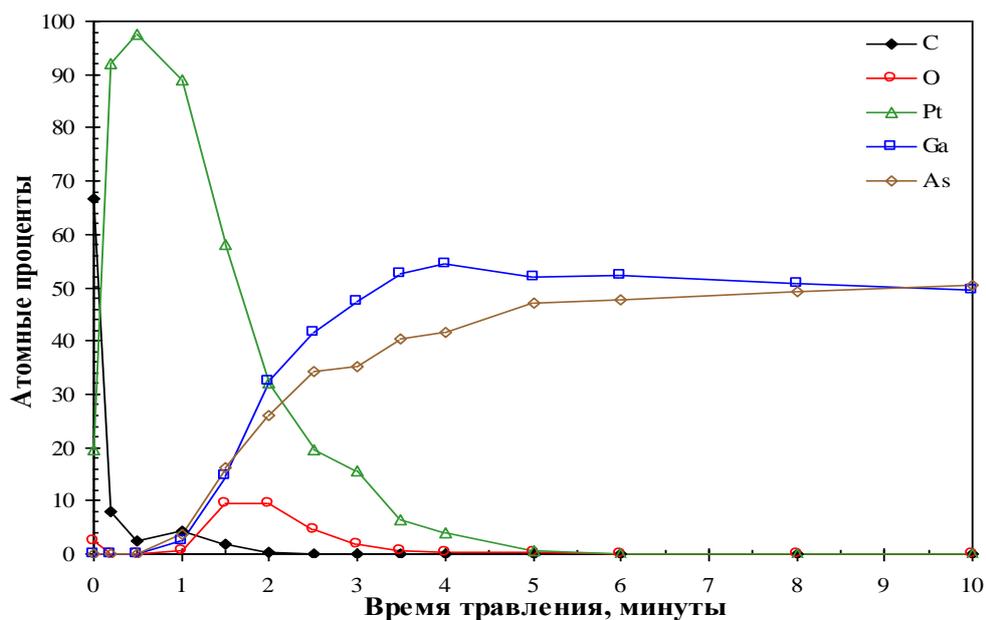
Шоттки барьери параметрлариниң 800 хэм 1000 Вт/см² ли лазер ислеўи байқалатуғын өзгериси, Cr-GaAs бөлиниў шегерасындағы галлий хэм

алтын күкирт оксидлеринен ибарат оксид пердениң бузылыўы хәм GaAs контакт алды бөлиминде донорлар менен (олар сыпатында меншикли дефектлер болыўы мүмкин) байытылған жуқа қатламның пайда болыўы менен байланыслы болыўы мүмкин. Бул жағдай ϕ_B барьер бийиклигинин кемеиўине хәм n шамасының артыўына алып келеди.

Лазерлик нурландырыў интенсивлигинин 1400 Вт/см^2 ге арттырылыўы контакт алды бөлиминде акцептор болған алтын-күкирт вакансиялары менен байытып контакт алды қатламның кейинги модификациясына калып келеди, яғный бул қатламда инверсия типиндеги өткизгишлик пайда болады. GaAs контакт алды бөлиминде бундай модификациясы барьер бийиклигинин ϕ_B артыўына хәм идеаллық коэффициентини n -нин кемеиўине себеп болады.

Аса жоқары жийликте нурландырыў обработкасы $f=2,45 \text{ ГГц}$ жийликли хәм шығыўшы қуўатлылығы 160 Вт (салыстырмалы қуўатлылығы $\sim 1,5 \text{ Вт/см}^2$) болған магнетронда өткерилди. Аса жоқары жийликтеги нурландырыўға шекем хәм аса жоқары жийликтеги нурландырыўдан кейин вольтамперлик характеристикалар (ВАХ) өлшенилди сәйкес 3.1.2-сүўретте көрсетилгениндей. Лазер нурларының тәсир етиў қуўатлылығы сәйкес $(\lambda \approx 1,06 \text{ мкм}, \tau = 20 \text{ нс}, 400-800 \text{ Вт/см}^2)$ интервал аралығында болды.

3.1.2-Сүўретте көрсетилгениндей көрсетилген диапазон аралығында лазер нурының қуўатлығы артыўы менен вольт-амперлик характеристика жақсыланады. Демек тойыныў тоғы азаяды, туўры бағыттағы вольт-амперлик характеристикада көрсетилгениндей, Шоттки диодының барьер бийиклиги үлкейеди, кери бағыттағы тоқтың муғдары азаяды. Вольт-амперлик характеристикада көсетилгениндей Шоттки диодының лазер нуры менен тәсир етилгеннен соң жоқарыда келтирилген параметрлер арасындағы паркының азайғанын көриўге болады.



3.1.2-сүўрет Pt-*n-n*⁺GaAs структурасында лазер нуры тәсир еткеннен соңғы Оже-профилиниң көриниси (а) -дәслепки ҳәм (б) лазер нуры тәсир еткеннен соңғы ($P \geq 1000 \text{ Вт/см}^2$, $\phi = 20 \text{ нс}$, $\lambda = 1.06 \text{ мкм}$).

Атап айтқанда төмендеги 2-таблицада көрсетилгендей, n и ϕV параметрлердиң жақсыланғанын көрийүге болады.

Pt-n-n⁺GaAs Шоттки диодының электрофизикалық параметрлеринің лазер нуры тәсир еткеннен соңғы көриниси

Параметрлер	Лазер нурланыў интенсивлиги, Вт/см ²			
	Исх.	400	600	800
φ_B, B	0.75	0.78	0.79	0.84
n	1.25	1.22	1.17	1.13
I_0, A	$2.7 \cdot 10^{-9}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-10}$	$8 \cdot 10^{-11}$

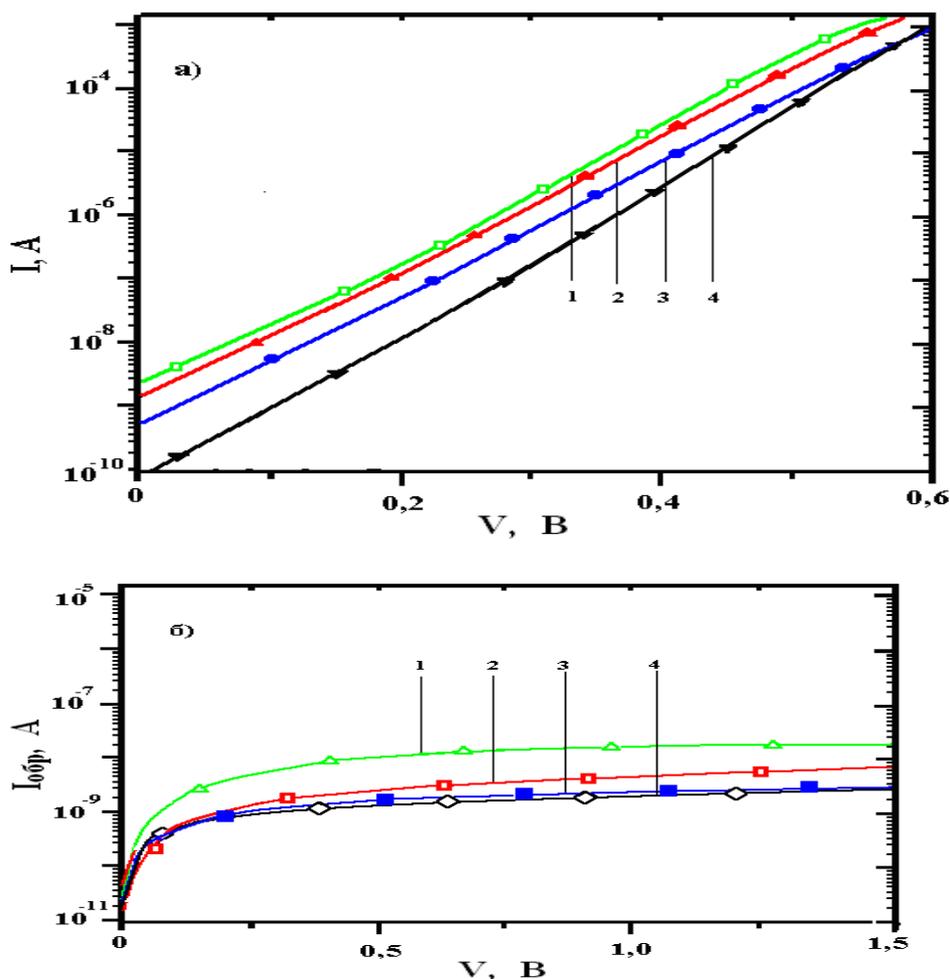
Вяткин Воронковлардың жұмысларында [17] көрсетилгениндей бундай электрофизикалық параметрлердің жақсыланыў процессии Pd-GaAs тийкарындағы Шоттки диодларында байқалған сәйкес лазер нурының толқын узынлығы 1.06 мкм, тәсир етиў уақты 10^{-3} с, қуўатлығы 20-60 Дж/см². тең болған жағдайда. Әдетте күшли легирленген p^+ -катламда платина арсенид галлий материалында акцепторлы характерге ийе қосымта болып қатнасады [18,19].

$$\varphi_B^I = \varphi_B + \frac{qN \cdot a^2}{\epsilon_s} \quad (3.1.1)$$

Бул жерде p_1 - акцепторлық қосымталардың концентрациясы, жиңишке қатламдағы. a -бул қатламның толшинасы, ϵ_s -диэлектрик турақлысы.

(1) формулада көрсетилгениндей, $p_1 \cdot a^2$ көбейтиндисиниң үлкейиўи менен φ_B^I үлкейеди.

Демек, барьер бийиклигиниң үлкейиўи платинаның арсенид галлий материалына өтип шегаралық областта жиңишке P^+ қатламды пайда етиўи менен байланыслы екен.



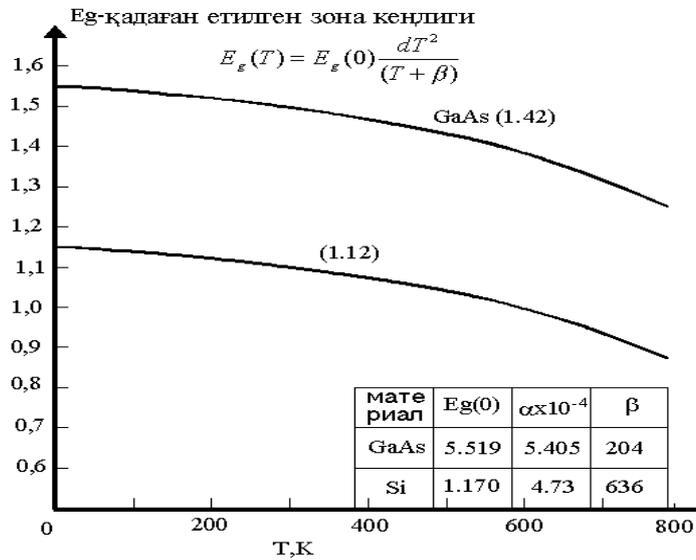
3.1.1-сүүрет. Pt- n - n^+ -GaAs Шоттки диодының P лазерли нурланыўдың қуаттылық тығызлығына байланыслы туўры (а) хәм кери (б) ВАХ-сы: 1-дәслепки; 2-4-сәйкес түрде $P=400, 600, 800 \text{ Вт/см}^2$ –ден кейин.

§3.2. Аса жоқары жиийликте ислейтуғын GaAs тийкарындағы диодлар ушын барьер контактларына қойылатуғын тийкаргы талапларды изертлеў

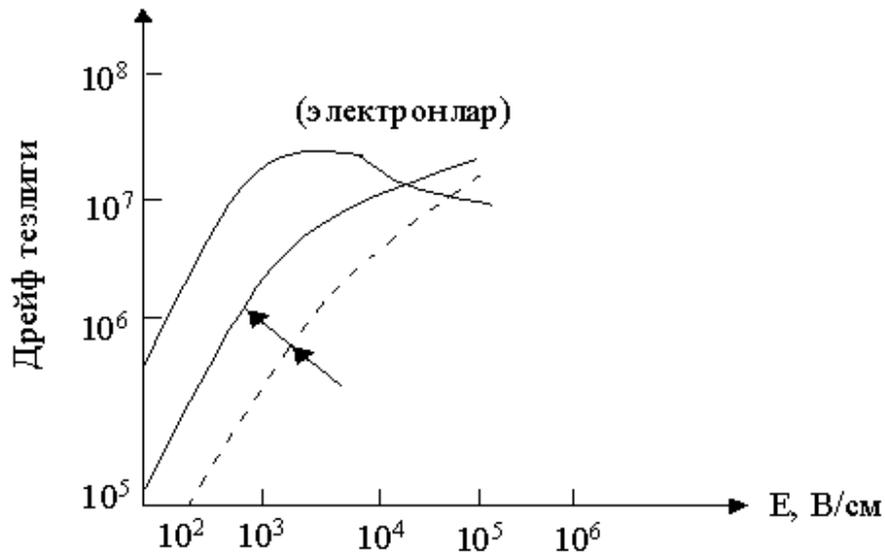
Шоттки барьерли арсенидгалий лавинли пролетлы диодлардың истен шығыў себеплерин изертлегенде интердиффузия хәм көлемли биргеликли емес кубылыслар менен бир қатарда бөлиниў шегарасы дефектлериниң роли сезиледи. Фазалар бөлиниўиниң шегараларының дефектлиги, тийкарынан системада механикалық кернеўдиң бар екенлигине байланыслы болады, олар белгили бир шараятларда дислокация ямаса дислокациялық сеткалардың дүзилиўи менен релаксацияланады, олар

барьерге жақын тұрған областларда дефект пайда етеди. Бул область барьер фронты бойынша биртексиз локалланған болады, бул барьер майдан бойынша биртексизликлердің көбейіуіне хәм тезлестирилген диффузия қоспалары менен сыпатланатуғын участкалардың пайда болыуына алып келеди [18]. Бул еки факторда технологиялық сапасызлықтың келип шығыуына хәм диодлардың электрон аппаратурада ислегенде истен шығыуына себепшиси болады. Технологиялық қайта ислеудің режимин хәм Шоттки диодларынын жұмыс температура режимлерин электрон схемаларда моделлеу истен шығарыудың ең үлкен себепшиси металл қоспалардың Шоттки барьерин пайда етиуши металл қабаты арқалы ашықлық заряды областына контактынан болатуғын диффузия болып есапланады. Бунда бөлиниу шегарасындада оған жақын тұрған арсенидгаллий областындада мышьяк ямаса галий менен металлардың бирикпелеринің дүзилиуі мүмкин. Тез еригиш металлардың буфер қатламларынын құрамалы контактлери хәм арсенидгаллий менен бир қатар металлардың қатты ертпелери тийкарындағы барьер контактлери пайда болыуы эсбаптардың исенимлигин арттырады. Бул жағдайда истен шығыуларды бөлиниу шегарасында хәм ярым өткізгишликтин бетки қатламларында фаз бөлиниуи шегараларында диодтың жұмыс температурасында физикалық-химиялық өзара-тәсирлесіудің себебинен хәр түрли дефектлердің пайда болыуына алып келеди. Тез еримли металларды жоқары жийилик арсенидгаллий диодларының исенимлин арттырыу ушын қолланылатуғын барьердің термотурақлылығын жақсылауға жәрдем береді, себеби бундай системаларда арсенидгаллий менен 800⁰С-температураға шекем бирикпелер дүзилмейди. Бирақ бул релаксациясы эсбап параметрлеринің дегредациясына алып келетуғын контактлардағы механикалық тартылыс мәселелерин шешип берген жоқ. Арсенидгаллийге термотурақлы тартылыссыз барьер контакты проблемасы бул максетте Si_xGe_{1-x} -тиң $x=0,02$ -ни қолланып шешиуге ерискен. Бул контактта барьер хәм буфер қәсийетлери жүдә жақсы

биригеди, оның үстине Si_xGe_{1-x} бетки қабатында окись қатламының бар екенлиги буны күшейтеди.



3.2.1-сүүрет. GaAs хэм Si қадаған етилген зона кеңлигиниң температуралық ғәрезлиги



3.2.2- сүүрет. GaAs хэм Si деги дрейф тезлигиниң электр майданына ғәрезлиги

Металл-ярымөткізгіш барьер контактындағы интердиффузияны пасеңлетіу үшін арсенидгаллий лавинли пролетлы диодтын исенимлилигин арттырыу мақсетинде арсенидгаллийдің бетки қабатына жуқа SiO_2 қабатын қойыу ұсынылады, бул әлбетте қосымша технологиялық операцияны хәм қойылып атырған SiO_2 қатламының биргеликли емес мәселесин шешиуди талап етеди.

Шоттки барьерли лавинли пролетлы диодтың исенимлилигин арттырыу үшін көп қатламлы контактлар тийкарында $Au-Pt-Cr-Pt$ системасы ұсынылады. Лавинли пролетлы диодтың $Au-Pt-Cr-Pt$ контактлары менен деградация процессинің активлесіу энергиясы 2,2 эВ ты қурайтуғынын көрсетти.

Лавинли пролетлы диодының барьер контактының исенимлилиги тезлестирілген сынаулар хәм Аррениус теңлемеси бойынша анализ нәтижелери жәрдемінде баҳаланады. Бул қосымша талықлауды талап етеди, себеби тезлестирілген сынаулар үшін жоқары температураны қолланыу әсбап дүзилесинің хәр қыйлы областларында бирдей емес деградация шәраятларын жаратады, онда әлбетте температура, егер әсбап электр қысымы астында болса ондағы структуралық дефектлер бар болғанлығы үшін биргеликли емес болады. Прибор структурасының деградациясын теңлеме бойынша анализлегенде әдетте диод структурасындағы температура көлеми бойынша биргеликли хәм R қуәтлығының тарқалыуы

$$T = T_0 + PR_T \quad (1.1)$$

ға тең болады. Бунда T_0 -қоршаған орталықтың температурасы, R -жыллылық қарсылығы.

Аррениус нызамы бойынша t_γ диодтың өтиуге шекемги орташа ислеу аўхалын анықлап хәм алынған активация энергиясын салыстыра отырып төмендегиге ийе боламыз

$$t_\gamma = C \exp(\Delta E / kT)$$

Бул жерде, С-пропорционаллық коэффициенті, ΔE -энергияның истен шыққанға шекемги процесстің активизациясы, К-Больцман турақлысы, Т-температура .

Отказ етиў активация энергиясын прибордың ВАХ ның туўындысынан алынған анализ бенен салыстыра отырып биз мынадай жуўмаққа келемиз:

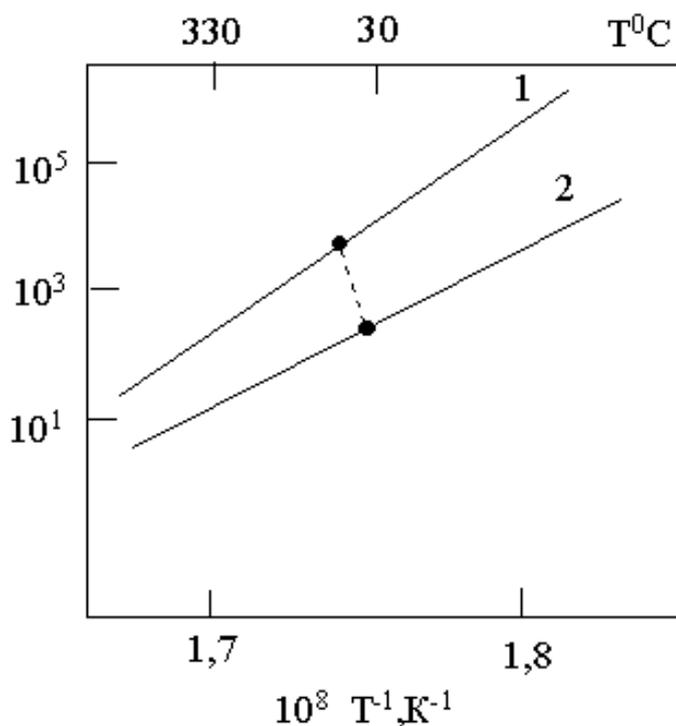
Арсенидгаллий ЛПД да Шоттки барьер менен диод тийкарында микроплазманың урылыўы менен, бирге диффузион р-п активизация энергиясының өтиўи менен ΔE 0,6-1,0 эВ ты курайды, бул дегредация процесси ушын характерли, сонын менен бирге жоқары эффект пенен хәм бул мағлуматлар бир-бири менен туўры келеди.

Арсенидгаллий ЛПД-сы Шоттки барьери менен биргеликли лавин урылыўлары менен мына өлшем характерленеди. ΔE 1,8 ÷ 2 эВ, гетере өтиўде *Ge-GaAs* қатлам қалыңлығы $Ge=0,1$ мкм.

ЛПД ға уқсаған Шоттки барьери менен $\Delta E=2,2$ эВ болады. Аррениус иймеги ЛПД ның бул типлерине 3.8сүўретте көрсетилген. Бул жуўмақ соны көрсетеди ЛПД гетеро өтиў менен, болимнің шегарасына ийе болыў менен бирге аз рекомбинация активлик арсеидгаллийдің шегараланған жеринде хәм биргелики, лавин урыўларында үлкен исенимлилик туўдырады, диффузион р-п өтиў менен ямаса Шоттки барьери салыстырғанда истен шығыў бул жағдайда металдын барьер бойынша ЛПД ның актив областына диффузион өтиў менен байланыслы болады.

ЛПД *Ge-GaAs* истен шығыўға 10 саат орташа ислеў уактына ийе, бул курамалы технологияда таярланған әсбаптың бул классы ушын легирлеў профили курамалы, буны эпитаксия суйық фазлык методы менен алынады. Бирақ ЛПД ның Аррениус қыйсығы бойынша исенимлилик қәсийетин анализ қыла отырып өзимизге салыстырма бойынша есап бериўимиз керек, буны алынған жуўмақлардан аламыз. Барлық жағдайда тезлетилген сынаў өткериўдің алдын ала хәм кейинги өткериўлерде ЛПД ның

параметрлериниң бузылмас тексерийүн вольт-амперлик көбеймеси бойынша өткیزیў керек, бунда микроплазмалық сес пенен хәм баскада характеристикалар менен.



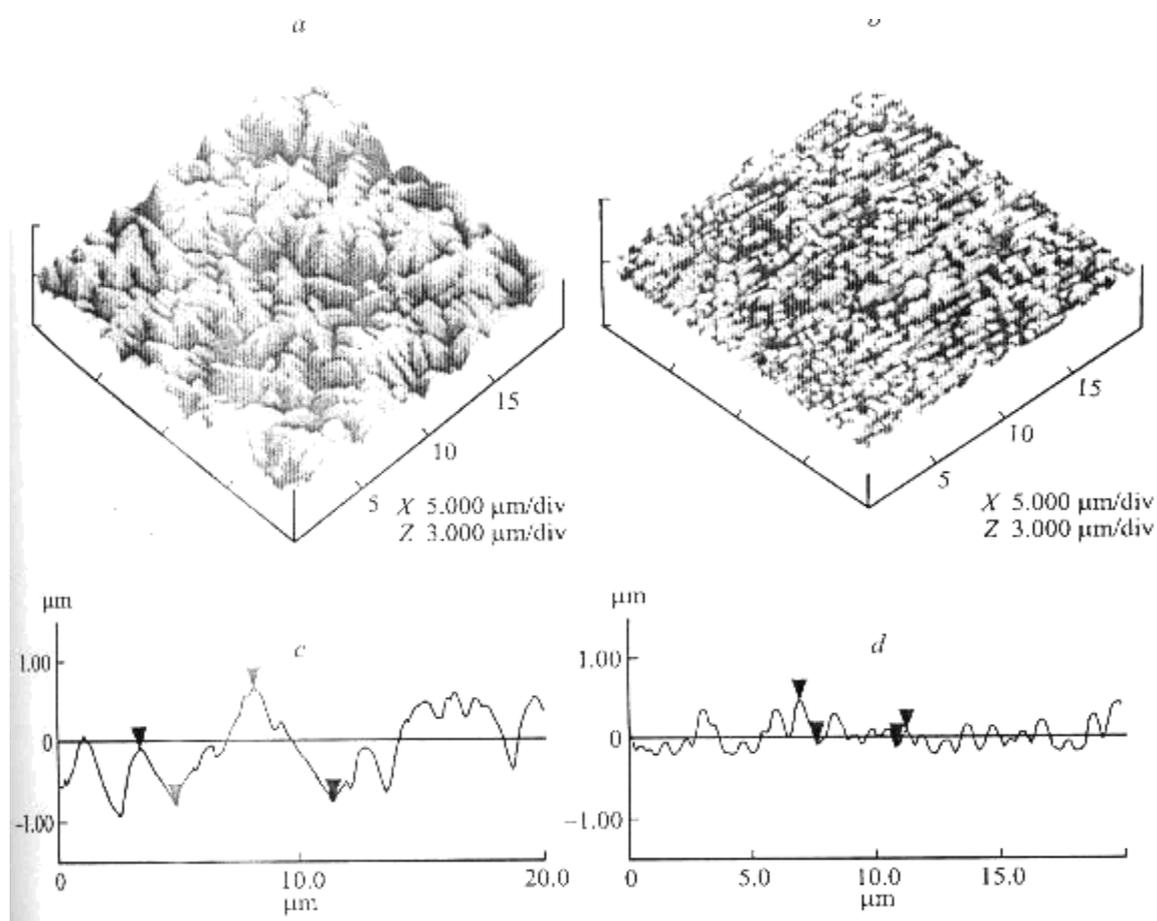
3.2.3.-сүүрет. ЛПД ушын Аррениус қыйсығы гетеро өтиў менен Ge-GaAs (1) хәм Шоттки барьери менен Au-Pt-Cr-Pt-GaAs (2) қатлам қалыңлығы (Ge хәм Pt 1000⁰ А бойынша)

GaAs структурасындағы Шоттки барьерине ийе қуяш элементлери, кремнийден исленген қуяш элементлерине салыстырғанда радиацияға шыдамлы болғанлықтан космоста қолланылады. Соның менен бирге белгили бир тез қозғалыўшы электронлар менен нурландырғанда ямаса γ -кванты менен нурландырғанда киши дозалар эффектти деп аталыўшы шегаралардағы рекомбинациялық тезликтің кемейиўине хәм ток тасыўшылардың диффузиялық узынлығының артыўына алып келиўши, радиациялық стимуластырылған ямаса актив орайлардың гетерлениўине алып келеди. Барьердің пайда етиўши шегаралар радиациялық деффектлердің хәм дәслепки сток хызметин атқарады. Сонлықтанда пайда

болыўшы эффект өлшеми хэм пайда болыўшы дозалар областы структуралың жеделлестириў дәрежесине байланыслы болады. Микрорельефтиң форфологиясын таңлап алыўда хэм оның пайда болыў усылында дәслеп фототүрлендириў эффективлигине тәсир етиўши оптикалық хэм рекомбинациялық параметрлердиң тәсир етиўин қарап өтиўимиз керек. Бизлер бизиң өзимиздиң питириў кәнигелик жумысымызда хәр қыйлы бетлик морфологиясы химиялық усылда анизотропиялық травить етилген, (Au) GaAs барьерлик структурасына γ -гамма нуры менен тәсир еткеннен кейинги хэм дәслепки структураның вольт-амперлик характеристикасын өлшей отырып оның микрорельефиниң өзгерўин анықладық. (Au)GaAs барьерлик структурасы подложканың температурасы $+120^{\circ}\text{C}$ планар технология бойынша вакуумда термикалық шаңландырыў жолы менен алтынды. Омлық контакт индийди балқытып өсирилиў бетиниң кери тәрәпине отырғызылды. Алтынды подложканың бетине шаңландырмастан бұрын, анизотропиялық травление ўақтындағы отырғызылған оксид қатламы HCl араласпасы менен травить етилди. Беттиң морфологиясы атомлық микроскоп арқалы тексерилди. Ярымөткизгиштиң параметрлерин хэм шегаралық областларын анықлаў ушын қараңғыда вольт-амперлик характеристика хэм жоқары жийиликли (1МГц) вольт-амперлик характеристика өлшенди. 3.12-сўўретте изертлениўши GaAs бетиниң морфологиясы хэм қаптал бетинен көрсетилген микрорельефи көрсетилген. Бетлик шегарадағы рекомбинациялық параметрлерди анықлаў ушын ярымөткизгиштен өтетуғын жақтылық спектрлерин есаплаў арқалы микрорельефтиң геометриялық (үлги тегислигине микрорельефтиң ийилиў мүйешин, бет майданының үлкейиўин хэм т.б.) хэм статистикалық параметрлерин анықлаўға болады. Микрорельефтиң бетиниң үлкейиўи менен тереңге қарай хэм оның анавларының қайталаныў дәрежесиде үлкейе береді. Еки анизотропиялық травить усылы арқалы төмендеги параметрлер анықланды: $h_{\max}=0.3$ хэм 1.2 mm , $a=0.6$ хэм $1.4-2\text{ mm}$. Усыған сәйкес түрде

үлгинің бет майданына түсірілетуғын түсіу мүйеши 32-42°, ден 45-48° шекм артты. Дентрид түріндеги микрорельф пирамида-призма формасындағы микрорельфтен бир қанша қурамалығы менен ажыралып турады. Микрорельф майданына күшли электр ямаса магнит майдан тусиргенимизде барьерлик структурадағы токтың өтиуи термомайданлы механизиге байланыслы болады. Бул процесс хәр қыйлы микрорельефке ийе ярымөткізгішли диодлық структуралардың вольт-амперлик характеристикасын өлшеу арқалы тексерилип шықты. 3.2.2-3.2.3-сүүретте хәр қыйлы микрорельефке ийе диодлық структуралардан өлшенген тууры хәм кери вольт-амперлик характеристика көрсетилген. Токтың өтиуинің термоэмиссиялық хәм рекомбинациялық механизминен басқа токтың өтиуинің термомайданлы қураушысыда үлкен орынды тутады. Бул токтың өтиуинің механизми айырым бетлик майданларда барьер бийиклигинің кемейуи менен жүзеге келеди. Диодлық структураның бетинде барьер бийиклигинің бөлистирилиуи дентридлиқ морфологияға ийе микрорельефтиң вольт-амперлик характеристикасында токтың артыуы хәм идеаллық емес фактордың парметринің киширейуи менен түсиндириледі. 3.2.2-3.2.3-сүүреттиң а) жақтылық түсірилген жағыдайдағы алынған вольт-амперлик характеристика, 3.2.3-сүүреттиң в) изерленип атырған бетлик барьерлик структураның қысқа туйықланыуы болған жағыдайдағы фототок спектрлери көрсетилген. қысқа туйықланыу тогы бетлик структураның микрорельефинің раужланыу дәрежеси менен артып барады (микрорельеф квази решетка формасында болғанда 3 есе, микрорельеф дентрид формасында болғанында 3.2 есе артады). Бирақ холостой ход кернеуи микрорельефтиң раужланыуы менен квазирешетка формасында 1.3 есе, дентрид формасындағы микрорельеф болғанда 1.25, 1.16 есе артты. Жақтылық нурлары түскен жағыдайда өлшенген вольт-амперлик характеристикада дентрид формасынағы микрорельефке ийе структурда хәм квазирешетка формасына ийе микрорельефке салыстырғанда киши туйықланыу тогы киши болды. Усыған сәйкес түрде

пайдалы жұмыс коэффициентіде үлкен мәніске ийе болды. Изертлеуіміз нәтижесінен g -нурының тәсір етіуі микрорельефи раўажланған структураларға көп өзінің тәсірін тийгизетуўыны анығланылды. Киши дозалы тәсір етіу арқалы бетлик шегараларда рекомбинация тезлігінің кемейетуғыны, тийкарғы емес заряд тасыўшылардың диффузия узынлығының артатуғынын, барьер бийиклігінің артатуғынын хәм идеаллық емес фактор параметрлерінің кемейетуғынын дентрид хәм үлкен раўажланыўға ийе болған квазирешетка рельефлеріне ийе диодлық структураларда көриуге болады.

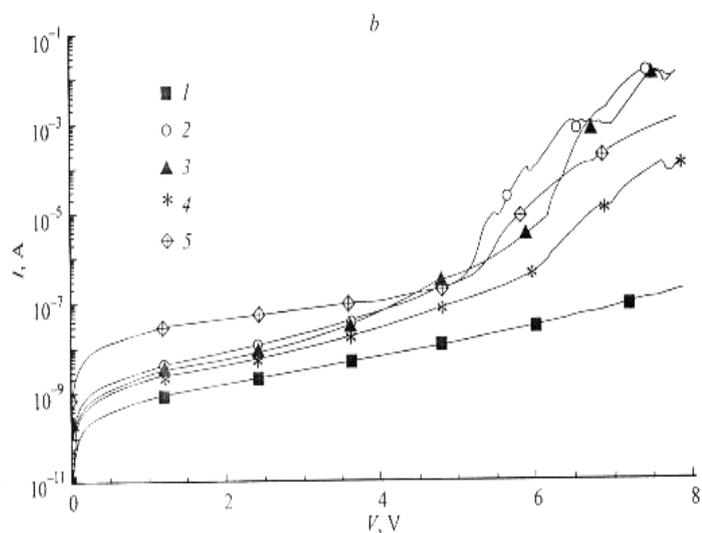


3.2.4-сүүрет. GaAs барьерлик структурасының бетлик микрорельефи.
 а) дентрид типтеги бетлик структура б) квазирешетка типіндеги бетлик
 структура с, d) решетка сызығына перпендикуляр болған d-кесимине
 сәйкес келиўши қатламлар

Жоқары энергиялы электронлар хәм протонлар менен нурландырылған Si, GaAs тийкарындағы диодлық структуралар жақтылық түсірилген жағыдайда алынған вольт-амперлик характеристикаларынан тойыныў тогының артатуғынын көрийимизге болады. 5-сүүретте нурланыўдың дозасы (2×10^5 Гр) тең болған микрорельефтиң харктеристикасын төменлетиўши хәм нурланыў дозасы (10^3 Гр) микрорельефтиң характеристикасын жоқарлатыўшы нур менен тәсир еткеннен кейинги хәм дәслепки фототоктың салыстырмалығының толқын узынлығына ғәрезлиги көрсетилген. Вольт-амперлик характеристиканың жақтылық түсип турғанда төменлеўи нурланыў алыў дозасы $>10^5$ Гр тең болғанда басланады. Дентрид типтеги микрорельефтиң раўажланығы менен ең турақлы структурада пайдалы жұмыс коэффицентти 5% ке киширейиўи (2×10^5 Гр) дозасында анықланылды. Ең радиацияға шыдамлы квазирешетка формасына ийе микрорельефлерде пайдалы жұмыс коэффицентиниң төменлеўи 2% тең болды. Демек, металл/GaAs бетлик шегарасында микрорельефтиң раўажланыўы микромүйеш иймеклиги $^360^\circ$ (дентрид типтеги) тең болғанда үлкен туйықланыў фототогын келтирип шығарады, бул өзгезегинде қуяш элеметиниң космоста пайдаланыўына мбмкиншилик бар дегенди билдиреди. Ал, квазирешетка типиндеги микрорельефке ийе диодлық структуралар динтрид формасына ийе микрорельефлерге карағанда радиацияға шыдамсыз болатуғынын көрсетеди.

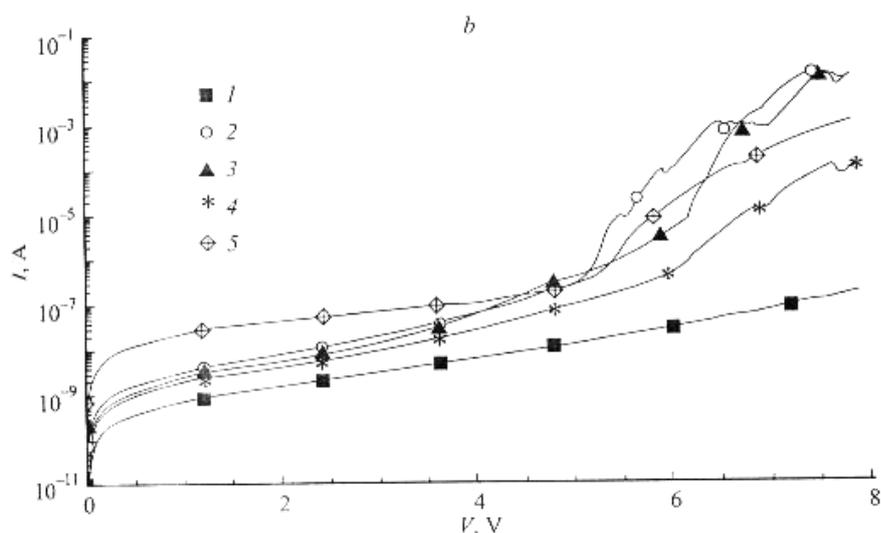
Алынған материаллардан Шоттки барьери исленип, вольт-амперлик характеристикасын изертлеп шықтық. Ярымөткизгишли структуралардың геометриялық өлшемин киширейтиў арқалы оларда таза кублыслар пайда болады, Бул кублыслар ярымөткизгиштиң актив областындағы импульс релаксациясының узынлығына хәм энергияға байланыслы кубылыслар болып есапланады. Егер актив қатламның қалыңлығы Еркин электронлардың жүриў жолынан кишкентай ямаса салыстырмалы

дәрежеде болса, онда заряд тасыушылардың қозғалысы квазибаллистикалық характерге ийе болады.

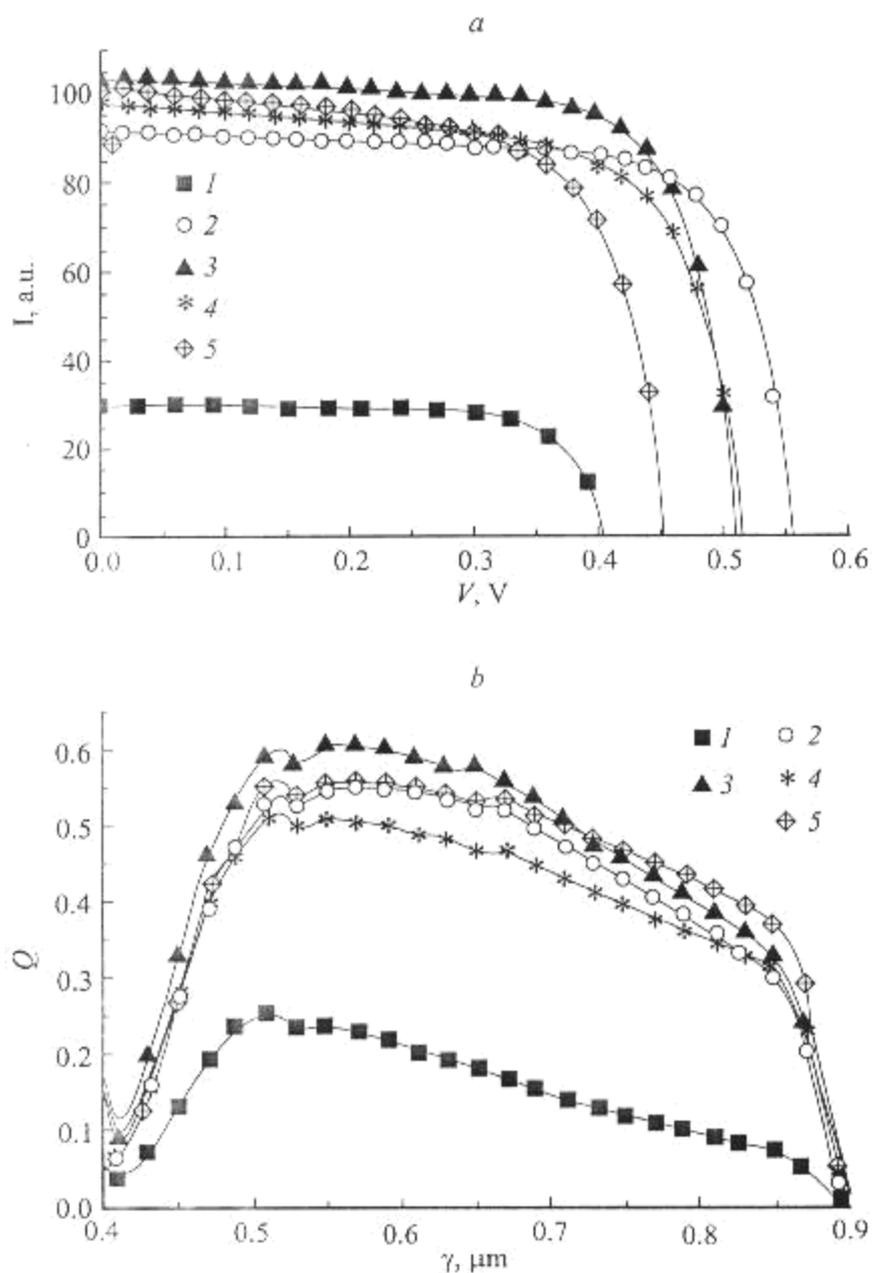


3.2.5-сұйрет. Au/GaAs диодлық структурасының қараңғыда өлшенген кері вольт-амперлік характеристикасы

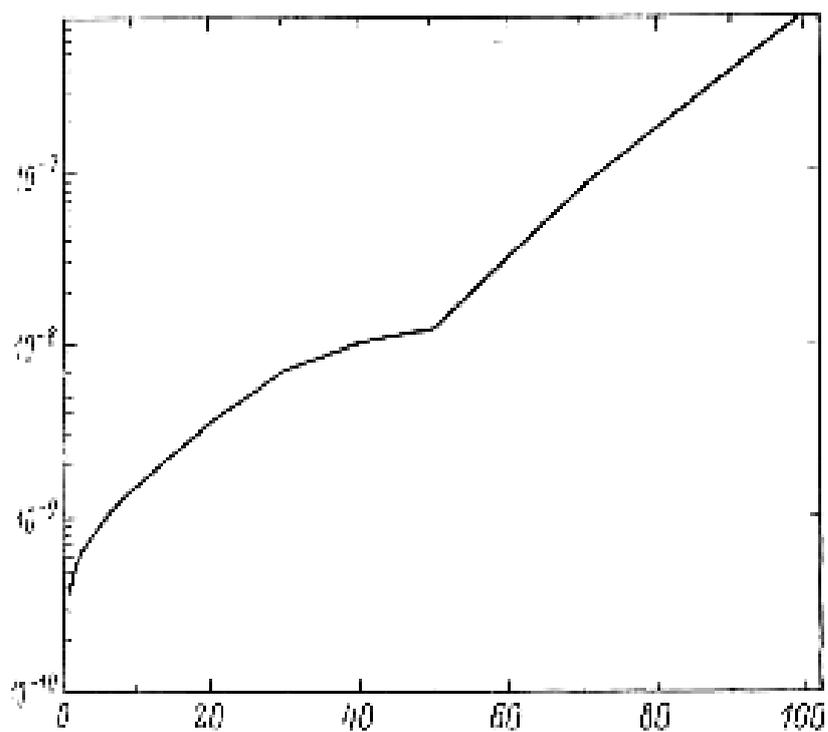
Бундай диодлық структураларда турақлы емес токтың ағыуы, вольт-амперлік характеристиканың айырым ОДП бөлімлері пайда болады. Қазіргі уақытта Шоттки барьеріне ийе жоғары жиілікте іслеуші диодлық структуралардың эпитаксиаллық қатламының ұзындығы 0,1-0,5 мкм тең болып, төмен температурада импульс релаксациясы ұзындығы менен салыстырмалы болып, характеристиканың өзгеріуіне алып келеді.



3.2.6-сұйрет. Au/GaAs диодлық структурасының қараңғыда өлшенген тууры вольт-амперлік характеристикасы



3.2.7-сүүрет. а) Au/GaAs диодлық структурасының жақтыда өлшенген туўры вольт-амперлик характеристикасы. в) фототоктың сыртқы квантлық эффектке ғәрезли анықланған спектри. (1,2) микрорельефтин квазирешетка типиндеги, (3,4) – дентрид типиндеги үлгилери ушын өлшенген мәнислери



3.2.8 –сүўрет. Гетерлеўден өткен GaAs тийкарындағы Шоттки барьерине ийе диодлық структураның кери вольт-амперлик характеристикасы

ЖУЇМАҚЛАЇ

Диссертация жұмысы нәтижелери тийкарында төмендегише жуўмақларға келинди:

1. GaAs ярымөткизгишли материалының рубин импульсли лазери тәсиринен *кейинги қурамындағы болып өтетугын релаксациялық процесслер* анықланды.

2. Ярымөткизгишли GaAs диодлық структураларындағы токтың тасылыў механизмлеринің өзгерислери үйренилди.

3. Температураға байланыслы GaAs жуқа пленкасындағы ток өтиў процесслери үйренилди.

4. Көлемлик кристалларға салыстырғанда GaAs /GaAs структурасының қалыңлығының артыўы менен электрофизикалық кәсийетлеринің өзгерийўлери аныкланылды.

5. Лазер нурының хәр қыйлы дозалары тәсиринен кейин платиний арсенид галлий диодлық структураларының ВАХ ның белгили дозаға шекемги жақсыланыўы аныкланылды.

6. Лазер нурының хәр қыйлы дозасынан кейинги диодлық структуралардың қурамындағы элементлердің бөлистирилиў профиллери аныкланылды.

7. ВАХның лазер нуры тәсиринен кейинги жақсыланыўының себеплери платиний атомларының барьерлик қатламнан өтип галлий арсенид атомлары менен биригийи аныкланылды.

Пайдаланылган адабиятлар

I. Норматив ҳужжатлар ҳам баслы адабиятлар.

1. O'zbekiston Respublikasi Konstitutsiyasi. Toshkent «O'zbekiston», 2014.
2. Kadrlar tayyorlash Milliy dasturi // O'quvchi ma'naviyatini shakllantirish. – T.: Sharq, 2000. – B. 20 –55.
3. Mirziyoev Sh.M. Erkin va farovon demokratik O'zbekiston davlatini birgalikda barpo etamiz. Toshkent, “O'zbekiston” NMIU, 2017. - 29 b.
4. Mirziyoev Sh.M. Qonun ustuvorligi va inson manfaatlarini ta'minlash yurt taraqqiyoti va xalq farovonligining garovi. “O'zbekiston” NMIU, 2017. -47 b.
5. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2017-yil 20-apreldagi “Oliy ta'lim tizimini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida”gi №2909-sonli qarori.
6. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2017-yil 7-fevraldagi “O'zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirish bo'yicha harakatlar strategiyasi to'g'risida” gi PF-4947-sonli Farmoni. O'zbekiston Respublikasi qonun hujjatlari to'plami, 2017-y., 6-son, 70-modda.
7. O'zbekiston Respublikasi qonun hujjatlar to'plami, Magistratura to'g'risida nizom. Vazirlar Mahkamasining 2015-yil 2-mart 36-sonli qarori. 9 (665)-son.

II. Тийкаргы адабиятлар

1. И.В.Грехов, Ю.Н.Сережкин. Лавинный пробой р-п перехода в полупроводниках Ленинград, «Энергия» 1980, 152с.
2. С.А.Груша, Р.В.Конакова, В.В.Миленин, А.А.Наумовец, Б.А.Нестеренко, И.В.Прокопенко, Ю.А.Тхорик, Л.С.Хазан Электрорадиационные изменения в барьерных структурах платина-арсенид галлия. //Электронная техника. // Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 1990. т. 5. № 206. – с.68-72.
3. Е.А.Беляев, Н.С.Болтовец, В.Н.Иванов, А.Б.Камалов, Р.В.Конакова, В.В.Миленин, Л.М.Капитанчук, Я.Я.Кудрик, М.У.Насыров Межфазное

взаимодействие в контактах TiB_x -n-GaP при микроволновой обработке. Физика и химия обработки материалов. 2008.- с.28-31.

4. Джаманбалин К.К., Дмитриев А.Г., Сокол-Номоконов Э.Н. Омические контакты к полупроводникам $A^{III}B^V$ полученные с помощью квантового генератора. //Физика и химия обработка материалов. Москва. - 1990. -№2. -С.73-75.

5. Бер Б.Я., Дайнова И.Р., Коробов В.А., Кулагина М.М., Прощепа Г.В, Пятаев В.З., Островский А.Ю., Этинбург М.М. Лазерное формирование омических контактов к арсениду галлия n-типа. //Письма в ЖТФ. - 1991.10.26. –т.17. -№20. -С.74-79.

6. Пихтин А.Н., Попов В.А., Яськов Д.А. Омические контакты к полупроводникам, полученные с помощью лазера. //ФТП. Санкт-Петербург. 1969. –Т.3. -Вып.11. -С.1646-1648

7. Прогнозирование надежности полупроводниковых лавинных диодов Р.В.Конакова, П.Кордош, Ю.А.Тхорик и др. Киев: Наукова думка. - 1986, 188с.

8. Т.Я.Пуритис, И.Э.Озолиня, Р.Я.Крике, Я.П.Муранс, Я.К.Балодис Микроплазменные явления в кремниевым электронно-дырочном переходе Известия Академии наук Латвии, Серия физических и технических наук, 1966, стр. 383-390.

9. Зайцевский И.Л., Конакова Р.В., Рыбалка В.В., Щербина Л.В. Использование методики модуляционного дифференцирования для исследования неоднородностей ВАХ кремниевых ЛПД Микроэлектроника, 1980, том 3, №9, с.253-258.

10. М.Б.Тагаев. Влияние облучения гамма квантами ^{60}Co и быстрыми электронами на величину критической плотности тока кремниевых р-і-п диодов.- Узбекский физический журнал, 1996, №5-6, стр. 102 – 104.

11. А.И.Шкретий, М.Б.Тагаев, С.И.Глущенко. О взаимосвязи микроплазменного пробоя с процессами деградации лавинных р-п переходов.- Вестник АН УзССР, 1989, стр.18-24.

12. Тагаев М.Б., Бекбергенов С.Е., Камалов А.Б., Кудрик Я.Я., Кулиш Н.Р., Малыш Н.И., Конакова Р.В., Миленин В.В. Влияние лазерной обработки с малой плотностью энергии излучения на ВАХ диодов Шоттки Pt-n-n⁺-GaAs. VI Международная научная конференция “Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах” Томск, Россия, 8–15 августа, 2008 года. –С. 495-497.
13. Даулетмуратов Б.К., и др. /ДАН Уз. -2008 . -№3. –С 21-27.
14. Тагаев М.Б. и др. Взаимодействие и самоорганизация дислокаций и микроплазм в барьерах Шоттки и р-п переходах большой площади. - Материалы международная научно-практическая конференция “Структурная релаксация в твердых телах”, Винница, Украина, 2003, стр. 122.
15. Пашков В.И., Перевозчиков В.А., Скупов В.Д. Влияние отжига в поле СВЧ излучения на остаточную деформацию и примесный состав приповерхностных слоев кремния. //Письма в ЖТФ. -1994. -Т.20. -Вып.8. - С.14-18.
16. Абдурахимов Д.Е., Вахидов Ф.Ш., Верещагин В.Л., Калинушкин В.П., Плоппа М.Г., Райзер М.Д. Изменение свойств полупроводниковых материалов в результате воздействия СВЧ- импульсов наносекундной и микросекундной длительности. //Микроэлектроника. -1991. -Т.20. -Вып.1. - С.21-25.
17. Воронков В.П., Вяткин А.П., Иванов Б.В., Кулешов С.М., Рухадзе З.А. Вольтамперные характеристики контактов Pd-GaAs, подвергнутых лазерному отжигу.//ФТП. –1989. –т.23. -№3. -С.562-564
18. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. //М.: Мир. -1984. -Т.1. - 455 с.
19. Евстропов В.В., Джумаева М., Жилиев Ю.В., Назаров Н., Ситникова А.А., Федоров Л.М. Дислокационное происхождение модель избыточно-туннельного тока в р-п-структурах на основе GaP. //ФТП. -2000. -Т.34. - №11. -С.1357-1362.

20. Tagaev M.B. Utemuratova Kh.YU. SYMPOSIUM PROCEEDINGS IPS
2016 New Trends of Development Fundamental and Applied Physics:
Problems Achievements and Prospects 10-11 Novemb 2016
Tashkent Uzbekistan b-50.
21. Аметов Б.Т. Низаматдинова Г.Б. Утемуратова Х.Ю. Серимбетова
М.П. Образование слоя теллура на поверхности кристалла
кадмия теллура после лазерного облучения. - «ВЕСТНИК»
Каракалпакского государственного университета им.Бердаха
Нукус.- 2017. с.10-11.

III. Интернет ресурслары

1. www.physics.riew.com
2. www.ujp.org
3. www.firstsolar.com
4. www.ziyonet.com
5. www.karsu.com