

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ, САМАРҚАНД ДАВЛАТ
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.27.06.2017. FM./T.34.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ

ГУЛЯМОВ АБДУРАСУЛ ҒАФУРОВИЧ

**ЯРИМЎТКАЗГИЧЛИ СТРУКТУРАЛАРНИНГ ДИНАМИК
ХАРАКТЕРИСТИКАЛАРИГА ДЕФОРМАЦИЯ ВА КУЧЛИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТ МАЙДОННИНГ ТАЪСИРИ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

ТОШКЕНТ–2017

Докторлик (DSc) диссертацияси автореферати мундарижаси

Оглавление автореферата докторской (DSc) диссертации

Contents of the of Doctoral (DSc) Dissertation Abstract

Гулямов Абдурасул Гафурович

Яримўтказгичли структураларнинг динамик характеристикаларига
деформация ва кучли электромагнит майдоннинг таъсири 3

Гулямов Абдурасул Гафурович

Влияние деформации и сильного электромагнитного поля на
динамические характеристики полупроводниковых структур 25

Gulyamov Abdurasul Gafurovich

Influence of deformation and strong electromagnetic field on dynamic
characteristics of semiconductor structures 47

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 55

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ, САМАРҚАНД ДАВЛАТ
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМий ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.27.06.2017. FM./T.34.01 РАҚАМЛИ ИЛМий КЕНГАШ**

ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ

ГУЛЯМОВ АБДУРАСУЛ ҒАФУРОВИЧ

**ЯРИМЎТКАЗГИЧЛИ СТРУКТУРАЛАРНИНГ ДИНАМИК
ХАРАКТЕРИСТИКАЛАРИГА ДЕФОРМАЦИЯ ВА КУЧЛИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТ МАЙДОННИНГ ТАЪСИРИ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

ТОШКЕНТ–2017

Фан доктори (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2017.2.DSc/FM36 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Физика-техника институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида (fti-kengash.uz) ва «ZiyoNet» Ахборот-таълим порталида (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи:	Аюханов Рашид Ахметович физика-математика фанлари доктори
Расмий оппонентлар:	Мамадалимов Абдугафур Тешабаевич физика-математика фанлари доктори, академик Имамов Эркин Зуннунович физика-математика фанлари доктори, профессор Расулов Рустам Явкачович физика-математика фанлари доктори, профессор
Етакчи ташкилот:	Андижон Давлат унверситети

Диссертация ҳимояси Физика-техника институти, Ион-плазма ва лазер технологиялари институти, Самарқанд давлат университети ҳузуридаги DSc.27.06.2017. FM./T.34.01 рақамли Илмий кенгашининг 2017 йил «__» _____ соат ____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Бодомзор йўли кўчаси, 26-уй. Тел./факс: (99871) 235-42-91; e-mail: lutp@uzsci.net, Физика-техника институти мажлислар зали.)

Диссертация билан Физика-техника институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (__ рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Бодомзор йўли кўчаси, 26-уй. Физика-техника институти. Тел./факс: (99871) 235-30-41.

Диссертация автореферати 2017 йил «__» _____ да тарқатилди.
(2017 йил «__» _____ даги ____ рақамли реестр баённомаси.)

С.Л. Лутпуллаев
Илмий даражалар берувчи Илмий
кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., профессор

А.В. Каримов
Илмий даражалар берувчи Илмий
кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф.д., профессор

С.А. Бахрамов
Илмий даражалар берувчи Илмий
кенгаш қошидаги илмий семинар раиси,
ф.-м.ф.д., профессор

КИРИШ (фан доктори диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Ҳозирги кунда жаҳонда тинимсиз ривожланишдаги яримўтказгичли материаллар ҳамда яримўтказгичли структураларнинг фото ва тензо хоссаларини ўрганиш соҳасида, айниқса, бу хоссаларни ёруғлик, деформация ва ўта юқори частотали электромагнит майдон таъсирида бошқариш йўналишида интенсив тадқиқотлар олиб борилмоқда. Бу борада яримўтказгичли материалларнинг функционал характеристикаларини бошқариш орқали яримўтказгичли асбобларнинг ноёб хоссаларини аниқлаш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади.

Мустақиллик йилларида Республикамиз илм-фан соҳасида, хусусан яримўтказгичлар физикасининг ривожланишига, жумладан, тензосезгир ва фотосезгир яримўтказгичли структураларни олиш технологияларига катта эътибор қаратилди. Бу йўналишда чуқурэнергетик сатҳлар ҳосил қилувчи аралашмали яримўтказгичли материаллар ва аномал катта фотоқучланишга эга юпка яримўтказгичли пардалар олинди, фотоўтказувчанлик эффектларини, тор соҳали ва қатламли материаллар асосида фото- ва тензосезгир структураларни олиш бўйича сезиларли натижалар олинди. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясига кўра илмий-тадқиқот ва инновация фаолиятини рағбатлантириш, илмий ва инновация ютуқларини амалиётга жорий этишнинг самарали механизмларини яратиш, яримўтказгич ва яримўтказгичли структураларда кечадиган физик жараёнларга кучли электромагнит майдон, ёруғлик ва деформация таъсири масалаларига алоҳида эътибор қаратиш муҳим аҳамиятга эга.

Ҳозирги кунда жаҳонда яримўтказгичли структураларнинг динамик характеристикаларига деформация ва кучли электромагнит майдон таъсирини ўрганишда кучли электромагнит майдон, деформация ва ёруғлик таъсирида юзага келувчи ток ва электрйоритувчи кучлар табиатини очиб беришда олиб критик нуқта яқинидаги частота билан ёритилганда юзага келувчи эффектларга катта эътибор қаратилмоқда. Бу борада мақсадли илмий тадқиқотларни амалга ошириш, жумладан, вакуумли чанглатиш натижасида олинган тензосезгир пленкаларда юзага келувчи аномал катта қийматга эга тензосезгирлик коэффицентини тушунтириб берувчи потенциал тўсиқлар системаси моделини қуриш; потенциал тўсиқлар системаси модели асосида деформация потенциали доимийсини баҳолаш; хусусий ёруғлик билан ёритилган p-n-ўтишда доимий деформация таъсирида тензосезгирликни бошқариш мумкинлигини аниқлаш; яримўтказгичлардаги генерацион-рекомбинацион жараёнларни тушунтиришда фазалар портретидан фойдаланиш мумкинлигини аниқлаш; квазибирўлчамли электрон газнинг ҳолатлар зичлиги ва энергетик сатҳларининг иссиқлик кенгайишини тадқиқ қилиш; кристалл панжара тебраниши ва энергетик сатҳларнинг иссиқлик кенгайиши билан боғлиқ энергетик тирқишларнинг температуравий боғлиқлигини тадқиқ қилиш муҳим масала ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ–4997-сонли «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони ва 2010 йил 15 декабрдаги ПҚ – 1442-сон «2011–2015 йилларда Ўзбекистон Республикаси саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ–2789-сон «Фанлар академияси фаолияти, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланиши устувор йўналишларига мослиги. Тадқиқот иши Ўзбекистон Республикасининг фан ва технологиялар ривожланишининг Ф2. “Физика, астрономия, энергетика ва машинасозлик” устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

Диссертация мавзуси бўйича халқаро илмий тадқиқотлар шарҳи¹.

Яримўтказгичли структураларга ўта юқори частотали майдон ва деформациянинг таъсири бўйича дунёнинг етакчи илмий марказлари ва олий таълим муассасалари, жумладан, Departamento de Física Aplicada, Universidad de Salamanca(Испания), Ludwig-Maximilians-Universität München (Германия) университетларида ўта юқори частотали майдон таъсирида осцилляцион эффектлар бўйича, Россия Федерацияси Фанлар академиясининг Физика-техника институтида ўта юқори частотали майдон таъсирида электронларнинг қизиши натижасида юзага келувчи электр юритувчи кучлар ва ноидеаллик коэффициенти бўйича, Доғистон Илмий марказининг Физика институти (Россия)да ўта юқори частотали туннел диодларига турли амплитудаларда юқори частотали сигналлар таъсири бўйича тадқиқотлар олиб борилмоқда.

Яримўтказгичли структураларга деформация ва электромагнит нурланиш таъсирини ўрганишга оид жаҳонда олиб борилган тадқиқотлар натижасида қатор, жумладан, қуйидаги илмий натижалар олинган: кадмий теллур (National Astronomical Observatory of Japan) ва германийли юпка пардалар асосида фотоволтаик эффектли структуралар олинган (The American Institute of Physics, АҚШ); p-n-ўтишларнинг қаршилигига ҳарорат ва босим таъсирининг хусусийлиги ўрганилган (University of New Hampshire, АҚШ); ўтаюқоричастотали тўлқинларнинг таъсирида яримўтказгичли структуралар хоссаларининг ўзгариши аниқланган (А.Ф. Иоффе номидаги Физика-техника институти, Санкт-Петербург, Россия); профессор Ю.Г. Гуревич бошчилигида иссиқ электронлар назарияси ривожлантирилган (Мексика Миллий политехника институти, Мехико).

Ҳозирги кунда жаҳонда яримўтказгичли структураларга электромагнит

¹ Диссертация мавзуси бўйича халқаро илмий-изланишлар шарҳи Holmium-related luminescence in crystalline silicon // Materials Science Engineering, V.B81, p.176-178 (2001) ва бошқа манбаалар асосида бажарилган.

майдони, ёруғлик ва деформация таъсирида ток характеристикаларининг шаклланиш жараёнларини тадқиқ қилиш устида бир қатор, жумладан, қуйидаги устивор йўналишларда тадқиқотлар олиб борилмоқда: яримўтказгичли р-п-ўтишларда аномал катта тензосезгирликни юзага келиш механизмлари, квазибирўлчамли электрон газнинг ҳолатлар зичлиги ва энергетик сатҳларига ҳароратнинг таъсири, кристалл панжара тебраниши ва энергетик сатҳларнинг ҳароратга боғлиқлиги, электр юритувчи куч ва тоқларнинг генерацияланиш жараёнлари устида назарий ва амалий тадқиқотлар олиб бориш.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Илк бор яримўтказгичларнинг деформацион хоссалари Ч. Смит (Англия) томонидан ўрганилган бўлиб, бунда германий ва кремнийларнинг қаршилигига бир ўқ бўйлаб деформациянинг таъсири тадқиқ этилган.

АҚШнинг New Hampshire университети олимлари Н.Н. Hall раҳбарлигида германийли р-п-ўтишнинг қаршилигига босим ва ҳароратнинг таъсирини ўрганишган ва паст кучланишларда уларнинг экспоненциал боғлиқлигини аниқлашган. The American Institute of Physics университети олимлари томонидан олиб борилган тадқиқотлар яримўтказгичли диодларга юқори частотали гармоник сигналлар таъсирида вольтампер характеристикаларининг шаклланиш жараёнларини тадқиқ этишга бағишланган.

Хозирги пайтда А.Ф. Иоффе номи Физика-техника институтида (Россия) профессор А.И. Вейнгер² бошчилигида $p_p \gg n_n$ (n_n ва p_p лар п- ва р-соҳадаги асосий заряд ташувчилар концентрацияси) бўлган ҳол учун ўтаюқоричастотали майдондаги кремнийли р-п-ўтишларда экспериментал натижалар олинган бўлиб, бунда тескари кучланишларда ҳам мусбат тоқлар кузатилиши мумкинлиги кўрсатиб берилган.

Ўтаюқоричастотали майдон таъсирини тадқиқ этишда К.М. Алиев³ ва бошқа россиялик олимлар ўз ҳиссаларини қўшганлар, бунда улар фазалар портретининг трансформация жараёнларини ўрганиб чиққанлар.

Мамлакатимизда Г. Гулямов⁴ ва М. Дадамирзаев томонидан ўтаюқоричастотали майдонда электрон ва фононларнинг кизишида ўлчамга боғлиқ бўлган ички электростатик майдонли р-п-ўтишларда иссиқлик эффектларининг кучайиши ўрганилган. Заряд ташувчиларнинг нотекис кизиши натижасида юзага келувчи уюрмали тоқлар тадқиқ этилган ва яримўтказгич структураларга ёруғлик, деформация ва ўтаюқоричастотали майдон таъсири тадқиқ этилган.

Шуларга қарамай фундаментал ютилиш чегарасида ёритилган

² Аблязимова Н.А., Вейнгер А.И., Питанов В.С. Электрические свойства кремниевых р-п переходов в сильных СВЧ полях. // ФТП. 1988, т.22, вып.1, с. 2001.

³ Алиев К.М., Камилов И.К., Ибрагимов Х.О., Абакарова Н.С. Отрицательное дифференциальное сопротивление N-типа, гистерезис и осцилляции на вольт-амперных характеристиках сверхвысокочастотных диодов // Физика и техника полупроводников. – Санкт-Петербург, 2012, т. 46. №8. – С. 1082–1087.

⁴ Shamirzaev S.H., Gulyamov G., Dadamirzaev M.G., Gulyamov A.G. Eddy Currents Appearing in a p-n Junction in a High Microwave Field // Semiconductors. –USA, 2011, -vol. 45, No.8, pp. 1035–1037.

яримўтказгичли структураларга деформация ва ўта юқори частотали майдоннинг таъсири билан боғлиқ муаммолар ҳал этилмай қолмоқда.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Физика-техника институти илмий-тадқиқот ишлари Ф.2-1.55 рақамли «Яримўтказгичларда электрйоритувчи кучларнинг юзага келишининг янги механизмлари» (2003-2007); ОТ-Ф2-077 рақамли «Яримўтказгич пардаларда деформацион эффектлар динамикаси ва уларда юзага келувчи тоқларга электромагнит тўлқинларнинг таъсири» (2007-2011) мавзусидаги лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади яримўтказгич ва яримўтказгичли структураларда кечадиган физик жараёнларга кучли электромагнит майдон, ёруғлик ва деформация таъсирини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

вакуумли чанглатиш натижасида олинган Bi_2Te_3 ва Sb_2Te_3 тензосезгир пленкаларда юзага келувчи аномал катта қийматга эга тензосезгирлик коэффицентини тушунтириб берувчи потенциал тўсиқлар системаси моделини қуриш;

потенциал тўсиқлар системаси модели асосида деформация потенциали доимийсини баҳолаш;

хусусий ёруғлик билан ёритилган р-п-ўтишда доимий деформация таъсирида тензосезгирликни бошқариш мумкинлигини аниқлаш;

яримўтказгичли фотоэлементларда генерацияланаётган фототоқлар ва фотоэлектр йоритувчи кучларни деформация ва ўта юқори частотали майдон таъсирида бошқариш мумкинлигини аниқлаш.

Яримўтказгичлардаги генерацион - рекомбинацион жараёнларни тушунтиришда фазалар портретидан фойдаланиш мумкинлигини аниқлаш;

квазибирўлчамли электрон газнинг ҳолатлар зичлиги ва энергетик сатҳларининг иссиқлик кенгайишини тадқиқ қилиш;

кристалл панжара тебраниши ва энергетик сатҳларнинг иссиқлик кенгайиши билан боғлиқ энергетик тирқишларнинг ҳароратга боғлиқлигини тадқиқ қилиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида яримўтказгичли *p-n*-ўтишлар, юпқа яримўтказгичли пардалар, FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 и $\text{MnIn}_5\text{S}_{8.5}$ монокристаллар олинган.

Тадқиқотнинг предмети ёруғлик, деформация ва ўта юқори частотали майдон таъсир этганда р-п-ўтишда тоқ характеристикаларининг шаклланиш жараёнлари, Ван Ховнинг сингуляр нуқталари яқинида яримўтказгичли р-п-ўтишларда аномал катта тензосезгирликнинг юзага келиш механизмлари, температура таъсирида рухсат этилган соҳалардаги энергетик сатҳларнинг кенгайиш жараёнлари ҳисобланади.

Тадқиқотнинг усуллари. Қўйилган масалаларни ечишда назарий ҳисоблаш, компьютерли моделлаштириш ва фазалар портрети усуллари қўлланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

фундаментал ютилиш чегарасида деформация таъсирида тақиқланган соҳа кенглигини ўзгариши ҳисобига ютилиш коэффицентининг кескин ортиши натижасида р-п-ўтиш тензосезгирлигининг аномал катта қийматларга эришиши аниқланган;

р-п-ўтишнинг вольтампер характеристикасининг ёруғлик, деформация ва кучли ўта юқори частотали электромагнит майдони таъсирида ўзгариши электрон ва ковакларнинг Ферми квазисатҳларининг фарқи билан тушунтирилиши назарий асосланган;

ёруғлик ва деформация таъсирида фотоэлектрон ва фотоковаклар генерацияланиши натижасида диодларда манфий электр юритувчи куч ҳосил бўлиши, ўта юқори частотали тўлқин таъсирида эса электрон ва коваклар қизиши натижасида мусбат ишорали электр юритувчи куч пайдо бўлиши аниқланган;

ўзгарувчан деформация частотасининг заряд ташувчилар яшаш вақтига кўпайтмаси бирдан катта бўлганда фазалар портретининг шакли горизонтал кесмага айланиши, бирдан кичик бўлганда фазалар портретининг шакли вертикал кесма тусини олиши ва бирга тенг бўлганда эса фазалар портретининг шакли энг катта юза ҳосил қилиши аниқланган;

ўзгарувчан деформация таъсирида рекомбинация марказларининг ортиши фазалар траекториясининг спиралсимон равишда кичик қийматлар томон ўралиб бориши, рекомбинацион марказларнинг камайиши эса фазалар траекториясини спиралсимон равишда катта қийматлар томон очилиб бориши аниқланган;

$\text{MnIn}_5\text{S}_{8.5}$, FeIn_2S_4 ва CuIn_5S_8 монокристалларида электронларнинг панжара тебраниши билан бирга рухсат этилган соҳалардаги энергетик сатҳларнинг термик кенгайиши тақиқланган соҳа кенглигини тўлиқ ўзгаришига олиб келиши аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

диодли структурага ўтаюқоричастотали майдон таъсир этганда электр юритувчи кучнинг ҳосил бўлиш хоссаси, унинг ўтаюқоричастотали майдон индикатори сифатида ишлаш имкониятини очиб берган;

тензосезгир р-п-ўтишни фундаментал ютилиш чегарасидаги нур билан ёритиш ҳисобига унинг босимга сезгирлигини кўп карра ошириш имконияти тензодатчикнинг иш диапазонини кенгайтириш учун ишлатилиши мумкин.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги ҳисоб ишларининг етакчи мутахассислар томонидан ўтаюқоричастотали диодлар учун олган натижалари билан мос келиши, тадқиқот объектлари ва усуллариининг тўғри танлангани, ечимларнинг аниқлиги баҳолангани, экспериментал натижалар билан солиштирилгани ва сонли экспериментлар ўтказилгани билан асосланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти р-п-ўтишга ёруғлик, деформация ва ўтаюқоричастотали майдон таъсир этганда содир бўладиган жараёнларни янгича талқин қилишга имкон беради.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундаки, критик нуқталар яқинида аномал катта тензосезгирлик ҳосил қилиш бўйича олинган натижалар янги ўтасезгир тензодатчиклар ишлаб чиқаришда қўлланилиши мумкин.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Яримўтказгичли структураларнинг динамик характеристикаларига деформация ва кучли электромагнит майдоннинг таъсирини аниқлаш бўйича олинган натижалар асосида:

кучли электромагнит майдони, ёруғлик ва деформация таъсирида яримўтказгич ва яримўтказгичли структураларда кечаётган физик жараёнларга назарий ёндашишлари «Transporte Mono- у Bipolar en Estructuras Semiconductoras» мавзудаги хорижий грант лойиҳасида яримўтказгичли структураларнинг деформация ва электромагнит таъсиридаги динамик характеристикаларини тушунтиришда қўлланилган (Мексика Миллий политехника институтининг 2017 йил 15 февралдаги 615-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш ташқи таъсир натижасида энергетик сатхларда содир бўладиган жараёнларни тушунтириш имконини берган;

ёруғлик, ўта юқори частотали майдон ва деформация таъсирида юзага келувчи ток ва электр юритувчи кучларнинг янги механизмлари бўйича олинган натижалар 14-02-00033 рақамли «Светоиндуцированные эффекты в асимметричных наноструктурах» мавзусидаги хорижий грант лойиҳасида р-п-ўтишнинг вольтампер характеристикасининг ўзгариш механизмини аниқлашда фойдаланилган (Россия Фанлар академияси Сибир бўлинмаси Яримўтказгичлар физикаси институтининг 2017 йил 29 августдаги 15307-46-2433-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш яримўтказгичли наноструктураларнинг ва квант нуқталарининг оптик хоссаларига кучли электромагнит майдон таъсирини аниқлаш имконини берган;

хусусий ютилиш чегарасида деформация эффектларининг янгича талқини, яримўтказгичли фотоэлементларда генерацияланаётган фототоклар ва фотоэлектр юритувчи кучларни деформация ва ўта юқори частотали майдон таъсиридаги назарий ҳисоблари ОТ-2Ф-076 рақамли «Юқори самарали фотоқайд қилгичлар яратиш мақсадида квант нуқтали наноўлчамли гетероструктуралардаги экситонлар, поляронлар ва кўчиш ходисаларини ўрганиш» мавзусидаги грант лойиҳасида (2007-2011) қўлланилган (Ўзбекистон Республикаси Фан ва технологиялар агентлигининг 2017 йил 28 августдаги ФТА-02-11/560-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш яримўтказгичли структураларда ёруғликнинг ютилиш коэффицентини бошқариш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси.

Диссертация ишининг натижалари 11 та халқаро ва 3 та республика илмий-амалий анжуманида маъруза қилиниб, муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 25 та илмий иш чоп этилган, шулардан Ўзбекистон

Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 11 та мақола нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, бешта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва 4 та илова, 54 та расм ва 2 та жадвалдан иборат. Диссертация ҳажми 184 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, мавзу бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи, муаммонинг ўрганилганлик даражаси келтирилган, тадқиқот мақсади, вазифалари, объекти ва предмети тавсифланган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг назарий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар берилган.

Диссертациянинг **«Яримўтказгичли структураларнинг босим ва ўтаюқоричастотали майдон билан таъсирлашувининг замонавий ҳолатининг шарҳи»** деб номланган биринчи бобида ўтаюқоричастотали майдоннинг яримўтказгичли структураларга ҳамда ташқи деформациянинг яримўтказгичли структураларга таъсири ва фазалар портретларининг яримўтказгичларни тадқиқ қилишдаги ўрни ҳақидаги адабиётлар шарҳи келтирилган. Мавжуд маълумотларнинг назарий ва экспериментал таҳлили натижасида вазифаларнинг қўйилиши шакллантирилган.

Диссертациянинг **“Ёруғлик ва деформацияни яримўтказгичли структураларнинг тензосезгирлигига таъсири”** номли иккинчи бобида вакуумли чанглатиш натижасида олинган Bi_2Te_3 ва Sb_2Te_3 яримўтказгичли плёнкаларнинг потенциал тўсиқлар тизимидаги тензорезистив эффектлар тадқиқ этилган. Тензосезгирлик коэффициенти K учун қуйидаги ифода олинган:

$$K = \frac{2}{\hbar} \sqrt{2m(U-E)} \cdot l_0 \frac{a+l_0}{l_0} = K_0 \frac{a+l_0}{l_0}. \quad (1)$$

Кетма-кет потенциал тўсиқлар тизими модели, вакуумли чанглатиш натижасида олинган Bi_2Te_3 ва Sb_2Te_3 яримўтказгичли плёнкалардаги аномал катта бўлган тензосезгирлик коэффициентининг юзага келиши тушунтириб берилган.

Наноструктуралардаги потенциал тўсиқлар тизими тадқиқ этилган. Крониг-Пенни моделига асосан тўлқин векторининг энергияга боғлиқлигини ифодаловчи қуйидаги ифода олинган:

$$k(E, b) = \frac{\arccos\left(\frac{\beta^2 - \alpha^2}{2\alpha\beta} \operatorname{sh}(\beta b) \sin(\alpha a) + \operatorname{ch}(\beta b) \cos(\alpha a)\right)}{a + b} \quad (2)$$

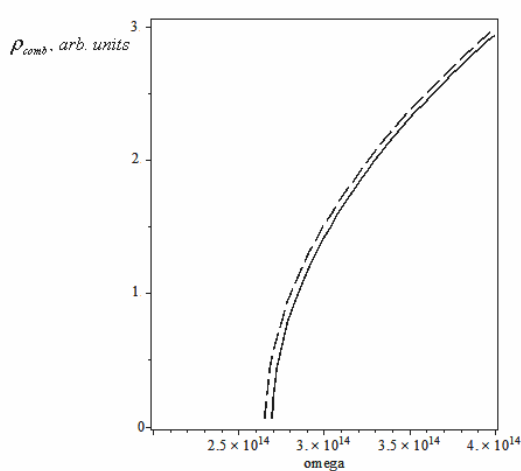
бу ерда: $\beta = \sqrt{\frac{2m_0 E}{\hbar^2}}$, $\alpha = \sqrt{\frac{2m_0(U-E)}{\hbar^2}}$

Сўнгра олинган графиклар орқали тақиқланган соҳа кенглиги $\delta E = E_2 - E_1$ ва потенциал тўсиқлар кенгликлари қанчалик $\delta b = b_2 - b_1$ ўзгарганини билган ҳолда (3) ифода орқали деформация потенциали доимийси аниқланган:

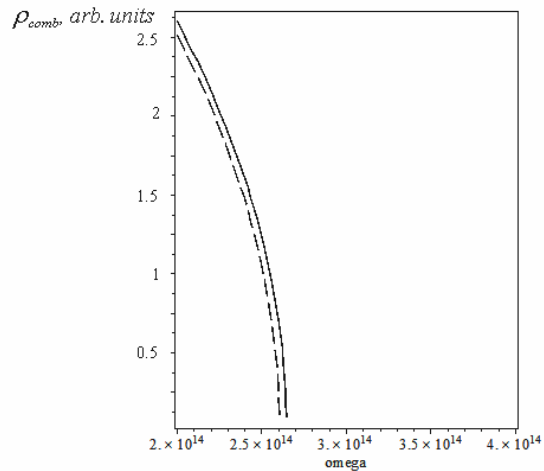
$$\Xi = \frac{\delta E}{\varepsilon} \quad (3)$$

Шундай қилиб, Крониг-Пенни модели асосида олинган графиклар маълумотлари ёрдамида деформация потенциали доимийсини аниқлаш мумкинлиги кўрсатиб берилган.

Бундан ташқари ёритилган р-п-ўтишнинг тензосезгирлиги тадқиқ этилган. Бунда асосий эътиборни ёруғликнинг ютилиш коэффициентига деформациянинг таъсирига қаратилган. Ютилиш коэффициентини ўрганишда ҳолатлар зичлиги функциясидаги Ван Хов сингуляр нукталарига алоҳида эътибор қаратилган. Босим орқали яримўтказгичларнинг ютилиш коэффициентини бошқариш мумкинлиги кўрсатиб берилган, бу эса ўз ўрнида Ван Ховнинг критик нукталарини жиқдириш имконини беради (1 расмга қаранг).



а) М0 минимум нуктаси. Узлуксиз эгри чизик деформациясиз ва пунктир эгри чизик деформация билан бўлган ҳолатлар учун. Нисбий деформация $\varepsilon = 10^{-3}$ қийматга эга.



б) М3 максимум нуктаси. Узлуксиз эгри чизик деформациясиз ва пунктир эгри чизик деформация билан бўлган ҳолатлар учун. Нисбий деформация $\varepsilon = 10^{-3}$ қийматга эга.

1 расм. Критик нукталар яқинидаги комбинирланган ҳолатлар зичлиги

Ёритилган р-п-ўтишнинг тензосезгирлик коэффициенти учун қуйидаги ифодалар олинди:

$$K = \frac{\delta R}{R_0 \varepsilon}, \quad \frac{\delta R}{R_0} = -\frac{\frac{U}{J_d^2} \delta J}{\frac{U}{J_d}} = -\frac{\delta J}{J_d},$$

$$K_I = \frac{\delta j_d}{j_d \delta \varepsilon} + \frac{\delta j_I}{j_d \delta \varepsilon} = \frac{\delta j_d}{j_d \delta \varepsilon} \left(1 + \frac{\delta j_I}{\delta j_d} \right) = K_d \left(1 + \frac{\delta j_I}{\delta j_d} \right) \approx K_d \frac{\delta j_I}{\delta j_d} \gg K_d; \quad J_I = \frac{\beta e \alpha I_0}{\hbar \omega}, \quad \frac{\delta j_I}{\delta j_d} \gg 1 \quad (4)$$

Бу ерда K_d – коронгуликдаги тензосезгирлик, δR – қаршиликни ўзгариши, R_0 – бошланғич қаршилик, j_I – фототок, j_d – коронгуликдаги ток, ε – нисбий деформация.

Ёритилган р-п- ўтишнинг тензосезгирлигини ўзгармас деформация ε , ёруғлик частотаси ω ва интенсивлиги I орқали боқариш мумкинлиги ҳақида ҳулоса қилинган. Критик нукталар яқинида ютилиш коэффиценти кескин ўсиши мумкинлиги ва бунинг натижасида ютилиш коэффиценти аномал катта қийматлар қабул қилиши кўрсатиб берилган.

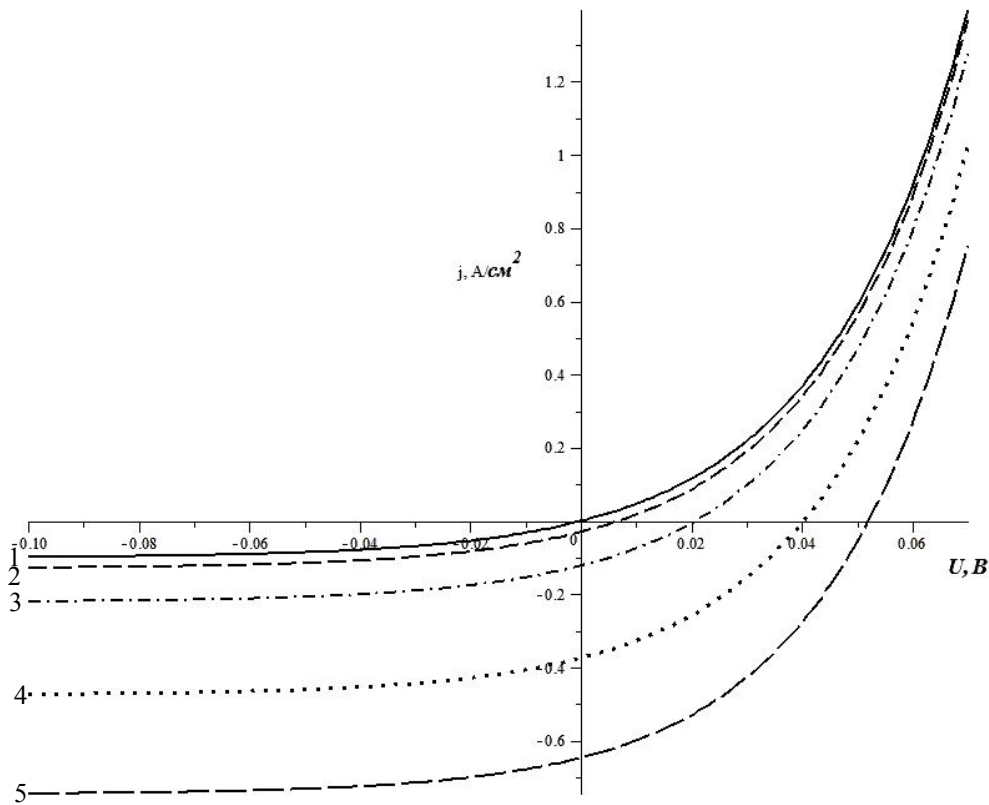
Диссертациянинг **“Яримўтказгичли структураларда деформация таъсирида фототоклар ва фотоэлектрюритувчи кучларнинг ўзгариши”** деб номланган учинчи бобида р-п-ўтишда юзага келувчи фототоклар ва фотоэлектрюритувчи кучларга деформациянинг таъсири тадқиқ этилган. Хусусий ёруғлик билан ёритилган р-п-ўтишда юзага келувчи фототок ва фотоэлектрюритувчи кучларга деформациянинг таъсири кўриб чиқилган. Хусусий ёруғлик билан ёритилган р-п-ўтишнинг вольтампер характеристикаси учун қуйидаги формула олинган:

$$j = j_s \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) - \frac{e \beta I A (\Xi \varepsilon)^r}{h \nu} \quad (5)$$

2 расмда р-п-ўтиш учун вольтампер характеристика келтирилган. Бунда уч хил ҳолат кўрилган, ёруғлик ва деформация таъсир этмаган ҳолат, хусусий ёруғлик билан ёритилган, аммо деформациясиз бўлган ҳолат ҳамда хусусий ёруғлик билан ёритилиб, турли қийматлардаги деформация таъсир этган ҳолатлар.

Олиб борилган тадқиқотлар натижасига кўра қуйидаги ҳулосалар қилинган. Фундаментал ютилиш чегарасида хусусий ёруғлик билан ёритилганда яримўтказгич деформацияга таъсирчан бўлиб қолади. Бу ташқи деформация ёрдамида электрон ва коваклар фотогенерацияси тезлигини бошқариш имконини беради. Ушбу ҳолатда яримўтказгичли фотоэлементларнинг фототоклари ва фотоэлектрюритувчи кучларини бошқариш имконияти пайдо бўлади.

Шунингдек, бу бобда р-п-ўтишнинг ўтаюқоричастотали майдондаги термодинамикаси кўриб чиқилган. Потенциал тўсиқни электромагнит тўлқин билан модуляцияси диод базасида заряд ташувчилар инжекциясини орттириши кўрсатиб берилган. Ушбу жараён электрон ва коваклар рекомбинациясини орттириб беради, бу эса манфий тескари кучланишларда ҳам диод орқали тўғри ток ўтишини таъминлайди. Турли интенсивликларда ёруғлик бериш орқали ўтаюқоричастотали майдонидаги диодда генерацияланаётган электрюритувчи кучнинг қиймати ва ишорасини ўзгартириш мумкин.



1–ёруғлик ва деформациясиз, 2– деформациясиз ёритилганда, 3–ёруғлик ва деформация ($\varepsilon=10^{-6}$) таъсирида, 4– ёруғлик ва деформация ($\varepsilon=10^{-5}$) таъсирида, 5– ёруғлик ва деформация ($\varepsilon=3 \cdot 10^{-5}$) таъсирида.

2-расм. Тўғри соҳали яримўказгич p-n-ўтиши учун вольтампер характеристика

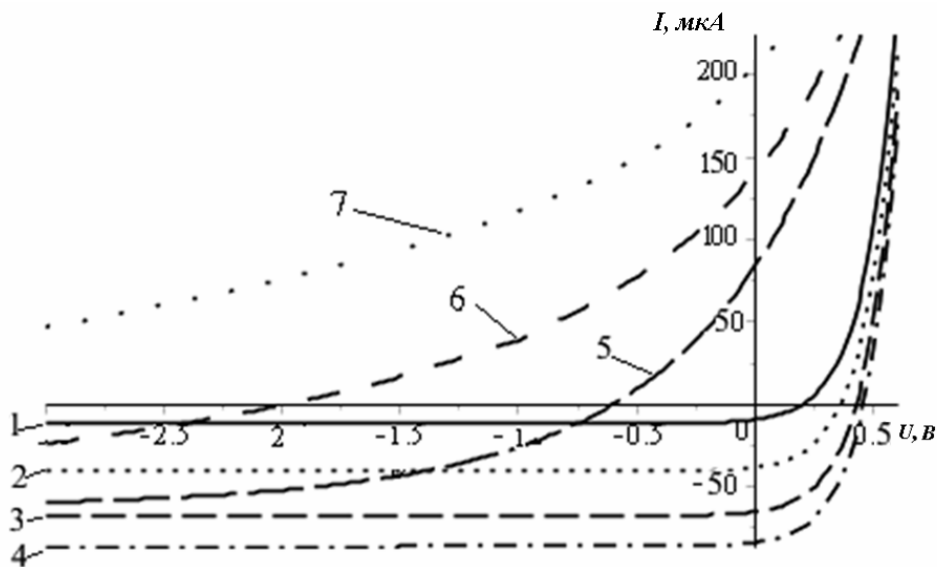
Ўтаюқоричастотали майдонидаги p-n-ўтиш вольтампер характеристикаига ёруғлик ва деформациянинг таъсири тадқиқ этилган. 3-расмда p-n-ўтишнинг вольтампер характеристикаи келтирилган, бунда 1-эгри чизик хусусий ёруғлик билан ёритилган ҳолат учун, 2-, 3-, 4-эгри чизиклар хусусий ёруғлик билан ёритилиб деформация таъсир этган ҳоллар учун, 5-, 6-, 7-эгри чизиклар кучли ўтаюқоричастотали майдон таъсир этган ҳол учун келтирилган график (5) ва (6) ифодалар орқали назарий ҳисобланган.

$$j = j_{sn} \left(\left(\frac{T_e}{T} \right)^{1/2} e^{\frac{e\varphi_0}{kT} - \frac{e(\varphi_0 - U - U_1 \cos(\omega t))}{kT_e}} - 1 \right) + j_{sp} \left(\left(\frac{T_h}{T} \right)^{1/2} e^{\frac{e\varphi_0}{kT} - \frac{e(\varphi_0 - U - U_1 \cos(\omega t))}{kT_h}} - 1 \right) \quad (6)$$

3-расмнинг таҳлили шуни кўрсатадики, хусусий ёруғлик билан ёритилган p-n-ўтишга деформация таъсир этганда, вольтампер характеристика эгри чизиклари j - U текисликда пастга ва ўнг томонга силжийди. Ўтаюқоричастотали майдон таъсир этганда эса p-n-ўтишнинг вольтампер характеристика эгри чизиклари юқорига ва чап томонга силжийди. Ўтказилган тадқиқотлар натижасида куйидагича хулоса қилиш мумкин. Фундаментал ютилиш чегарасида хусусий ёруғлик билан ёритилганда яримўтказгич деформацияга таъсирчан бўлиб қолади. Ушбу ҳолда яримўтказгичли фотоэлементларда юзага келувчи қисқа туташув токи ва салт

юриш кучланишини бошқариш имконияти пайдо бўлади. Кучли ўтаюқоричастотали майдон таъсир этганда эса р-п-ўтишнинг вольтампер характеристика эгри чизиқлари $j-U$ текислигинин II чораги томон кўчади. Шундай қилиб, ёруғлик, деформация ва кучли ўтаюқоричастотали майдон тасирида р-п-ўтишнинг вольтампер характеристикани бошқариш мумкин, бу эса р-п-ўтиш асосида яратилган фотоэлементлар ва диодлар характеристикаларини бошқариш имконини беради.

Бундан ташқари иссиқ электрон ва ковакларнинг Ферми квазисатҳлари ва ёритилган р-п-ўтишда юзага келувчи электрйоритувчи кучлар тадқиқ этилган. р-п-ўтишни хусусий ёруғлик билан ёритилганда, фотоэлементда



1– деформациясиз, хусусий ёруғлик билан ёритилган ҳолат учун, 2– $\epsilon = 10^{-5}$ катталиқдаги нисбий деформация ҳамда хусусий ёруғлик билан ёритилган ҳолат, 3 – $\epsilon = 3 \cdot 10^{-5}$ катталиқдаги нисбий деформация ҳамда хусусий ёруғлик билан ёритилган ҳолат, 4– $\epsilon = 5 \cdot 10^{-5}$ катталиқдаги нисбий деформация ҳамда хусусий ёруғлик билан ёритилган ҳолат, 5– ёруғликсиз, деформациясиз ва ўтаюқоричастотали майдонининг импульсли таъсири остида (электронлар температураси 500 К, коваклар температураси 350 К), 6 – ёруғликсиз, деформациясиз ва ўтаюқоричастотали майдонининг импульсли таъсири остида (электронлар температураси 700 К, коваклар температураси 500 К), 7– ёруғликсиз, деформациясиз ва ўтаюқоричастотали майдонининг импульсли таъсири остида (электронлар температураси 1000 К, коваклар температураси 700К).

3-расм. Ёруғлик, деформация ва кучли ўтаюқоричастотали майдон таъсир этгандаги р-п-ўтишнинг вольтампер характеристикаси

генерацияланаётган фотоэлектрйоритувчи кучни босим орқали Ферми квазисатҳларини ўзгартирган ҳолда бошқариш мумкинлиги кўрсатиб берилган. Ёруғликни фундаментал ютилиш чегарасида электрон ва ковакларнинг Ферми квазисатҳларининг деформацияга боғлиқлигини ифодаловчи қуйидаги формулалар олинган:

$$F_n = kT \ln \left(\frac{n_0 + \beta I_0 A \epsilon^{\frac{1}{2}}}{N_c} \right) \quad (7),$$

$$F_p = kT \ln \left(\frac{p_0 + \beta I_0 A \varepsilon^{\frac{1}{2}}}{N_v} \right) \quad (8)$$

(7) ва (8) ифодалардан кўришиб турибдики, деформация фотоэлектронлар ва фотоковаклар концентрациясини оширади. Бу эса электронларни Ферми квазисатҳларини ўтказувчанлик соҳаси томонга, ковакларни Ферми квазисатҳларини валент соҳа томонига кўчишига олиб келади.

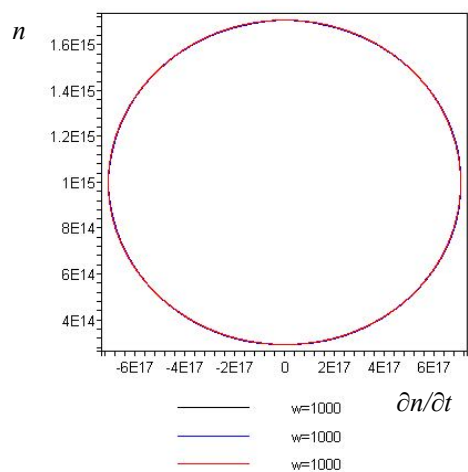
Электрон-ковак газининг қизишида квазисатҳларнинг кўчиши электрон ва ковакларнинг ҳароратини ортиши ҳисобига амалга ошади:

$$F_e - E_c = \frac{kT_e}{e} \ln \left(\frac{n}{N_c} \right), \quad n = N_c e^{\frac{F_e - E_c}{kT_e}} \quad (9),$$

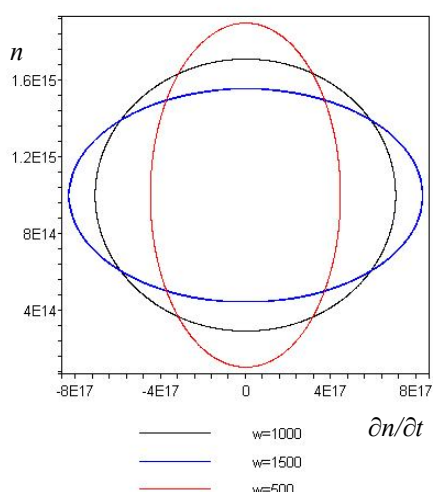
$$E_v - F_h = \frac{kT_h}{e} \ln \left(\frac{p}{N_v} \right), \quad p = N_v e^{\frac{E_v - F_h}{kT_h}}. \quad (10)$$

Электронлар ҳарорати ортиши билан уларнинг Ферми квазисатҳлари ўтказувчанлик соҳасидан валент соҳа томонга кўчади, ковакларнинг Ферми квазисатҳлари эса валент соҳадан ўтказувчанлик соҳаси томонга кўчади. Шунини таъкидлаб ўтиш керакки, заряд ташувчиларнинг ўтаюқоричастотали майдон таъсирида қизиши натижасида Ферми квазисатҳларининг силжиши, ёруғлик таъсиридаги силжишидан принципно фарқ қилади. Ферми квазисатҳларининг ёруғлик ва ўтаюқоричастотали майдон таъсирида бундай ўзини тутишлари р-п-ўтишда юзага келувчи электрйоритувчи кучларнинг қийматлари ва ишораларида акс этади. Бу 3- расмда келтирилган вольтампер характеристика натижаларини тушунтириб беради.

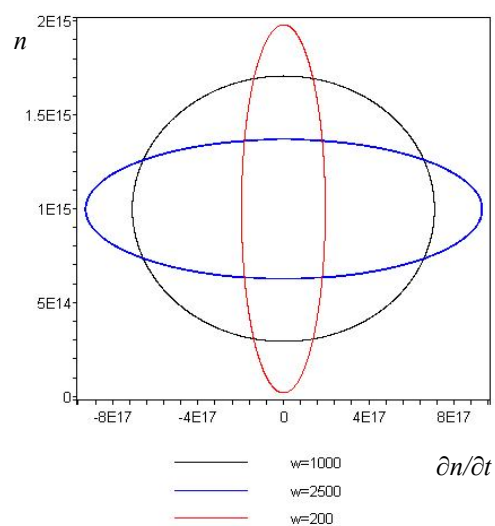
Диссертациянинг **“Ёритилган яримўтказгичлар деформацион эффектларининг фаза портретлари”** номли тўртинчи бобида яримўтказгичлардаги генерацион-рекомбинацион жараёнлани тадқиқ этишда фазалар портрети қўлланилади, 4-расм. Ўзгарувчан деформация частотаси 1000 гц қийматга эга бўлганда фазалар портретининг юзаси энг катта бўлади (4 (а)-расмга қаранг). Яъни $\omega \cdot \tau = 1$ бўлганда фазалар портрети энг катта юзага эга бўлади, заряд ташувчилар генерация ва рекомбинацияси аста секинлик билан амалга ошади. Ўзгарувчан деформация частотаси ўзгариши билан фазалар портретларининг шакллари ўзгара бошлайди (4 б,с,д,е,ф расмларга қаранг). Ўзгарувчан деформация частотаси ортиб, частота ва яшаш вақтларининг кўпайтмаси $\omega \cdot \tau \gg 1$ бўлганда фазалар портретининг шакли горизонтал кесмага айцланади (4 ф расмга қаранг), яъни заряд ташувчиларнинг генерация ва рекомбинацияси деярли сезилмайди.



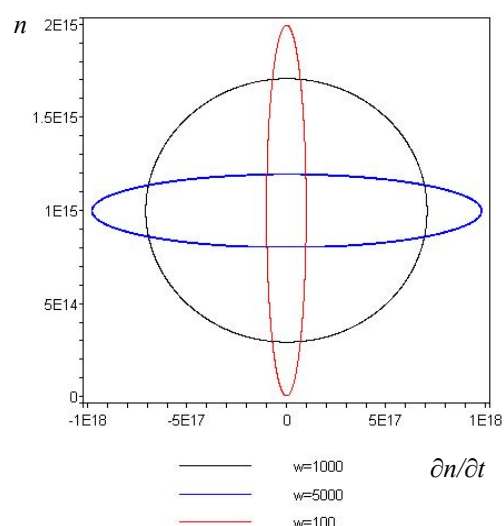
a)



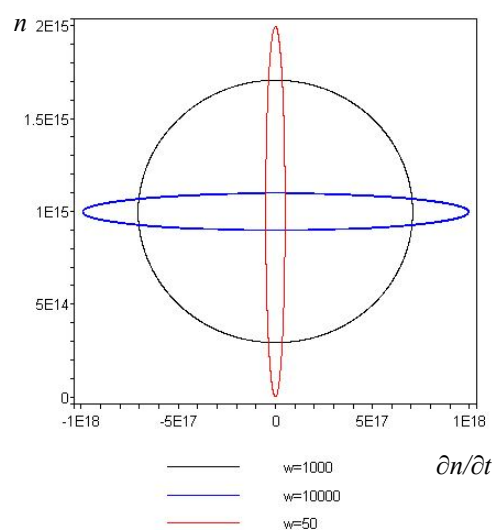
b)



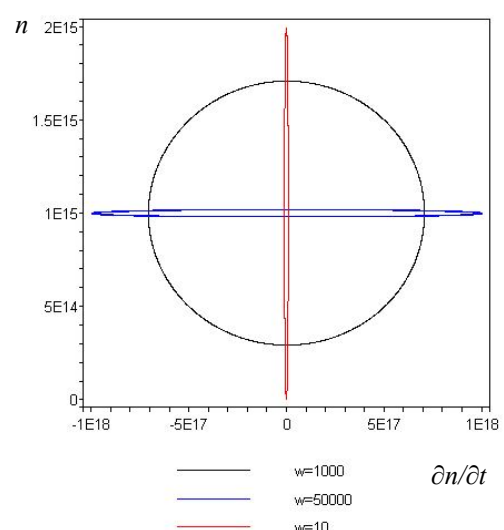
c)



d)



e)



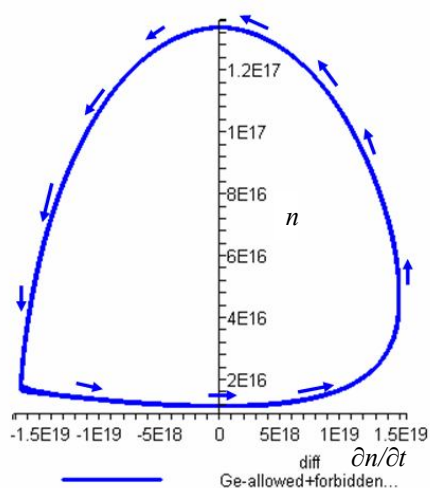
f)

4 расм. Концентрация n нинг $\frac{\partial n}{\partial t}$ га боғлиқлигининг фазалар портрети

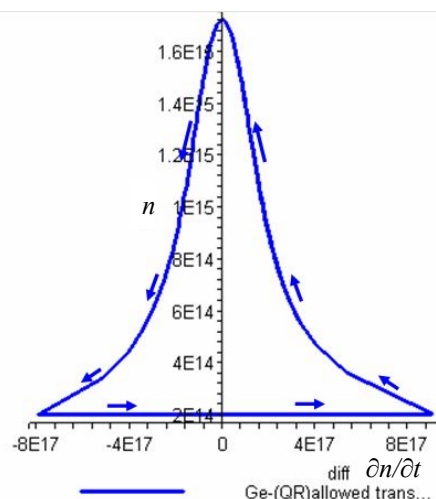
Тескари холда эса, яъни ўзгарувчан частота минимал қийматга эга бўлиб $\omega \cdot \tau \ll 1$ бўлганда фазалар портретининг шакли вертикал кесма кўринишига эга бўлади (4 f расмга қаранг), бу ерда заряд ташувчиларнинг генерация ва рекомбинацияси кескин намоён бўлади.

Шундай қилиб, фазалар портретининг шакли бизга заряд ташувчилар концентрацияси ва унинг ўзгариш тезлигида ўзгарувчан деформация частотаси қандай акс этиши ҳақида маълумот беради.

Фазалар портрети услуби орқали чизикли ва квадратик рекомбинациялар аниқланган (5-расм).



а) чизикли рекомбинация учун



б) квадратик рекомбинация учун

5 расм. Тўғри рухсат этилган ўтишлар учун фазалар портрети

Чизикли рекомбинация учун олинган олинган фазалар портрети сиртмоқ шакли кўринишида, квадратик рекомбинация учун олинган фазалар портрети пона шакли кўринишига эга эканлиги таъкидлаб ўтилди. Бу кўрилатган жараёнда қайси турдаги рекомбинация устунликка эга эканлиги ҳақида хулоса қилиш имконини беради. Агар фазалар портретининг шакли сиртмоқ шаклида бўлса, демак, бу ерда чизикли рекомбинация устунлик қилмоқда дейиш мумкин. Агар фазалар портретининг шакли пона кўринишига эга бўлса, у холда квадратик рекомбинация устунлик қияпти, деган хулосага келиш мумкин.

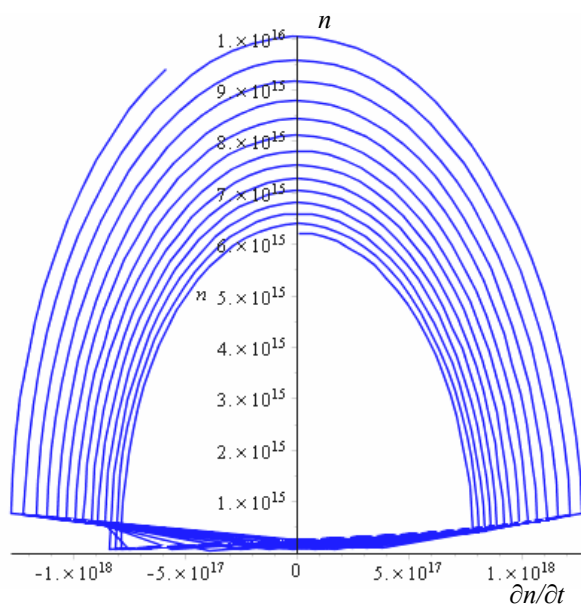
Фазалар портретининг анализи натижалари қуйидагича хулоса қилиш имконини беради:

- фазалар портретининг шакли бизга кўрилатган генерацион-рекомбинацион жараёнларда рекомбинациянинг қайси тури (квадратик ёки чизикли) кечаётганлиги ҳақида маълумот беради.

- Ҳам чизикли, ҳам квадратик рекомбинацияларда тўғри рухсат этилган ўтишлар учун заряд ташувчиларнинг концентрациялари фарқи, тўғри рухсат этилмаган ўтишлар учун бўлган концентрациялари фарқидан ортиқ бўлади.

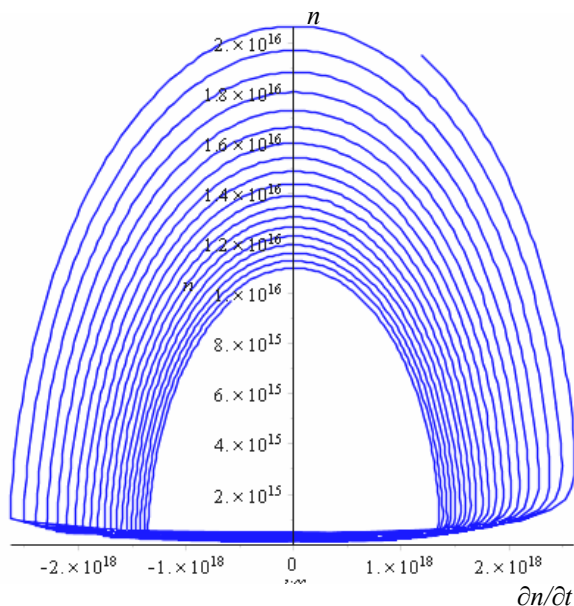
- Чизикли рекомбинациядаги заряд ташувчиларнинг фарқи, квадратик рекомбинациядаги заряд ташувчиларнинг фарқидан ортиқ бўлади.

Фазалар портретининг шаклига рекомбинацион марказларнинг таъсири тадқиқ этилган.



Рекомбинацион марказлар концентрацияси
 $N_t = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ дан $N_t = 8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ гача
 ўзгарган ҳол учун.

**6-расм. n нинг $\frac{dn}{dt}$ га боғлиқлигини
 ифодаловчи фазалар портрети**



Рекомбинацион марказлар концентрацияси
 $N_t = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ дан $N_t = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ гача
 ўзгарган ҳол учун.

**7-расм. n нинг $\frac{dn}{dt}$ га боғлиқлигини
 ифодаловчи фазалар портрети**

Генерацион-рекомбинацион жараёнларни фазалар портрети ёрдамида тадқиқ қилиш натижалари бизга қуйидагича хулосалар қилиш имконини беради:

– рекомбинацион марказларнинг ортиб бориши яримўтказгичдаги заряд ташувчиларнинг камайиши билан ифодаланади ва фаза траекторияси спирал кўринишида ҳам n , ҳам $\frac{dn}{dt}$ ўқлари бўйича кичик қийматлари томон ўралиб боради.

– рекомбинацион марказларнинг камайиб бориши яримўтказгичдаги заряд ташувчиларнинг ортиши билан ифодаланади ва фаза траекторияси спирал кўринишида ҳам n , ҳам $\frac{dn}{dt}$ ўқлари бўйича катта қийматлари томон очилиб боради. Фаза портретлари яримўтказгич асбобларининг диагностикасини олиб бориш имконини беради.

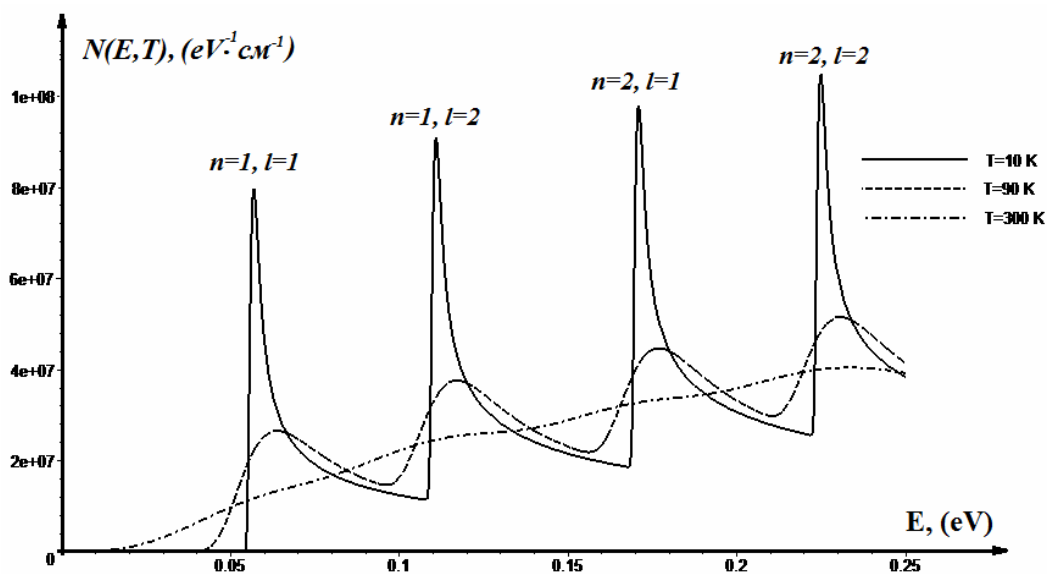
Диссертациянинг **“Яримўтказгичли структураларнинг энергетик сатҳларини температуравий боғлиқлиги”** номли бешинчи бобида квазибирўлчовли электрон газнинг энергетик сатҳлари ва ҳолатлар зичлигининг иссиқлик кенгайиши тадқиқ этилган. Ҳолатлар зичлигининг температуравий боғлиқлиги учун қуйидаги формула олинди:

$$N(E, T) = N_0 \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{\Theta(E' - E_1 n^2 - E_2 l^2)}{\sqrt{E' - E_1 n^2 - E_2 l^2}} GN(E', E, T) dE' =$$

$$= N_0 \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{kT \sqrt{E' - E_1 n^2 - E_2 l^2}} \exp \left[\frac{E' - E}{kT} - \exp \left(\frac{E' - E}{kT} \right) \right] dE' \quad (11)$$

(11) формула орқали ҳолатлар зичлигининг температуравий боғлиқлигининг графиги келтирилган. Бунда бирўлчовли электрон газ квант ип деб қаралиб, унинг ҳолатлар зичлигининг тепературавий боғлиқлиги, квантловчи магнит майдондаги уч ўлчовли электрон газнинг ҳолатлар зичлигининг тепературавий боғлиқлиги каби деб қаралади.

8-расмда бир ўлчовли электрон газнинг ҳолатлар зичлигининг энергияга боғлиқлик графиги келтирилган.



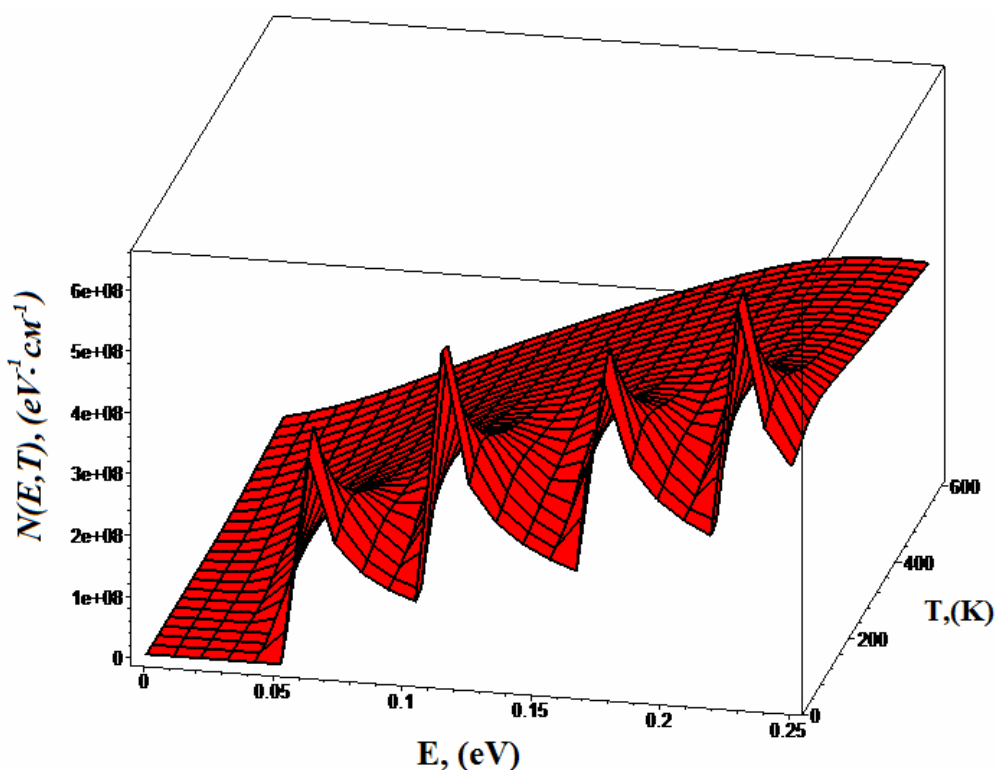
8-расм. Турли ҳароратдаги 1D электрон газининг ҳолатлар зичлигининг энергияга боғлиқлик графиги: $L_1=10^{-8}$ м ва $L_2=1,5 \cdot 10^{-8}$ м

Узлуксиз эгри чизиклар орқали $T=10$ К ҳароратда олинган ҳолатлар зичлиги келтирилган. Температуранинг ортиб бориши квантланган дискрет сатҳларнинг пиклари баландликларини кучли камайтиради. Кейинги температуранинг янада оширилиши ҳолатлар зичлиги пикларини янада силлиқлаб баланд бўлмаган дўнгликларга айлантиради. $T=300$ К ҳароратга келиб бир ўлчовли газ ҳолатлари зичлиги бир маромда ўсувчи энергиянинг функциясига айланиб қолади ва дискрет сатҳлар деярли сезилмай қолади.

9-расмда бир ўлчовли электрон газнинг ҳолатлар зичлиги температура ва энергияга боғлиқлигининг 3 ўлчовли графиги келтирилган.

9-расмдан кўриниб турибдики, температуранинг термодинамик ҳолатлари таъсири кучли. Паст температураларда бир ўлчовли электрон газ ҳолатлар зичлиги электрон энергиясини кучли осцилляцияловчи функция кўринишида бўлади. Ҳарорат ортиши билан ҳолатлар зичлиги осцилляциялари камайиб

боради ва юқори температурада бир маромда ўсувчи функцияга айланиб қолади.



$$L_1=10^{-8}\text{ м ва } L_2=1,5\cdot 10^8\text{ м}$$

9-расм. Турли хароратдаги 1D электрон газининг ҳолатлар зичлигининг энергияга боғлиқлигининг уч ўлчовли фазодаги графиги

Квант ўрадаги энергия қуйидагича аниқланади:

$$E_n = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = \frac{\hbar^2 (2\pi)^2 n^2}{2mL(T)^2}; \quad k = \frac{2\pi}{L} n; \quad L_n = L_0(1 + \alpha T); \quad E_n(T) = \frac{\hbar^2 n^2}{2mL_0^2(1 + \alpha T)^2} = \frac{E_n(0)}{(1 + \alpha T)^2};$$

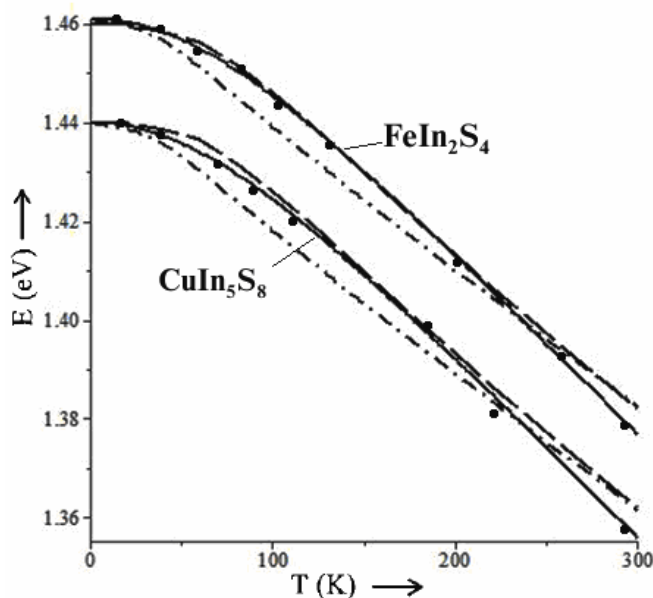
$$E_n(0) = \frac{\hbar^2 n^2}{2mL_0^2}; \quad E_n(T) = \frac{E_n}{(1 + \alpha T)^2}; \quad \alpha \ll 1; \quad E_n(T) = E_n(0) \frac{(1 - \alpha T)^2}{(1 - (\alpha T)^2)^2}; \quad E_n(T) \approx E_n(0)(1 - 2\alpha T)$$

$$\Delta E_n = \Delta E_n(0)(1 - 2\alpha T)$$

Шундай қилиб, $\alpha > 0$ бўлганда қўшни дискрет сатҳлар орасидаги масофа камайиб боради, $\alpha < 0$ бўлганда эса орадаги масофа температура ортиши билан ортиб боради. Бу экспериментал тасдиқлан. *Ge*, *Si* ва бошқа материалларда $\alpha > 0$ бўлиб, ҳақиқатан ҳам энергия ортиши билан ΔE_n камайиб боради, *PhS*, *PbTe* ва бошқа кўрғошин халкогенидларида $\alpha < 0$ ва тақиқланган зона кенглиги температура ортиши билан ортиб боради. Бу тақиқланган зона кенглигининг температуравий боғлиқлигида иссиқлик кенгайиш коэффициентининг роли ҳақида далолат беради. Ушбу ҳолат пастўлчамли яримўтказгич структуралари учун ҳам, массив яримўтказгичлар учун ҳам

тўғридир. Бу ҳодиса квант ипларида ҳам, квант нуқталарда ҳам кузатилиши керак.

Қуйидаги ишларда келтирилган^{5,6} кристалл панжаранинг тебраниши ва энергетик сатҳларнинг иссиқлик кенгайиши билан боғлиқ бўлган энергетик тирқишларнинг температурага боғлиқлиги ўрганилди, 10-расм.



Хар бир материал учун учта эгри чизик келтирилган: 1– узлуксиз эгри чизиклар бўлиб, булар Боднар И.В.^{5,6} ишларида олинган экспериментлардир; 2– штрих пунктир эгри чизиклари бўлиб, Кейс муносабатига асосан олинган эгри чизиклардир; 3 – штрих эгри чизиклари Кейс муносабатида иссиқлик кенгайишини ҳисобга олган ҳолда олинган.

10-расм. Тақиқланган зона кенглигининг температурага боғлиқлиги $FeIn_2S_4$ ⁵ ва $CuIn_5S_8$ ⁶ материаллари учун

Бу ишларда янги яримўтказгич материалларининг тақиқланган зона кенглигининг $E_g(T)$ температурага боғлиқлиги келтирилган. Кўриниб турибдики, температурага боғлиқлик яримўтказгичларга хосдир, температура пасайиши билан тақиқланган зона кенглиги ортади, 11-расм.

$E_g(T)$ боғлиқликни ифодалашда, шунингдек, Кейс муносабатидан ҳам фойдаланилган:

$$E_g = E_g(0) - C_V \alpha T \quad (12)$$

Бу ерда α –пропорционаллик коэффицентлари, C_V – ўзгармас ҳажмдаги иссиқлик сиғими.

Энергетик сатҳларнинг термик кенгайиши ҳисобга олинadиган бўлса, $E_g(T)$ боғланиш қуйидагича кўринишга эга бўлади:

$$E_g = E_g(0) - C_V \alpha T - \Delta E_g(T) \quad (13)$$

⁵ I. V. Bodnar and S. A. Pavlukovets, Semiconductors. Vol. 45, No. 11, pp. 1395–1398 (2011).

⁶ I. V. Bodnar, Semiconductors. Vol. 46, No. 5, pp. 602–605 (2012).

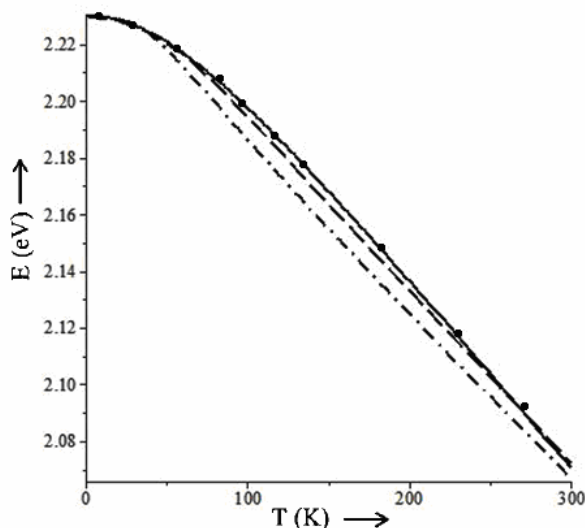
Бу тенгламанинг охирги ҳади валент зона ва ўтказувчанлик зонасининг энергетик сатҳларининг иссиқлик кенгайишини ифодалайди ва қуйидаги ифодалар билан аниқланади:

$$N_k = \sum_{i=1}^n N_i(E_i) GN(E_i, E, T),$$

$$E_g(T) = E_c(T) - E_v(T)$$

$$\Delta E_g(T) = E_g(0) - E_g(T).$$
(14)

Бу ерда N_k – ҳолатлар зичлигининг критик қиймати, $N_i(E_i)$ – абсолют нолдаги қиймати, $GN(E_i, E, T)$ – E_i – сатҳни тўлиш эҳтимоллигининг энергия бўйича ҳосиласи, $E_c(T), E_v(T)$ – мос равишда T ҳароратдаги ўтказувчанлик ва валент соҳалари энергияси қийматларини ифодалайди.



1 – узлуксиз эгри чизик Боднар И.В.⁷ ишида олинган экспериментал натижа; 2 – штрих пунктир эгри чизик Кейс муносабатига асосан олинган; 3 – штрих эгри чизик Кейс муносабатида иссиқлик кенгайишини ҳисобга олган ҳолда олинган.

11 расм. Тақиқланган зона кенглигининг температурага боғлиқлиги $MnIn_5S_{8.5}$ монокристалл учун⁶

$FeIn_2S_4$, $CuIn_5S_8$ ва $MnIn_5S_{8.5}$ монокристаллари учун тақиқланган зонанинг ҳароратли боғлиқлик графиклари олинди.

Тақиқланган зона кенглигининг температуравий боғлиқлигини тушунтириш учун энергетик сатҳларнинг термик кенгайиши улушини ҳисобга олиш зарурлиги кўрсатиб берилди. Тақиқланган зона кенглигининг тўлиқ ўзгариши электронларнинг кристалл панжара таъсирлашуви ҳисобига бўлганидек, рухсат этилган зоналардаги энергетик сатҳларнинг термик кенгайиши ҳисобига ҳам содир бўлади.

ХУЛОСА

Ўтказилган тадиқодлар асосида қуйидаги хулосалар қилинди:

1. Кетма-кет потенциал тўсиқлар тизими модели вакуумли чанглатиш натижасида олинган яримўтказгичли плёнкалардаги аномал катта бўлган тензосезгирлик коэффицентининг юзага келишини асослаб берилган.

2. Ёритилган p - n - ўтишнинг тензосезгирлигини ўзгармас деформация ε , ёруғлик частотаси ω ва интенсивлиги I орқали бошқариш мумкин. Критик нуқталар яқинида ютилиш коэффиценти кескин ўсиши мумкин ва бунинг натижасида p - n -ўтишнинг тензосезгирлик коэффиценти аномал катта қийматлар қабул қилиши кўрсатилган.

3. Фундаментал ютилиш чегарасида хусусий ёруғлик билан ёритилганда, яримўтказгич деформацияга таъсирчан бўлиб ташқи деформация ёрдамида электрон ва коваклар фотогенерацияси тезлигини бошқариш мумкинлиги аниқланган.

4. P - n -ўтишга ташқи таъсир қилинганда унинг вольтампер характеристикаси $j-U$ текислигининг жойлашиш чорагидан ўтишига қараб p - n -ўтиш қайси режимда эканлигини аниқланган.

5. Ўзгарувчан деформация частотасининг заряд ташувчиларнинг яшаш вақтига кўпайтмаси бирдан катта бўлганда $\omega \cdot \tau \gg 1$, фазалар портретининг (n ни $\frac{\partial n}{\partial t}$ га боғлиқлиги) шакли горизонтал кесмага айланиши, $\omega \cdot \tau \ll 1$ бўлганда эса фазалар портретининг шакли вертикал кесма тусини олиши ва $\omega \cdot \tau = 1$ бўлганда эса фазалар портретининг шакли энг катта юза ҳосил қилиши аниқланган.

6. Фазалар портретининг шакли бизга кўриладиган генерацион-рекомбинацион жараёнларда рекомбинациянинг қайси тури (квадратик ёки чизикли) кечаётганлиги таъкидланган.

7. Рекомбинацион марказларнинг ортиб бориши яримўтказгичдаги заряд ташувчиларнинг камайиши билан ифодаланади ва фаза траекторияси спирал кўринишида ҳам n , ҳам $\frac{\partial n}{\partial t}$ ўқлари бўйича кичик қийматлари томон ўралиб бориши кўрсатилган.

8. Рекомбинацион марказларнинг камайиб бориши яримўтказгичдаги заряд ташувчиларнинг ортиши билан ифодаланади ва фаза траекторияси спирал кўринишида ҳам n , ҳам $\frac{\partial n}{\partial t}$ ўқлари бўйича катта қийматлари томон очилиб бориши аниқланган.

9. Тақиқланган зона кенглигининг ҳароратга боғлиқлигини тушунтириш учун энергетик сатҳларнинг термик кенгайиши улушини ҳисобга олиб, тақиқланган зона кенглигининг тўлиқ ўзгариши электронларнинг кристалл панжара таъсирлашуви ҳисобига бўлганидек, руҳсат этилган зоналардаги энергетик сатҳларнинг термик кенгайиши ҳисобига ҳам содир бўлиши топилган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА НАУК DSc. 27.06.2017. FM./T.34.01 при ФИЗИКО-
ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ, ИНСТИТУТЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ
И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, САМАРКАНДСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ГУЛЯМОВ АБДУРАСУЛ ГАФУРОВИЧ

**ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ И СИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
ПОЛЯ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР**

01.04.10 – физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА (DSc)
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК**

Ташкент – 2017 год

Тема докторской диссертации зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан, за номером B2017.2.DSc/FM36

Докторская диссертация выполнена в Физико-техническом институте АН РУз.

Полный текст докторской диссертации размещен на веб-сайте Научного совета 16.07.2013.FM/T.12.01 при Физико-техническом институте, Институте Ионно-плазменных и лазерных технологий и Самаркандском государственном университете по адресу fti-kengash.uz.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский) размещен на веб-странице по адресу fti-kengash.uz и Информационно-образовательном портале "ZiyoNet" по адресу www.ziyo.net.uz.

Научный консультант: **Аюханов Рашид Ахметович**
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: **Мамадалимов Абдугафур Тишабаевич**
доктор физико-математических наук, академик

Имамов Эркин Зуннунович
доктор физико-математических наук, профессор

Расулов Рустам Явкачович
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: **Андижанский Государственный университет**

Защита диссертации состоится «__» _____ 2017 года в ____ часов на заседании Научного совета DSc.27.06.2017. FM/T.34.01 при Физико-техническом институте, Институте Ионно-плазменных и лазерных технологий, Самаркандском государственном университете. (Адрес: 100084, г. Ташкент, ул. Бодомзор йули, дом 26. Административное здание Физико-технического института, зал конференций. Тел. (+99871) 235-30-41, факс (+99871) 235-42-91, e-mail: lutp@uzsci.net.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Физико-технического института (зарегистрирована за № ____). Адрес: 100084, г. Ташкент, ул. Бодомзор йули, дом 26. Административное здание Физико-технического института, зал конференций. Тел./Факс: (99871) 235-30-41.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2017 г.
(протокол рассылки № _____ от «__» _____ 2017 г.)

С. Л. Лутпуллаев

Председатель научного совета по присуждению
ученой степени доктора наук д.ф.-м.н., профессор

А.В.Каримов

Ученый секретарь научного совета по присуждению
ученой степени доктора наук д.ф.-м.н., профессор

С.А.Бахрамов

Председатель научного семинара при Научном совете
по присуждению ученой степени доктора наук, д.ф.-м.н., профессор

Введение (Аннотация докторской диссертации)

Актуальность и востребованность темы диссертации. На сегодняшний день в мире ведутся интенсивные исследования в области фото- и тензoeлектрических свойств полупроводниковых материалов и структур, особенно по управлению свойствами материала и функциональными характеристиками полупроводниковых структур и приборов. В этом аспекте изучение влияния деформации и сильного электромагнитного поля на динамические характеристики полупроводниковых структур является одним из важных задач.

В годы независимости учеными нашей страны уделяется большое внимание развитию технологии получения тензочувствительных и фоточувствительных полупроводниковых структур, в частности, способам получения полупроводниковых материалов легированных глубокими примесями, а также пленочных структур с аномально большими фотонапряжениями, изучены эффекты фотопроводимости, в области получения фото- и тензочувствительных структур на основе узкозонных и слоистых структур, достигнуты значительные успехи. В соответствии со Стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан является наиболее важным повышение эффективности отрасли нанoeлектроники на основе теоретических и практических исследований, влиянию электромагнитного поля, света и деформации на протекающие физические процессы в полупроводниковых структурах.

На сегодня в мире изучение влияния деформации и сильного электромагнитного поля на динамические характеристики полупроводниковых структур, выявление природы электродвижущих сил и токов, возникающих в них при воздействии сильного электромагнитного поля, освещения и деформации вблизи критических точек имеет важное значение. В этом аспекте целевые научно-исследовательские работы, в том числе, реализация проблем в ниже приведенных направлениях, а именно: построение модели системы потенциальных барьеров, которая позволит объяснить аномально большие значения коэффициента тензочувствительности в тонких пленках полученных вакуумным напылением; проведение оценки деформационного потенциала на основе модели систем потенциальных барьеров; выяснение возможности управления тензочувствительностью освещенного собственным светом p-n-перехода подвергнутого постоянной деформации; выяснение возможности управления фототоками и фотоэлектродвижущая сила, генерируемых в полупроводниковых фотоэлементах при воздействии деформации и сверхвысокочастотного поля; определение возможности использования фазовых портретов для объяснения генерационно-рекомбинационных процессов в полупроводниках; исследование теплового уширения энергетических уровней и плотности состояний квазиодномерного электронного газа; исследование температурной зависимости энергетических

щелей, обусловленных колебаниями решетки и тепловым уширением энергетических уровней, считаются одними из важных задач.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Постановлении Президента Республики Узбекистан №-УП-4947 «О мерах по дальнейшей реализации Стратегии действий по развитиям Республики Узбекистан в 2017-2021 годах» от 7 февраля 2017 года и №-ПП-1442 «О приоритетных направлениях развития индустрии Республики Узбекистан на 2011-2015 гг.» от 15 декабря 2010 года и №-ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организаций, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики. Исследовательская работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан: Ф2. «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение».

Обзор международных научных исследований по теме диссертации⁷. Научные исследования по воздействию сверхвысокочастотного поля и деформации на полупроводниковые структуры в ведущих центрах и университетах, в том числе, Departamento de Fisica Aplicada, Universidad de Salamanca (Испания), Ludwig-Maximilians-Universitat Munchen (Германия), по осцилляционным эффектам в сверхвысокочастотных полях, возникающие электродвижущие силы при разогреве электронов и исследование коэффициента неидеальности ведутся в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе, (Санкт-Петербург, Россия), исследования вольтамперных характеристик сверхвысокочастотных туннельных диодов на постоянном токе при воздействии на них гармонического высокочастотного сигнала ведутся в институте Физики Дагестанского научного центра Российской Академии наук и ряда других научных центрах мира.

В мире, в результате проведенных исследований по влиянию деформации и электромагнитного излучения на полупроводниковые структуры, получен ряд важных научных результатов, в том числе, по исследованию фотовольтаического эффекта в пленках теллурида кадмия при вакууме (National Astronomical Observatory of Japan) и в тонких пленках германия (The American Institute of Physics (США), а изучением влияния давления и температуры на сопротивление p-n-перехода занимаются в университете University of New Hampshire (США), по воздействию сверхвысокочастотных волн на полупроводниковые структуры в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе, (Санкт-Петербург, Россия). В Национальном политехническом институте Мексики профессором Ю.Г.

⁷ Обзор международных научных исследований по теме диссертации проведен на основе Holmium-related luminescence in crystalline silicon // Materials Science Engineering, V.B81, p.176-178 (2001), и др. источников.

Гуревичем и др. ведутся интенсивные исследования в области горячих электронов.

В настоящее время в мире проводятся исследования в следующих перспективных направлениях, в том числе, по теоретическим и практическим исследованиям процессов генерации электродвижущих сил и токов, механизмам возникновения аномально большой тензочувствительности в полупроводниковых р-п-переходах, воздействию температуры на плотность квазиодномерных электронных газов, взаимосвязи температуры с колебаниями кристаллической решетки энергетических уровней при воздействии сильного электромагнитного поля, освещения и деформации.

Степень изученности проблемы. Деформационные свойства полупроводников впервые были изучены Ч. Смитом (Англия) в германии и кремнии, где исследовано влияние одноосной деформации на сопротивление полупроводника.

Учёными университета (New Hampshire США) Н.Н. Hallom и его сотрудниками проведены исследования воздействия давления и температуры на сопротивление р-п-перехода в германии и установлена их экспоненциальная зависимость при низких напряжениях. При этом изменения сопротивления составили 12,5 процентов, что соответствует изменению ширины запрещенной зоны примерно на $3,1 \cdot 10^{-3}$ эВ, когда давление достигает 10000 фунт/дюйм².

В настоящее время в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе, (Санкт-Петербург, Россия) профессором А.И. Вейнгером⁸ и его сотрудниками получены экспериментальные результаты для кремниевых р-п-переходов в сильных сверхвысокочастотных полях, когда $p_p \gg n_n$ (n_n и p_p – концентрации основных носителей заряда в n- и p- областях) и показано, что даже при обратном смещении наблюдаются положительные токи.

В развитие исследований влияния сверхвысокочастотных полей, определенный вклад внесли российские учёные К.М. Алиев⁹ и другие, применившие изучение фазовых портретов колебаний тока в сильных высокочастотных полях. В частности, они рассмотрели процесс трансформации фазовых портретов.

На сегодня учеными Узбекистана Г. Гулямовым¹⁰ и его сотрудником М. Дадамирзаевым изучено усиление размерных тепловых эффектов в р-п-переходах с внутренним электростатическим полем при разогреве фононов и электронов в сверхвысокочастотном поле. Исследованы вихревые токи, возникающие при неравномерном разогреве носителей зарядов и воздействие

⁸ Аблязимова Н.А., Вейнгер А.И., Питанов В.С. Электрические свойства кремниевых р-п переходов в сильных СВЧ полях. // ФТП. 1988, т.22, вып.1, с.2001.

⁹ К.М. Алиев, И.К. Камилов, Х.О. Ибрагимов, Н.С. Абакарова. Отрицательное дифференциальное сопротивление N-типа, гистерезис и осцилляции на вольт-амперных характеристиках сверхвысокочастотных диодов // Физика и техника полупроводников – Санкт-Петербург, 2012. –т. 46. №8. –С. 1082-1087.

¹⁰ Shamirzaev S.H., Gulyamov G., Dadamirzaev M.G., Gulyamov A.G. Eddy Currents Appearing in a p-n Junction in a High Microwave Field // Semiconductors. –USA, 2011, -vol. 45, No.8, pp. 1035–1037.

света, деформации и сверхвысокочастотных полей на полупроводниковые структуры.

Несмотря на большое количество исследований, проведенных до настоящего времени, остаются нерешенными проблемы воздействия деформации и сверхвысокочастотного поля на полупроводниковые структуры, которые освещены собственным светом на краю фундаментального поглощения.

Связь темы диссертации с научными исследованиями научно-исследовательской организации, где выполнена диссертационная работа. Работа выполнена в Физико-техническом институте в рамках Государственной программы научно исследовательских работ РУз № Ф.2-1.55 на тему: «Новые механизмы возникновения электродвижущих сил в полупроводниках» (2003-2007 гг.); и проекта ОТ-Ф2-077* «Динамика деформационных эффектов полупроводниковых плёнок и воздействие электромагнитных волн на токи, возникающие в полупроводниковых плёнках» (2007-2011 гг.); а также проекта Ф2-21 «Математическое моделирование определения плотности поверхностных состояний на границе раздела полупроводник-диэлектрик» (2012-2016 гг.).

Целью исследования является изучение физических процессов при воздействии сильного электромагнитного поля, освещения и деформации в полупроводниках и полупроводниковых структурах.

Для достижения цели сформулированы следующие **задачи исследования:**

построение модели системы потенциальных барьеров, которая позволит объяснить аномально большие значения коэффициента тензочувствительности в тонких пленках Bi_2Te_3 и Sb_2Te_3 , полученных вакуумным напылением;

проведение оценки деформационного потенциала на основе модели систем потенциальных барьеров;

выяснение возможности управления тензочувствительностью освещенного собственным светом p - n -перехода, подвергнутого постоянной деформации;

выяснение возможности управления фототоками и фотоэлектродвижущими силами генерируемых в полупроводниковых фотоэлементах при воздействии деформации и сверхвысокочастотного поля;

определение возможности использования метода фазовых портретов для объяснения генерационно-рекомбинационных процессов в полупроводниках;

исследование теплового уширения энергетических уровней и плотности состояний квазиодномерного электронного газа;

исследование температурной зависимости энергетических щелей, обусловленных колебаниями решетки и тепловым уширением энергетических уровней.

Объектом исследования являются полупроводниковые p - n -переходы, тонкие полупроводниковые пленки, тройные соединения монокристаллов

$FeIn_2S_4$, $CuIn_5S_8$ и $MnIn_5S_{8.5}$, и экспериментальные данные, имеющиеся в научной литературе.

Предметом исследования являются процессы формирования токовых характеристик в р-п-переходе при воздействии света, деформации и сверхвысокочастотного поля, механизмы возникновения аномально большой тензочувствительности в полупроводниковых р-п-переходах вблизи сингулярных точек Ван Хова, процессы уширения энергетических уровней разрешенных зон при воздействии температуры.

Методы исследований. Для решения поставленных задач применены методы теоретических расчетов, компьютерного моделирования и метод фазовых портретов.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

установлено, что на краю фундаментального поглощения, когда $\hbar\omega \approx E_g$, коэффициент поглощения сильно возрастает за счет изменения ширины запрещенной зоны под действием деформации, вследствие этого коэффициент тензочувствительности р-п-перехода может принимать аномально большие значения;

теоретически обоснованно, что изменение вольтамперной характеристики р-п-перехода под воздействием деформации, света и сильного сверхвысокочастотного поля объясняется разностью квазиуровней Ферми электронов и дырок;

выявлено, что при воздействии деформации и света главным образом генерируются фотоэлектроны и фотодырки, в данном случае электродвижущая сила генерируемая диодом будет отрицательной, а при воздействии сверхвысокочастотной волны электроны и дырки разогреваются в этом случае значение электродвижущей силы будет положительным;

установлено, что если произведение частоты переменной деформации и времени жизни носителей заряда становится больше единицы, то форма фазовых портретов стремится к горизонтальному отрезку, а в случае когда произведение частоты переменной деформации и времени жизни носителей заряда становится меньше единицы, то форма фазового портрета стремится к вертикальному отрезку, в случае когда произведение частоты переменной деформации и времени жизни носителей заряда будет равен единице фазовый портрет имеет наибольшую площадь;

определено, что увеличение концентрации рекомбинационных центров приводит к уменьшению концентрации носителей заряда, сворачивая фазовую траекторию в виде спирали в сторону наименьших значений, а уменьшение рекомбинационных центров в полупроводнике отражается в увеличении концентрации носителей заряда, и фазовая траектория разворачивается в виде спирали в сторону наибольших значений;

установлено, что полное изменение ширины запрещенной зоны монокристаллов $MnIn_5S_{8.5}$, $FeIn_2S_4$ и $CuIn_5S_8$ определяется взаимодействием электронов с колебаниями решетки и термическим уширением энергетических уровней в разрешенных зонах.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

обнаруженное свойство возникновения электродвижущей силы в диодной структуре под воздействием сверхвысокочастотного поля открывает возможность для его использования в качестве индикатора сверхвысокочастотного поля;

освещая тензочувствительный р-n-переход излучением вблизи границы фундаментального поглощения можно многократно увеличить его чувствительность к давлению, что позволяет расширить рабочий диапазон тензодатчика.

Достоверность полученных результатов обосновывается совпадением результатов расчета с экспериментальными данными полученными ведущими специалистами для сверхвысокочастотных диодов, правильным выбором объектов исследования, строгостью математических выкладок, использованием обоснованных методов решения и оценки точности решений, сопоставлением с экспериментальными результатами и проведением численных экспериментов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов работы заключается в раскрытии новых представлений происходящих на р-n-переходе при воздействии деформации, света и сверхвысокочастотного поля.

Результаты по получению аномально большой тензочувствительности вблизи критических точек, могут быть использованы при производстве новых сверхчувствительных тензодатчиков.

Внедрение результатов исследования. По результатам изучения воздействия света, деформации и сверхвысокочастотного поля на полупроводниковые структуры:

теоретический подход объяснения физических процессов протекающих под воздействием деформации и сильного электромагнитного поля в полупроводниковых структурах и полупроводниках использованы при выполнении зарубежного гранта на тему: «Transporte Mono- y Bipolar en Estructuras Semiconductoras» для объяснения динамических характеристик полученных под воздействием деформации и электромагнитного поля (Справка №615 Национального политехнического института Мексики от 15 февраля 2017 года). Использование научных результатов позволила объяснить процессы протекающие под внешним воздействием;

результаты полученные по механизмам возникновения тока и электродвижущей силы под воздействием деформации и сверхвысокочастотного поля использованы для определения механизмов изменения вольтамперной характеристики р-n-перехода при выполнении гранта № 14-02-00033 «Светоиндуцированные эффекты в ассиметричных наноструктурах» (Справка №15307-46-2433 Института физики полупроводников СО РАН от 29 августа 2017 года). Использование научных результатов позволила определить воздействие электромагнитного поля на оптические свойства полупроводниковых наноструктур и квантовых точек;

результаты по деформационным эффектам на границе фундаментального поглощения и теоретические расчеты генерации фотоэлектродвижущих сил и фототоков в полупроводниковых фотэлементах использованы при выполнении научного гранта № ОТ-2Ф-076 на тему «Влечение экситонов, поляронов и явление переноса в наноразмерных гетероструктурах с квантовыми точками с целью создания высокоэффективных фотодетекторов» (2007-2011 гг) для объяснения процессов формирования тока короткого замыкания и напряжения холостого хода (Справка №ФТА-02-11/560 Агентства науки и технологии республики Узбекистан от 2017 года 28 августа). Использование научных результатов позволила управлять коэффициентом поглощения света в полупроводниковых структурах.

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 11 международных и 3 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликованы 25 научных трудов, из них 11 статей в научных журналах, в том числе 9 статей в зарубежных международных реферируемых журналах и 14 работ в трудах научных конференций.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, 4 приложений и содержит 184 страниц текста, включает 54 рисунков и 2 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность проблемы и темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, научная новизна и практическая значимость работы, приведены сведения о внедрении результатов исследования.

В первой главе «**Обзор современного состояния исследований давления и сверхвысокочастотного поля взаимодействий с полупроводниковыми структурами**» диссертационной работы приведен обзор литературных данных по состоянию проблемы по изучению и разработке полупроводниковых приборов с разогревом электронов электрическими полями и физических эффектов в них, а также исследованию зависимости токовых характеристик и коэффициента неидеальности структур с р-п-переходом под воздействием сверхвысокочастотного поля и процессов проявления в тонких пленках поверхностной, реактивной фотоэлектродвижущей силы.

Во второй главе «**Влияние света и деформации на тензочувствительность полупроводниковых структур**» исследован тензорезистивный эффект в системе потенциальных барьеров в полупроводниковых пленках Bi_2Te_3 и Sb_2Te_3 полученных вакуумным напылением. Получено для коэффициента тензочувствительности K следующее выражение

$$K = \frac{2}{\hbar} \sqrt{2m(U-E)} \cdot l_0 \frac{a+l_0}{l_0} = K_0 \frac{a+l_0}{l_0}. \quad (1)$$

Показано что модель последовательной системы потенциальных барьеров может объяснить аномально большие значения коэффициента тензочувствительности в тонких пленках Bi_2Te_3 и Sb_2Te_3 полученных вакуумным напылением.

Исследована система потенциальных барьеров в наноструктурах. Согласно модели Кронига-Пенни для зависимости волнового вектора от энергии получено следующее выражение

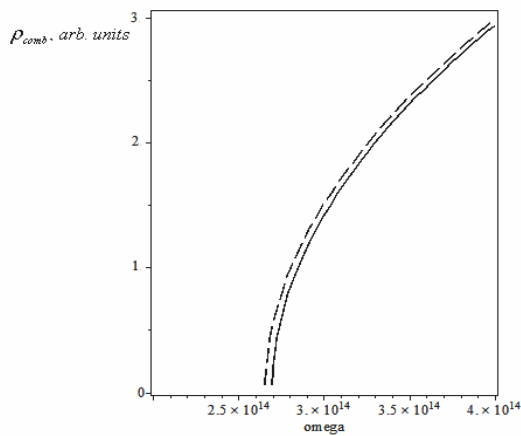
$$k(E, b) = \frac{\arccos\left(\frac{\beta^2 - \alpha^2}{2\alpha\beta} \text{sh}(\beta b) \sin(\alpha a) + \text{ch}(\beta b) \cos(\alpha a)\right)}{a + b}, \quad (2)$$

здесь $\beta = \sqrt{\frac{2m_0 E}{\hbar^2}}, \alpha = \sqrt{\frac{2m_0 (U - E)}{\hbar^2}}.$

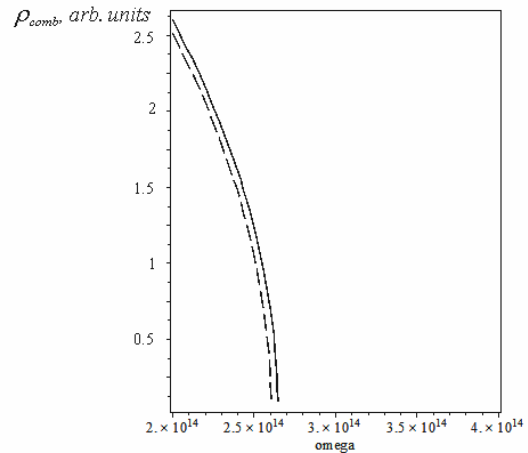
Далее, графически определяя, насколько изменилась запрещенная зона $\delta E = E_2 - E_1$ и ширина барьера $\delta b = b_2 - b_1$ по определению (3) проведена оценка потенциала деформации

$$\Xi = \frac{\delta E}{\varepsilon}. \quad (3)$$

Таким образом, показано что, пользуясь графиком, полученным на основе модели Кронига-Пенни, можно будет провести оценку деформационного потенциала.



а) точка минимум M_0 , иллюстрированы кривые без деформации (сплошные кривые) и кривые с деформацией (пунктирные кривые). Величина относительной деформации составляет $\varepsilon = 10^{-3}$.



б) точка максимум M_3 , иллюстрированы кривые без деформации (сплошные кривые) и кривые с деформацией (пунктирные кривые). Величина относительной деформации составляет $\varepsilon = 10^{-3}$.

Рисунок 1. Комбинированная плотность состояний вблизи критических точек

А также исследована тензочувствительность р-п-перехода при освещении. Особое внимание обращалось на то, как влияет деформация на коэффициент поглощения. Особый интерес при изучении коэффициента поглощения имели место сингулярные точки Ван Хова в функции плотности состояний. Показано что с помощью давления можно управлять

поглощением света в полупроводниках, это позволяет сдвигать критические точки Ван Хова (см. рис. 1).

С другой стороны, этот сдвиг при освещении полупроводниковой структуры на краю фундаментального поглощения будет стимулировать изменение тензочувствительных свойств. В этом случае для коэффициента тензочувствительности освещенного р-п-перехода получается следующее выражение:

$$K = \frac{\delta R}{R_0 \varepsilon}, \quad \frac{\delta R}{R_0} = -\frac{\frac{U}{J_d^2} \delta J}{\frac{U}{J_d}} = -\frac{\delta J}{J_d},$$

$$K_I = \frac{\delta j_d}{j_d \delta \varepsilon} + \frac{\delta j_I}{j_d \delta \varepsilon} = \frac{\delta j_d}{j_d \delta \varepsilon} \left(1 + \frac{\delta j_I}{\delta j_d} \right) = K_d \left(1 + \frac{\delta j_I}{\delta j_d} \right) \approx K_d \frac{\delta j_I}{\delta j_d} \gg K_d; \quad J_I = \frac{\beta e \alpha I_0}{\hbar \omega}, \quad \frac{\delta j_I}{\delta j_d} \gg 1, \quad (4)$$

Здесь K_d - темновая тензочувствительность, δR - изменение сопротивления, R_0 - начальное сопротивление, j_I - фототок, j_d - темновой ток, ε - относительная деформация.

Отсюда видно, что тензочувствительностью освещенного р-п-перехода можно управлять постоянной деформацией ε , частотой света ω и её интенсивностью I . Показано что, вблизи критических точек, под действием деформации коэффициент поглощения может сильно возрасти, и, вследствие этого, коэффициент тензочувствительности р-п-перехода может принимать аномально большие значения.

В третьей главе «Изменение фототоков и фотоэлектродвижущих сил в полупроводниковых структурах при воздействии деформации» исследовано влияние деформации на фототоки в р-п-переходах. Рассмотрено влияние деформации на фототок освещенного собственным светом р-п-перехода. Получена следующая формула для вольтамперной характеристики освещенного собственным светом р-п-перехода

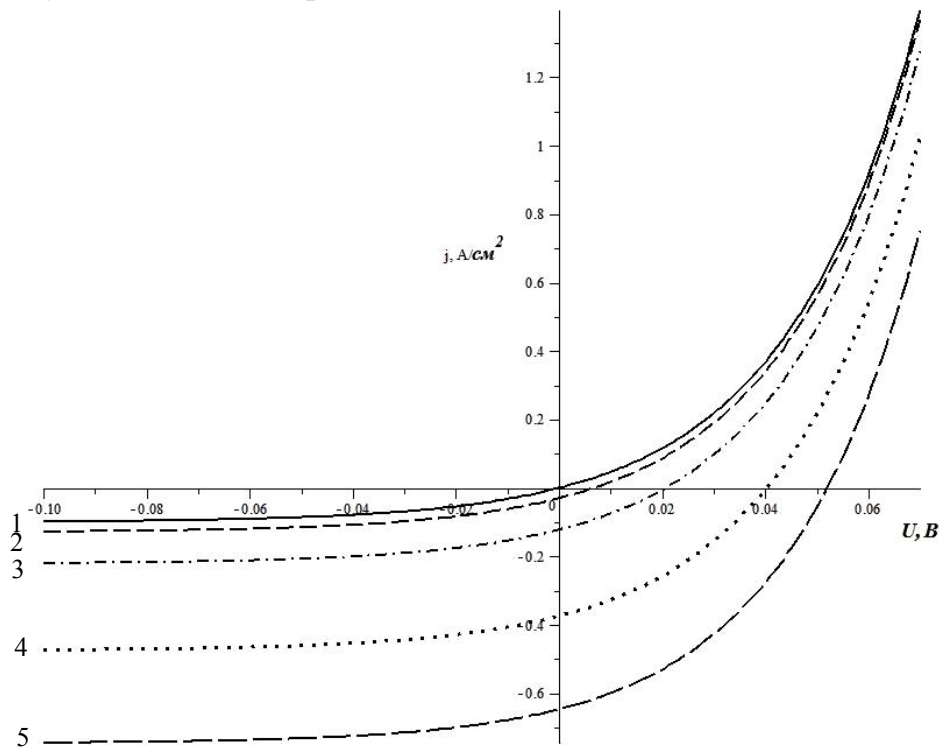
$$j = j_s \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) - \frac{e \beta I A (\Xi \varepsilon)^r}{h \nu}. \quad (5)$$

На рисунке 2 приведены вольтамперная характеристика р-п-перехода для трех различных случаев без освещения и без деформации, при освещении и без деформации, при освещении собственным светом и при деформации для различных значений относительной деформации.

На основе проведенных исследований сделано следующее заключение. При освещении на границе фундаментального поглощения собственным светом, полупроводник становится чувствительным к воздействию деформации. Это позволяет управлять скоростью фотогенерации электронов и дырок с помощью внешнего воздействия. В данном случае, появляется возможность управления фототоками и фотоэлектродвижущими силами возникающих в полупроводниковых фотоэлементах.

Рассмотрена термодинамика р-п-перехода в сверхвысокочастотном поле. Показано что модуляция потенциального барьера электромагнитной волной увеличивает инжекцию носителей в базе диода. Этот процесс увеличивает

рекомбинацию электронов и дырок, которая дает прямой ток через диод, даже при отрицательных обратных напряжениях. Подавая свет различной интенсивности можно менять величину и знак электродвижущей силы генерируемую диодом в сверхвысокочастотном поле.



1-без освещения и без деформации, 2-при освещении без деформации, 3-при освещении с воздействием деформации ($\varepsilon=10^{-6}$), 4- при освещении с воздействием деформации ($\varepsilon=10^{-5}$), 5- при освещении с воздействием деформации ($\varepsilon=3 \cdot 10^{-5}$).

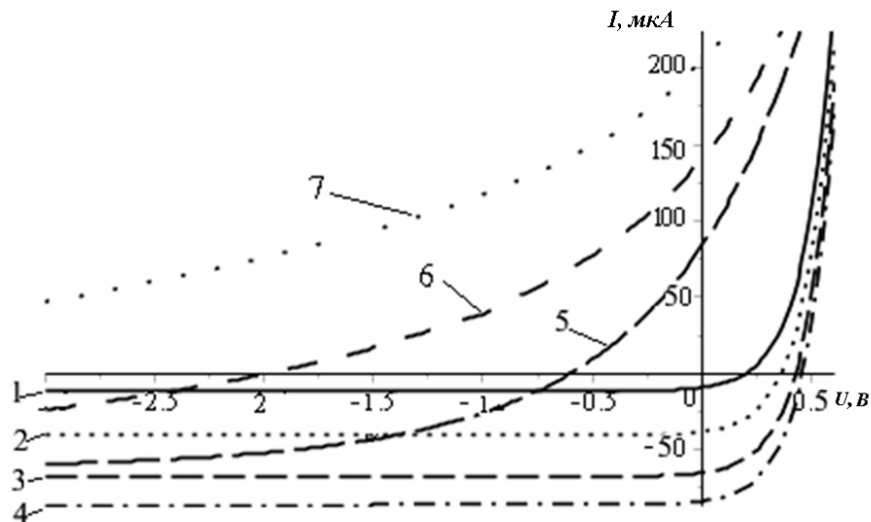
Рисунок 2. Вольтамперная характеристика р-п-перехода для прямозонного полупроводника.

Исследовано влияние деформации и освещения на (вольтамперную характеристику) электродвижущую силу генерируемый р-п-переходом в сверхвысокочастотном поле. На рисунке 3 приведена вольтамперная характеристика р-п-перехода при освещении собственным светом(кривая 1), при воздействии относительной деформации и освещении собственным светом(кривые 2,3,4), и при воздействии сильного сверхвысокочастотного поля(кривые 5,6,7). График получен теоретически и рассчитан с помощью выражения (5) и (6)

$$j = j_{sn} \left[\left(\frac{T_e}{T} \right)^{1/2} e^{\frac{e\phi_0}{kT} - \frac{e(\phi_0 - U - U_1 \cos(\omega t))}{kT_e}} - 1 \right] + j_{sp} \left[\left(\frac{T_h}{T} \right)^{1/2} e^{\frac{e\phi_0}{kT} - \frac{e(\phi_0 - U - U_1 \cos(\omega t))}{kT_h}} - 1 \right]. \quad (6)$$

Как показывает анализ рисунка 3, при воздействии деформации на освещенный собственным светом р-п-переход, кривые вольтамперной характеристики смещаются вниз и направо по плоскости j - U , а при воздействии сверхвысокочастотного поля вольтамперная характеристика р-п-перехода имеет сдвиг вверх и налево по плоскости j - U . На основе

проведенных исследований можно сделать следующее заключение. При освещении на границе фундаментального поглощения собственным светом, полупроводник становится чувствительным к воздействию деформации. Это позволяет управлять током короткого замыкания и напряжением холостого хода с помощью внешней деформации и сверхвысокочастотного поля. В данном случае, появляется возможность управления фототоками и фотоэлектродвижущими силами возникающих в полупроводниковых фотоэлементах.



1- без деформации, при освещении собственным светом, 2-при воздействии относительной деформации $\varepsilon = 10^{-5}$ и освещении собственным светом, 3-при воздействии относительной деформации $\varepsilon = 3 \cdot 10^{-5}$ и освещении собственным светом, 4-при воздействии относительной деформации $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-5}$ и освещении собственным светом, 5- без деформации, без освещения при воздействии импульсного сверхвысокочастотного поля (температура электронов $T_e = 500 \text{ K}$, температура дырок $T_h = 350 \text{ K}$), 6- без деформации, без освещения при воздействии импульсного сверхвысокочастотного поля (температура электронов $T_e = 700 \text{ K}$, температура дырок $T_h = 500 \text{ K}$), 7- без деформации, без освещения при воздействии импульсного сверхвысокочастотного поля (температура электронов $T_e = 1000 \text{ K}$, температура дырок $T_h = 700 \text{ K}$)

Рисунок 3. Вольтампер характеристика р-п-перехода при воздействии света, деформации и сильного сверхвысокочастотного поля.

При воздействии сильного сверхвысокочастотного поля кривые вольтамперной характеристики смещаются в сторону II четверти j - U плоскости. Таким образом, с помощью света, деформации и сильного сверхвысокочастотного поля можно управлять вольтамперной характеристикой р-п-перехода, это позволяет управлять характеристиками фотоэлементов и диодов на основе р-п-переходов.

Исследованы также изменения положения квазиуровней Ферми горячих электронов и дырок и электродвижущие силы, генерируемые на освещенном р-п-переходе. Показано что при освещении р-п-перехода собственным светом, можно управлять фотоэлектродвижущими силами генерируемую фотоэлементом с помощью давления $U(P)$, $F_e(P)$, $F_h(P)$ меняя положения квазиуровней Ферми. Получены формулы выражающие зависимость

квазиуровней Ферми электронов и дырок от деформации для фундаментального поглощения света на «красной границе»

$$F_n = kT \ln \left(\frac{n_0 + \beta I_0 A \varepsilon^{\frac{1}{2}}}{N_c} \right), \quad (7)$$

$$F_p = kT \ln \left(\frac{p_0 + \beta I_0 A \varepsilon^{\frac{1}{2}}}{N_v} \right). \quad (8)$$

Из выражений (7) и (8) видно, что деформация увеличивает концентрацию фотоэлектронов и фотодырок. Это приводит к смещению квазиуровней Ферми электронов в сторону зоны проводимости, а квазиуровней Ферми дырок в стороны валентной зоны.

При разогреве электронно-дырочного газа перемещение квазиуровней осуществляется за счет увеличения температуры электронов и дырок

$$F_e - E_c = \frac{kT_e}{e} \ln \left(\frac{n}{N_c} \right), \quad n = N_e e^{\frac{F_e - E_c}{kT_e}}, \quad (9)$$

$$E_v - F_h = \frac{kT_h}{e} \ln \left(\frac{p}{N_v} \right), \quad p = N_v e^{\frac{E_v - F_h}{kT_h}}. \quad (10)$$

С увеличением температуры электронов их квазиуровни Ферми удаляются от зоны проводимости к зоне валентной, а квазиуровни Ферми дырок от зоны валентной к зоне проводимости. Следует отметить, что смещение квазиуровней Ферми носителей заряда при их разогреве сверхвысокочастотным полем принципиально отличаются от их смещений при воздействии света. То есть, если за счет фотогенерации квазиуровни Ферми носителей заряда смещаются в сторону своих энергетических зон, то при разогреве носителей заряда сверхвысокочастотным полем они удаляются от своих энергетических зон. Такое поведение квазиуровней Ферми носителей зарядов при воздействии света и сверхвысокочастотного поля проявляется в знаках и в величинах электродвижущих сил возникающих в р-п-переходах. Это объясняет поведение вольтамперной характеристики приведенную на рисунке 3. Таким образом, с помощью сверхвысокочастотной волны уровни Ферми распадаются на квазиуровни горячих электронов и дырок. В отличие от освещения светом при междוזонном поглощении в сверхвысокочастотном разогреве квазиуровни Ферми электронов и дырок удаляются от своих зон. Электронные квазиуровни уходят вглубь запрещенной зоны, даже могут перейти в валентную зону, а дырочные квазиуровни поднимаются вверх и могут попасть в зону проводимости.

В четвертой главе «**Фазовые портреты деформационных эффектов освещенных полупроводников**» применяются фазовые портреты для исследования генерационно-рекомбинационных процессов в полупро-

водниках (см. рис. 4). Фазовый портрет имеет наибольшую площадь, когда частота переменной деформации имеет величину 1000 гц (см. рис. 4. а). То есть фазовый портрет имеет наибольшую площадь когда $\omega \cdot \tau = 1$, здесь генерация и рекомбинация носителей заряда происходит постепенно. С изменением частоты переменной деформации меняется форма фазовых портретов (см. рис.4 b,c,d,e,f). В том случае, когда частота переменной деформации растет, и произведения частоты и времени жизни становится $\omega \cdot \tau \gg 1$, форма фазового портрета стремится к горизонтальному отрезку (см. рис.4 f), то есть генерация и рекомбинация носителей заряда практически не чувствуется. В обратном случае, когда частота переменной деформации уменьшается, и произведения частоты и времени жизни становится $\omega \cdot \tau \ll 1$, форма фазового портрета стремится к вертикальному отрезку (см. рис.4 f), здесь генерация и рекомбинация носителей заряда проявляется резко.

Таким образом, форма фазовых портретов даёт нам возможность определить, как концентрация и ее производная реагирует на частоту переменной деформации. А именно, с увеличением частоты переменной деформации, произведения частоты и времени жизни носителей заряда становится больше единицы $\omega \cdot \tau \gg 1$, и форма фазового портрета стремится к горизонтальному отрезку. Если произведения частоты переменной деформации и времени жизни носителей заряда становится $\omega \cdot \tau \ll 1$, то форма фазового портрета стремится к вертикальному отрезку. Фазовый портрет имеет наибольшую площадь когда $\omega \cdot \tau = 1$.

Методом фазовых портретов определены линейные и квадратичные рекомбинации (см. рис.5).

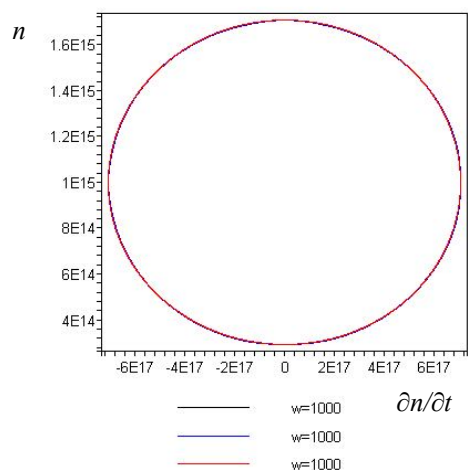
Отмечено, что фазовые портреты для линейной рекомбинации имеют форму петли, а фазовые портреты, полученные для квадратичной рекомбинации, имеют форму своеобразного клина. Это позволяет делать заключение о том, какой вид рекомбинации преобладает в исследуемом процессе. Если фазовый портрет в форме петли это означает что преобладает рекомбинация линейная, а если форма фазового портрета похожа на форму клина, это означает что преобладает рекомбинация квадратичная.

Результаты, полученные при анализе фазовых портретов позволяют сделать следующие выводы:

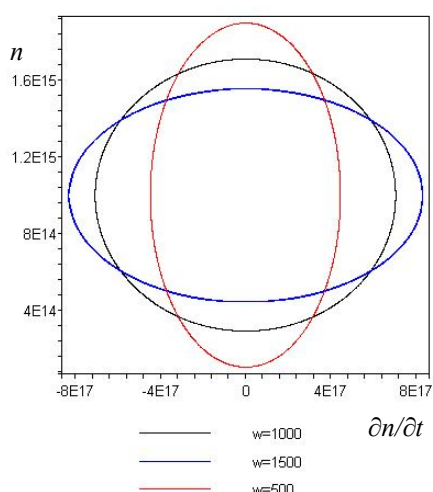
- форма фазовых портретов, позволяет определить, какой тип рекомбинации (квадратичная или линейная) преобладает в рассматриваемом генерационно-рекомбинационном процессе.

- как при линейной, так и при квадратичной рекомбинациях, разность концентраций носителей зарядов для прямых разрешенных переходов больше разности концентраций носителей зарядов для прямых неразрешенных переходов..

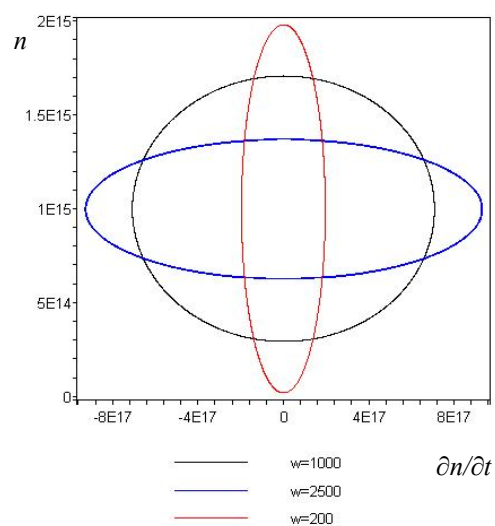
- разность концентрации носителей зарядов при линейной рекомбинации больше разности концентрации при квадратичной рекомбинации.



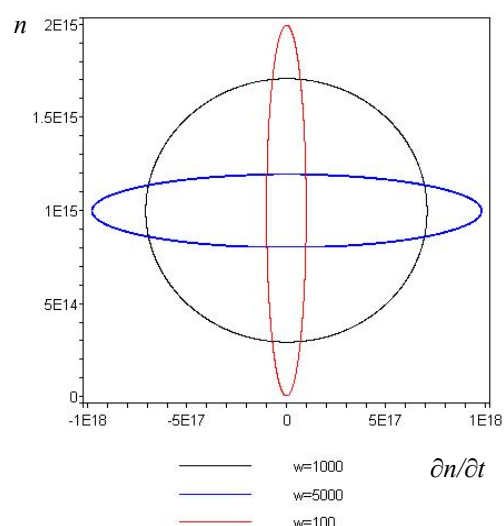
a)



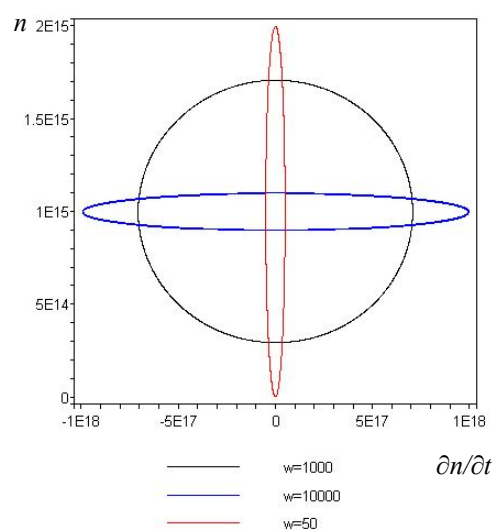
b)



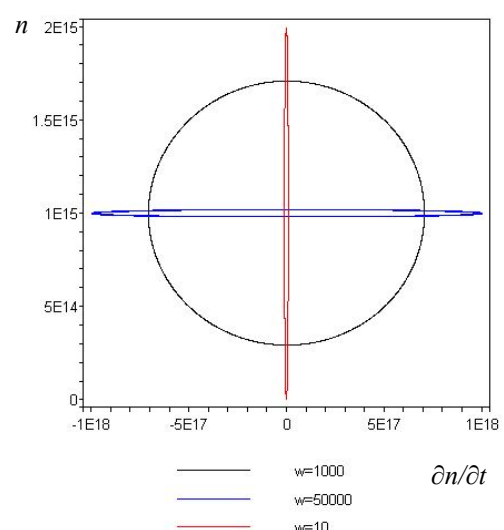
c)



d)

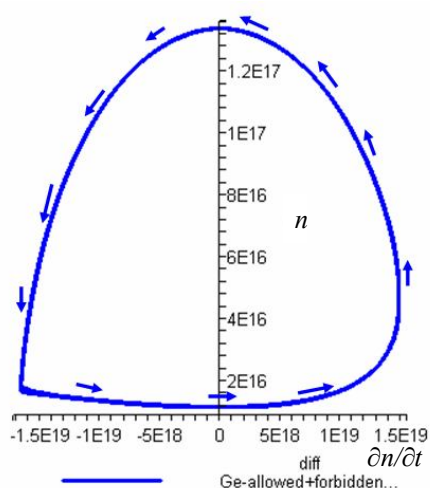


e)

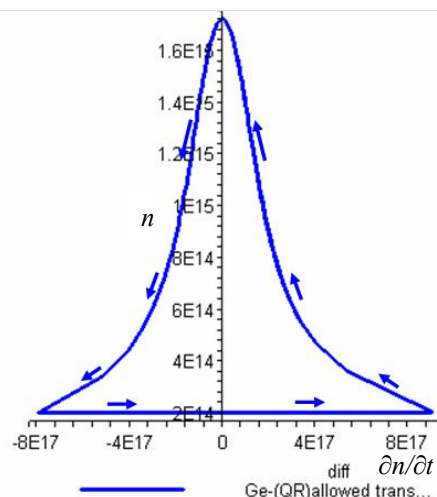


f)

Рисунок 4 Фазовые портреты зависимости концентрации n от их производных $\frac{\partial n}{\partial t}$

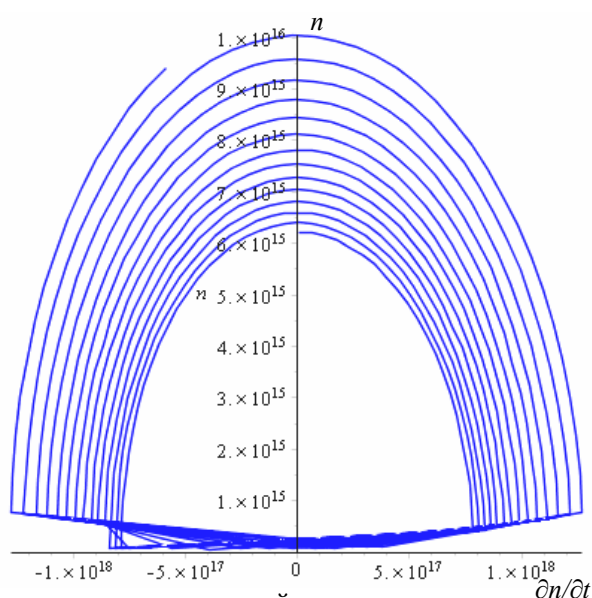


а) для линейной рекомбинации



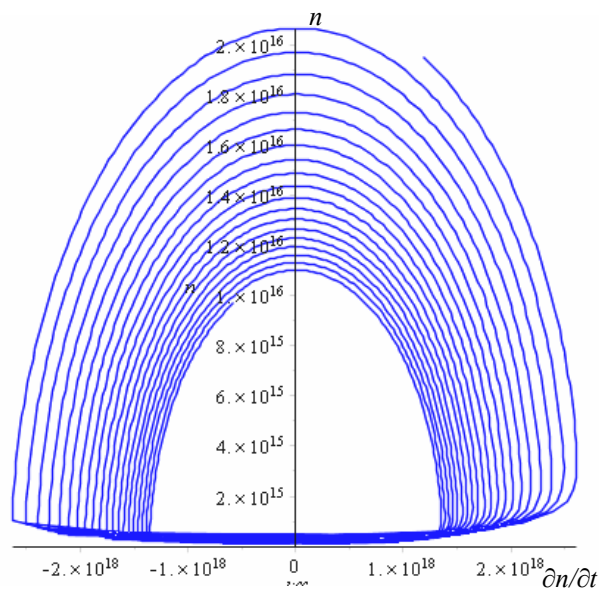
б) для квадратичной рекомбинации

Рисунок 5. Фазовый портрет прямых разрешенных переходов.



представлен случай когда концентрация рекомбинационных центров меняется от $N_t = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ до $N_t = 8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Рисунок 6. Фазовый портрет зависимости n от dn/dt .



представлен случай когда концентрация рекомбинационных центров меняется от $N_t = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ до $N_t = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

Рисунок 7. Фазовый портрет зависимости n от (dn/dt) .

Исследовано воздействие рекомбинационных центров на форму фазовых портретов.

Исследование генерационно-рекомбинационных процессов на основе полученных фазовых портретов дает возможность сделать нам следующие заключения:

-рост рекомбинационных центров в полупроводнике отражается с уменьшением концентрации носителей заряда, и фазовая траектория

сворачивается в виде спирали в сторону наименьших значений, как по оси n , так и по оси $\frac{\partial n}{\partial t}$ (Рис. 6.).

-уменьшение рекомбинационных центров в полупроводнике отражается в увеличении концентрации носителей заряда, и фазовая траектория разворачивается в виде спирали в сторону наибольших значений, как по оси n , так и по оси $\frac{\partial n}{\partial t}$ (Рис. 7.).

-фазовые портреты позволяют вести диагностику состояния полупроводниковых приборов.

В пятой главе «Температурная зависимость энергетических уровней полупроводниковых структур» исследовано тепловое уширение энергетических уровней и плотность состояний квазиодномерного электронного газа. Для температурной зависимости плотности состояний получена следующая формула

$$N(E, T) = N_0 \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{\Theta(E' - E_1 n^2 - E_2 l^2)}{\sqrt{E' - E_1 n^2 - E_2 l^2}} G N(E', E, T) dE' =$$

$$= N_0 \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{kT \sqrt{E' - E_1 n^2 - E_2 l^2}} \exp \left[\frac{E' - E}{kT} - \exp \left(\frac{E' - E}{kT} \right) \right] dE' \quad (11)$$

Построен график температурной зависимости плотности состояний по формуле (10) при различных температурах полагая что температурная зависимость плотности состояний одномерного электронного газа квантовой нити аналогичен температурной зависимости плотности состояний трехмерного электронного газа в квантующем магнитном поле.

На рисунке 8 приведены графики плотности состояний одномерного электронного газа. Проанализируем результаты численных расчетов. На рисунке 8 сплошными линиями приведены графики плотности состояний, вычисленной при температуре $T=10^\circ\text{K}$. Повышение температуры сильно уменьшает высоты пиков, дискретных уровней поперечного квантования двумерной квантовой ямы. Дальнейшее увеличение температуры еще более размывает пики превращая их в невысокие горы плотности состояний. При температуре $T=300^\circ\text{K}$ плотность состояний одномерного газа превращается в монотонно растущую функцию энергии где дискретные уровни почти не заметны.

На рисунке 9 приведена зависимость плотности состояний от температуры в трехмерном изображении. Из рисунка 9 хорошо видно, что температура сильно влияет на термодинамическую плотность состояний. При низких температурах плотность состояний одномерного электронного газа является сильно осциллирующей функций энергии электронов. С ростом температуры осцилляции плотности состояний ослабевают, и при высоких температурах превращаются в монотонно растущую функцию энергии.

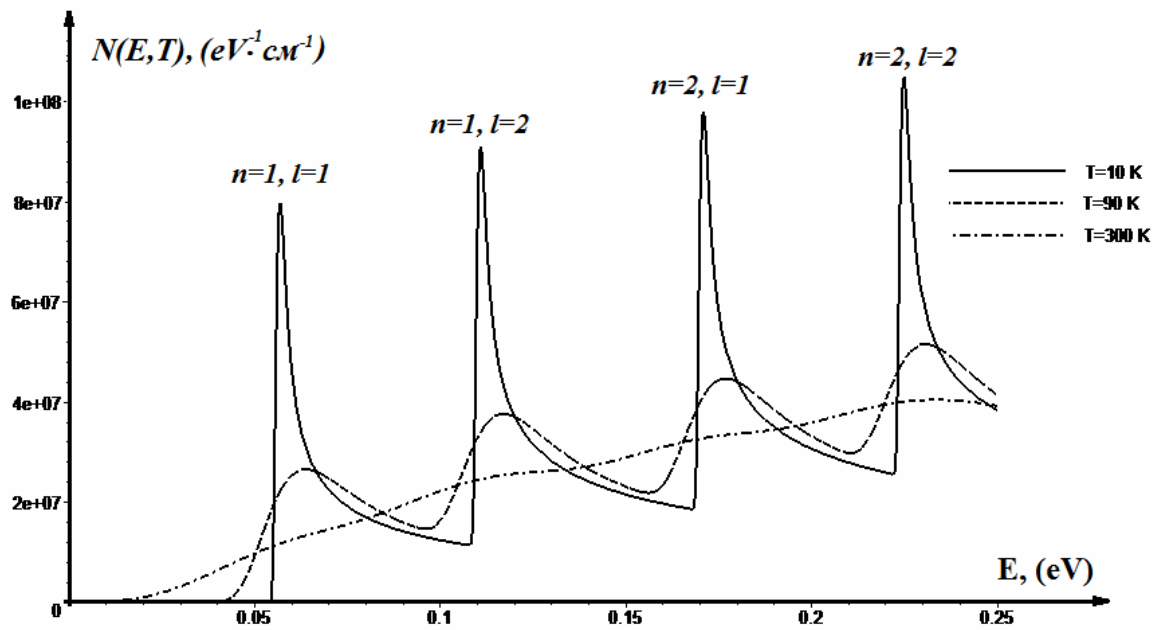


Рис. 8. Зависимости плотности состояний 1D электронного газа от энергии для различных температур: $L_1=10^{-8}$ м и $L_2=1,5 \cdot 10^{-8}$ м.

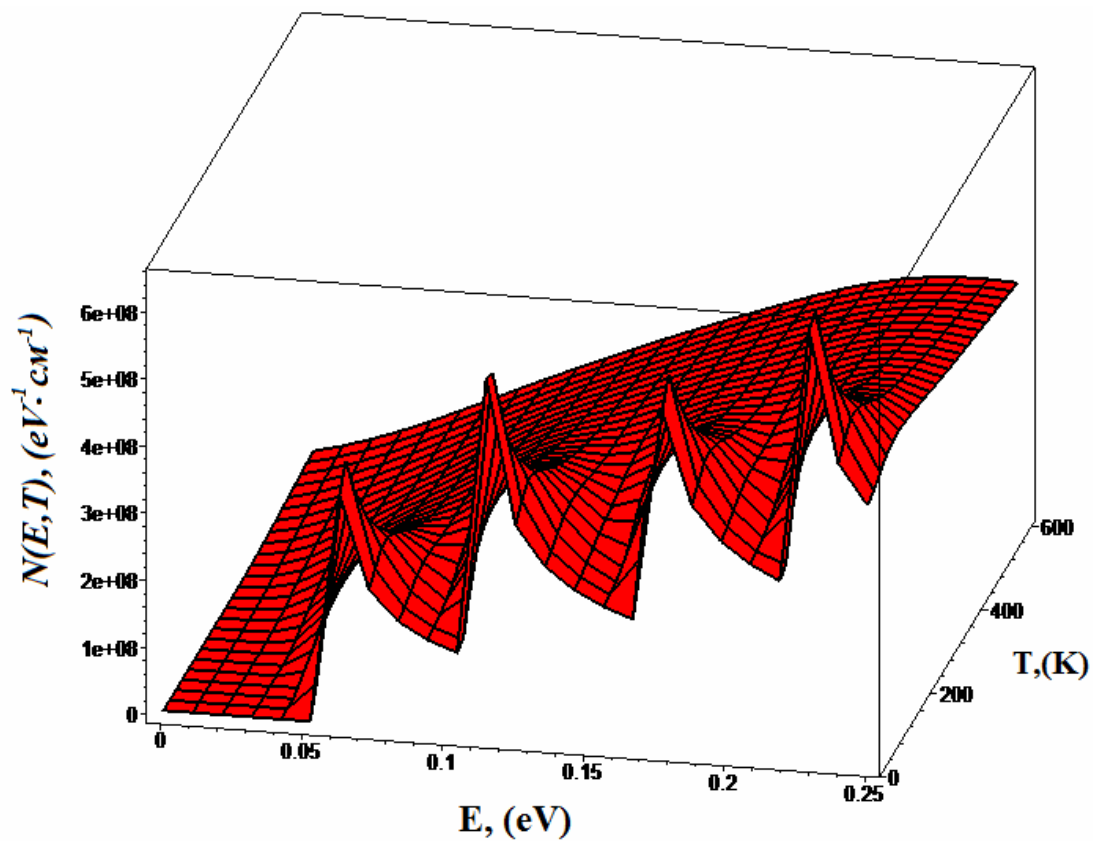


Рис. 9. Зависимости плотности состояний 1D электронного газа от энергии и температуры в трёхмерном пространстве: $L_1=10^{-8}$ м и $L_2=1,5 \cdot 10^{-8}$ м.

Энергия в квантовой яме определяется следующим образом

$$E_n = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = \frac{\hbar^2 (2\pi)^2 n^2}{2mL(T)^2}; \quad k = \frac{2\pi}{L} n; \quad L_n = L_0(1 + \alpha T); \quad E_n(T) = \frac{\hbar^2 n^2}{2mL_0^2(1 + \alpha T)^2} = \frac{E_n(0)}{(1 + \alpha T)^2};$$

$$E_n(0) = \frac{\hbar^2 n^2}{2mL_0^2}; \quad E_n(T) = \frac{E_n}{(1 + \alpha T)^2}; \quad \alpha \ll 1; \quad E_n(T) = E_n(0) \frac{(1 - \alpha T)^2}{(1 - (\alpha T)^2)^2}; \quad E_n(T) \approx E_n(0)(1 - 2\alpha T)$$

$$\Delta E_n = \Delta E_n(0)(1 - 2\alpha T)$$

Таким образом, при $\alpha > 0$ расстояние между соседними дискретными уровнями уменьшается с ростом температуры, при $\alpha < 0$ расстояние увеличивается с ростом температуры. Это подтверждается экспериментально, в *Ge*, *Si* и в др. полупроводниках $\alpha > 0$ и действительно ΔE_n уменьшается с ростом энергии, *PhS*, *PbTe* и др. холкегенидах свинца ширина запрещенной щели увеличивается. Это свидетельствует о роли теплового расширения в температурной зависимости ширины запрещенной зоны. Сказанное справедливо как к низкоразмерным полупроводниковым системам, так и к массивным образцам. Она должна наблюдаться и квантовыми нитями и квантовыми точками.

Изучена температурная зависимость энергетической щели обусловленная колебаниями решетки и тепловым уширением энергетических уровней представленные в работах Боднара И.В. В этих работах представлена температурная зависимость ширины запрещенной зоны $E_g(T)$ для новых полупроводниковых материалов. Видно, что зависимость имеет вид, характерный для полупроводников, с понижением температуры ширина запрещенной зоны возрастает.

Для описания зависимости $E_g(T)$ использовалось соотношение Кейса

$$E_g = E_g(0) - C_V \alpha T. \quad (12)$$

где α коэффициент пропорциональности, C_V - теплоемкость при постоянном объеме.

При учете термического уширения уровней температурная зависимость $E_g(T)$ выглядит следующим образом:

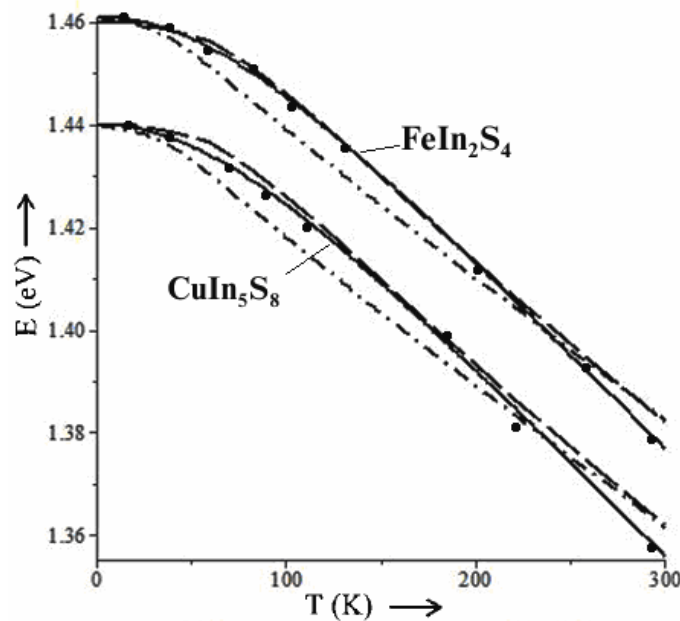
$$E_g = E_g(0) - C_V \alpha T - \Delta E_g(T). \quad (13)$$

Где последний член уравнения обусловлен тепловым уширением энергетических уровней зоны проводимости и валентной зоны, и определяется следующими соотношениями:

$$N_k = \sum_{i=1}^n N_i(E_i) GN(E_i, E, T), \quad E_g(T) = E_c(T) - E_v(T), \quad \Delta E_g(T) = E_g(0) - E_g(T) \quad (14)$$

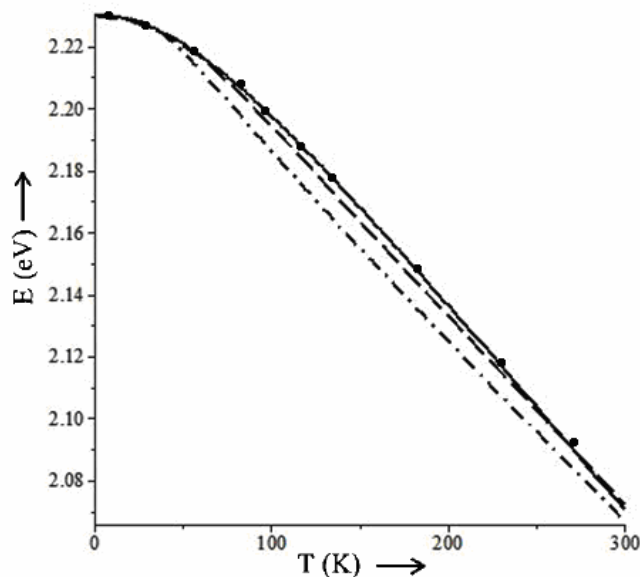
Здесь N_k - критическое значение плотности состояний, $N_i(E_i)$ - плотность состояний при абсолютном нуле температуры, $GN(E_i, E, T)$ - производная от

вероятности заполнения уровня E_i по энергии, $E_c(T), E_v(T)$ значение энергии дна зоны проводимости и потолка валентной зоны соответственно при температуре T .



Для каждого соединения приведены по три кривых, первые сплошные кривые эксперименты полученные в работах^{5,6}, вторые штрих пунктирные кривые эти кривые полученные по соотношению Кейса, штриховые кривые эти кривые полученные по соотношению Кейса с учетом теплового уширения.

Рис. 10. Температурные зависимости ширины запрещенной зоны для тройных соединений $FeIn_2S_4$ ¹¹ и $CuIn_5S_8$ ¹².



Приведены три кривых, первая сплошная кривая эксперимент полученный в работе⁷, вторая штрих пунктирная кривая это кривая полученная по соотношению Кейса, штриховая кривая это кривая полученная по соотношению Кейса с учетом теплового уширения.

Рис. 11. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны для монокристалла $MnIn_5S_{8.5}$ ¹³.

¹¹ I. V. Bodnar and S. A. Pavlukovets, Semiconductors. Vol. 45, No. 11, pp. 1395–1398 (2011).

¹² I. V. Bodnar, Semiconductors. Vol. 46, No. 5, pp. 602–605 (2012).

¹³ I. V. Bodnar, Semiconductors. Vol. 48, No. 10, pp. 1303–1306 (2014).

Проведена обработка экспериментальных данных. Получены графики температурной зависимости ширины запрещенной зоны для монокристаллов $FeIn_2S_4$, $CuIn_5S_8$ и $MnIn_5S_{8.5}$.

Показано что, для объяснения температурной зависимости ширины запрещенной зоны необходимо учитывать вклад термического уширения энергетических уровней. Полное изменение ширины запрещенной зоны определяется как взаимодействием электронов с колебаниями решетки так и термическим уширением энергетических уровней в разрешенных зонах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по изучению воздействия света, деформации и сверхвысокочастотного поля на полупроводниковые структуры сделаны следующие выводы:

1. Модель последовательной системы потенциальных барьеров может объяснить аномально большие значения коэффициента тензочувствительности в тонких пленках полученных вакуумным напылением.

2. При освещении на границе фундаментального поглощения собственным светом, полупроводник становится чувствительным к воздействию деформации. Это позволяет управлять скоростью фотогенерации электронов и дырок с помощью внешнего воздействия. Вследствие этого, появляется возможность управлять током короткого замыкания и наложением холостого хода с помощью внешней деформации.

3. Установлено, что на краю фундаментального поглощения (вблизи сингулярных точек Ван Хофа) когда $\hbar\omega \approx E_g$, коэффициент поглощения сильно возрастает $\alpha \propto (\hbar\omega - E_g + \Xi\varepsilon)^r$ за счет изменения ширины запрещенной зоны под действием деформации $\Delta E_g = E_g - \Xi\varepsilon$, вследствие этого коэффициент тензочувствительности р-п-перехода может принимать аномально большие значения.

4. Показано, что изменение квазиуровней Ферми электронов и дырок при воздействии деформации, света и сильного СВЧ поля объясняет поведение ВАХ р-п-перехода при внешних воздействиях;

5. Установлено, что при воздействии деформации и света главным образом генерируются фотоэлектроны и фотодырки и значение квазиуровней Ферми будет отрицательной, а при воздействии СВЧ волны электроны и дырки разогреваются в данном случае значение квазиуровней будет положительным, приводя к сдвигу ВАХ в противоположных направлениях;

6. Установлено, что при изменении частоты переменной деформации, если произведение частоты и времени жизни носителей заряда становится больше единицы $\omega \cdot \tau \gg 1$, то форма фазовых портретов (зависимости n от $\frac{\partial n}{\partial t}$) стремится к горизонтальному отрезку, а в случае, когда произведение частоты переменной деформации и времени жизни носителей заряда

становится $\omega \cdot \tau \ll 1$, то форма фазового портрета стремится к вертикальному отрезку, в случае когда $\omega \cdot \tau = 1$ фазовый портрет имеет наибольшую площадь.

7. Установлена взаимосвязь рекомбинационных центров с концентрацией носителей в полупроводнике при осуществлении деформации, так увеличение рекомбинационных центров приводит к уменьшению концентрации носителей заряда, сворачивая фазовую траекторию в виде спирали в сторону наименьших значений, как по оси n , так и по оси $\frac{\partial n}{\partial t}$, а уменьшение рекомбинационных центров в полупроводнике отражается в увеличении концентрации носителей заряда, и фазовая траектория разворачивается в виде спирали в сторону наибольших значений, как по оси n , так и по оси $\frac{\partial n}{\partial t}$.

8. установлено, что полное изменение ширины запрещенной зоны монокристаллов $\text{MnIn}_5\text{S}_{8.5}$, FeIn_2S_4 и CuIn_5S_8 определяется не только взаимодействием электронов с колебаниями решетки, но и термическим уширением энергетических уровней в разрешенных зонах.

9. Выявлено, что температурная зависимость ширины запрещенной зоны требует учета вклада термического уширения энергетических уровней. При этом полное изменение ширины запрещенной зоны определяется как взаимодействием электронов с колебаниями решетки, так и термическим уширением энергетических уровней в разрешенных зонах.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES
DSC.27.06.2017.FM/T.34.01 PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE,
INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES,
SAMARKAND STATE UNIVERSITY**

PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE

GULYAMOV ABDURASUL GAFUROVICH

**INFLUENCE OF DEFORMATION AND STRONG ELECTROMAGNETIC
FIELD ON DYNAMIC CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR
STRUCTURES**

01.04.10- Physics of semiconductors

**ABSTRACT OF DISSERTATION OF THE DOCTOR OF SCIENCE (DSc)
ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

TASHKENT-2017

The theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2017.2.DSc/FM36.

Dissertation has been prepared at physical-technical institute.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (uzbek, russian, english (resume)) on the website (fti-kengash.uz) and the “Ziyonet” Information and educational portal (www.ziyonet.uz).

Scientific supervisor: **Ayuhanov Rashid Ahmetovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Official opponents: **Mamadalimov Abdugafur Teshabaevich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician

Imamov Erkin Zunnunovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Rasulov Rustam Yavkochevich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Leading organization: **Andijan State University**

Defense will take place « ____ » _____ 2017 at ____ at the meeting of Scientific Council number DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 Physical-technical institute, institute of ion-plasma and laser technologies, Samarkand state university. (Address: 100084, Uzbekistan, Tashkent, 2B Bodomzor yuli street. Phone/fax: (+99871) 235-42-91, e-mail: lulp@uzsci.net.).

Dissertation is possible to review in Information-resource centre at Physical-technical institute (is registered № ____) (Address: 100084, Uzbekistan, Tashkent, 2B Bodomzor yuli street. Phone/fax: (+99871) 235-42-91, e-mail: lulp@uzsci.net).

Abstract of dissertation sent out on « ____ » _____ 2017 year
(Mailing report № ____ on « ____ » _____ 2017 year)

S.L. Lutpullayev
Chairman of scientific council
on award of scientific degrees,
D.F.-M.S., professor

A.V. Karimov
Scientific secretary of scientific council
on award of scientific degrees,
D.F.-M.S., professor

S.A. Bakhramov
Chairman of scientific Seminar under Scientific
Council on award of scientific degrees,
D.F.-M.S., professor

INTRODUCTION (abstract of DSc thesis)

Topicality and necessity of the thesis. To date, intensive research in the direction of revealing their new physical properties, controlled by external influences, especially sensitive to light and microwave radiation and deformation, is underway in the world in the intensively developing direction of photo and tensor properties of semiconductor materials and structures. Making semiconductor materials unique properties in terms of managing their functional characteristics is an extremely important task. In this aspect, the study of the influence of deformation and a strong electromagnetic field on the dynamic characteristics of semiconductor structures is one of the promising directions.

In the years of independence, scientists of our country pay great attention to the development of technology for obtaining strain-sensitive and photosensitive semiconductor structures, in particular, methods for obtaining semiconductor materials doped with deep impurities, as well as film structures with anomalously large photovoltage, special attention is paid to the study of photoconductivity effects. In this direction, significant progress has been made in obtaining photo- and strain-sensitive structures based on narrow-gap and layered structures.

Today in the world, when studying the effect of deformation and a strong electromagnetic field on the dynamic characteristics of semiconductor structures, revealing the nature of EMF and currents arising in them under the influence of a strong electromagnetic field, illumination and deformation near critical points is of great importance. In this aspect, targeted research works, including the implementation of problems in the directions listed below, are considered to be one of the important tasks: the construction of a model of a system of potential barriers, which allows one to explain the anomalously large values of the strain-sensitivity coefficient in thin films obtained by vacuum deposition; Estimation of the deformation potential on the basis of the model of the potency barrier systems; elucidation of the possibility of controlling the strain-sensitivity of the p-n junction illuminated by the light of its own, subject to constant deformation; the elucidation of the possibility of controlling the photocurrents and photo EMFs generated in semiconductor photocells under the action of deformation and the microwave field; the possibility of using phase portraits to explain generation-recombination processes in semiconductors; a study of the thermal broadening of the energy levels and the density of states of a quasi-one-dimensional electron gas; The study of the temperature dependence of energy gaps due to lattice vibrations and thermal broadening of energy levels.

The research works carried out in the above mentioned directions indicate the relevance of the topic of this dissertation.

This dissertational research serves, to a certain extent, the fulfillment of the tasks stipulated in the Decree of the President of the Republic of Uzbekistan PP-1442 "On Priority Directions for the Development of the Industry of the Republic of Uzbekistan for 2011-2015" dated December 15, 2015 and No. -PP2789 "On Measures on further improvement of the activities of the Academy of Sciences,

organization, management and financing of research activities "of February 17, 2017, as well as other normative and legal documents adopted in this field.

Relevant research priority areas of science and developing technologies of the Republic. The research work was carried out in accordance with the priority directions of the development of science and technology of the Republic of Uzbekistan: F2. "Physics, Astronomy, Power Engineering and Mechanical Engineering".

A review of international research on the topic of dissertation. Scientific research on the effect of the microwave field and deformation on semiconductor structures in leading centers and universities, including the Departamento de Física Aplicada, Universidad de Salamanca (Spain), Ludwig-Maximilians-Universität München (Germany), on oscillation effects in ultrahigh-frequency fields, the arising electromotive forces during the heating of electrons and the study of the coefficient of nonideality are carried out at the Physico-Technical Institute named after A.F. Ioffe, (St. Petersburg, Russia), studies of current-voltage characteristics of superhigh-frequency tunnel diodes on direct current under the influence of a harmonic high-frequency signal are conducted at the Institute of Physics of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and a number of other scientific centers around the world.

In the world, as a result of studies on the effect of deformation and electromagnetic radiation on semiconductor structures, a number of important scientific results have been obtained, including the study of the photovoltaic effect in films of cadmium telluride under vacuum (National Astronomical Observatory of Japan) and in thin films of germanium (The American Institute of Physics (USA)), and the study of the effect of pressure and temperature on the resistance of the pn junction is being carried out at the University of New Hampshire (USA) on the effect of microwave waves on semiconductor structures in the Physico-Technical Institute (St. Petersburg, Russia), at the National Polytechnic Institute of Mexico, Professor Yu.G. Gurevich, and others, intensive research is being conducted in the field of hot electrons.

At the present time, theoretical and technical studies of the processes of EMF generation and currents arising in semiconductors under the influence of a strong electromagnetic field, illumination and deformation are carried out.

Problem development status. The strain properties of semiconductors were first studied by the scientist C. Smith (England) in germanium and silicon, where the effect of uniaxial deformation on the resistance of a semiconductor was studied.

Scientists of the University (New Hampshire USA) H.H. Hall and his collaborators carried out studies of the effect of pressure and temperature on the resistance of the pn junction in germanium and established their exponential dependence at low voltages. At the same time, the resistance changes were 12.5 percent, which corresponds to a change in the width of the forbidden band by approximately $3.1 \cdot 10^{-3}$ eV, when the pressure reaches 10,000 psi.

Currently, the Physico-Technical Institute. A.F. Ioffe, (St. Petersburg, Russia), Professor A.I. Weinger and his co-workers obtained experimental results

for silicon pn junctions in strong microwave fields, where $pp \gg nn$ (nn and pp are the concentrations of the main charge carriers in the n and p regions). It is shown that positive currents are observed even with reverse bias. At long-term exposure (from 20 minutes to 1 hour), a single pulse of microwave radiation on a silicon diode (KD514A) also A.I. Weinger showed a significant decrease in the differential resistance of the p-n junction.

In the development of studies of the influence of the microwave field, a certain contribution was made by the Russian scientists K.M. Aliev and others supplemented the studies with phase portraits of current oscillations in strong high-frequency fields, in particular, considered the process of transformation of phase portraits.

To date, scientists of Uzbekistan G. Gulyamov and his collaborators M. Dadamirzaev have studied the enhancement of the dimensional thermal effects in p-n junctions with an internal electrostatic field when the phonons and electrons in the microwave field are heated. The eddy currents that occur when the charge carriers are unevenly heated and the effect of light, deformation, and microwave fields on semiconductor structures are investigated.

Despite a large number of studies conducted to date, the problems of deformation and microwave field effects on semiconductor structures that are illuminated by the intrinsic light at the edge of fundamental absorption remain unresolved.

Relevant of the dissertation to the plans of scientific-research works. The work was carried out at the Physicotechnical Institute within the framework of the State Program of Scientific Research Works of the Republic of Uzbekistan No. F.2-1.55 on the topic: "New mechanisms for the appearance of electromotive forces in semiconductors" (2003-2007); and the project OT-F2-077 * "Dynamics of deformation effects of semiconductor films and the effect of electromagnetic waves on currents arising in semiconductor films" (2007-2011); as well as the project F2-21 "Mathematical modeling of the determination of the density of surface states at the semiconductor-dielectric interface" (2012-2016).

The aim of research work is to study physical processes under the influence of a strong electromagnetic field, illumination and deformation in semiconductors and semiconductor structures.

Tasks of research work:

the construction of a model of a system of potential barriers that allows one to explain the anomalously large values of the strain-sensitivity coefficient in thin films of Bi_2Te_3 and Sb_2Te_3 obtained by vacuum deposition;

assessment of the deformation potential based on a model of potential barrier systems;

elucidation of the possibility of controlling the strain-sensitivity of the p-n junction illuminated by the light of its own, subject to constant deformation;

the elucidation of the possibility of controlling the photocurrents and photo EMFs generated in semiconductor photocells under the action of deformation and the microwave field;

the possibility of using phase portraits to explain generation-recombination processes in semiconductors;

a study of the thermal broadening of the energy levels and the density of states of a quasi-one-dimensional electron gas;

The study of the temperature dependence of energy gaps due to lattice vibrations and thermal broadening of energy levels.

To object of research are semiconductor p-n junctions, thin semiconductor films, ternary compounds of FeIn_2S_4 single crystals, CuIn_5S_8 and $\text{MnIn}_5\text{S}_{8.5}$, and experimental data available in the scientific literature.

The subject of research are the processes of formation of current characteristics in the pn junction under the action of light, deformation and the microwave field, the mechanisms of the appearance of anomalously high tensosensitivity in semiconductor pn junctions near the singular points of Van Hove, the processes of broadening the energy levels of allowed zones upon exposure to temperature.

Methods of the research: To solve these problems, methods of theoretical calculations, computer modeling and the method of phase portraits are applied.

Scientific novelty of the research work:

It is established that, at the edge of fundamental absorption, when, the absorption coefficient increases strongly due to a change in the width of the forbidden band under the action of deformation, as a result, the coefficient of p-n junction susceptibility can assume anomalously large values.

It is shown that the change in the quasi-Fermi levels of electrons and holes under the action of deformation, light, and a strong microwave field explains the behavior of the I-V characteristic of the p-n junction under external influences;

It is established that under the action of deformation and light, photoelectrons and photoholes are mainly generated, in this case the EMF generated by the diode due to the change in the Fermi quasilevels will be negative, and when the microwave wave is applied, the electrons and holes are heated in this case, the EMF value will be positive, leading to a shift of the I-V characteristic in opposite directions;

It is established that when the frequency of the variable strain changes, if the product of the frequency and lifetime of the charge carriers becomes greater than unity, then the shape of the phase portraits (depending on) tends to a horizontal segment, and in the case when the product of the frequency of the variable deformation and the lifetime of the charge carriers becomes, the form of the phase portrait tends to a vertical segment, in the case where the phase portrait has the largest area.

the interrelation of recombination centers with the carrier concentration in a semiconductor is determined during deformation, so an increase in the recombination centers leads to a decrease in the concentration of charge carriers, turning the phase trajectory in the form of a spiral towards the lowest values, both along the axis and along the axis, and the decrease in the recombination centers in the semiconductor is reflected in an increase in the concentration of charge carriers, and the phase trajectory unfolds in the form of a spiral towards the highest

values, both along the axis and along the axis . Accordingly, the phase portrait serves to monitor the state of the semiconductor under external influences.

It was established that the total change in the width of the forbidden band of $\text{MnIn}_5\text{S}_{8.5}$, FeIn_2S_4 , and CuIn_5S_8 single crystals is determined not only by the interaction of electrons with lattice vibrations but also by thermal broadening of the energy levels in the allowed bands. In this case, the experimental dependences of the band gap on the temperature coincide with the theoretical curves.

Practical results of research work:

the detected property of EMF in the diode structure under the influence of the microwave field opens the possibility for its use as an indicator of the microwave field;

illuminating the strain-sensitive p-n junction by radiation near the fundamental absorption edge, it is possible to increase its sensitivity to the pressure by several times, thereby increasing the operating range of the strain gage.

Authenticity of the obtained results is justified by the coincidence of the calculation results with the experimental data obtained by leading specialists for microwave diodes, the correct choice of the objects of investigation, the rigor of mathematical calculations, the use of valid methods for solving and estimating the accuracy of solutions, comparison with experimental results and numerical experiments.

Scientific and practical value of the research results. The scientific significance of the results of the work lies in the discovery of new ideas occurring at the pn-junction under the influence of deformation, light, and the microwave field.

The results for obtaining anomalously high strain-sensitivity near critical points can be used in the production of new ultrasensitive strain gauges.

Implementation of the research results. Based on the results of studying the effect of light, deformation and the microwave field on semiconductor structures:

scientists of the National Polytechnic Institute of Mexico noted that the theoretical methods performed by the thesis of A.G. Gulyamov was used in the implementation of the grant on the topic "Transporte Mono y Bipolar en Estructuras Semiconductoras" (Reference No. 615 of the National Polytechnic Institute of Mexico, February 15, 2017).

scientists of the Physico-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences used theoretical calculations when processing the experimental results of the grant No. 10-02-00629a "Peierls spin interaction of impurity electrons and the insulator-metal phase transition" (Reference No. 11217-730 / OK of the Physico-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences on August 24, 2017 of the year).

the results of the dissertation work were used by the scientists of Namangan State University in the implementation of a scientific grant of fundamental research on the subject OT-2F-076 "Encryption of excitons, polarons and the transport phenomenon in nanosized heterostructures with quantum dots for the purpose of creating highly efficient photodetectors" (2007-2011). (Reference No. FTA-02-11 /

560 of the Agency of Science and Technology of the Republic of Uzbekistan from 2017 on August 28).

Approbation of the research results. The results of the thesis were reported and discussed at 11 international and 3 republican scientific and practical conferences.

Publication of research results. 25 research papers were published on the subject of the thesis, including 11 articles in scientific journals, including 9 articles in foreign international refereed journals and 14 papers in scientific conferences.

Structure and volume of dissertation. The thesis consists of an introduction, five chapters, a conclusion, a list of references, four annexes and contains 184 pages of text, includes 54 figures and 2 tables.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. G. Gulyamov, A.G. Gulyamov, F.R. Muhitdinova. Influence of Recombination Centers on the Phase Portraits in Nanosized Semiconductor Films. Journal of Modern Physics–USA, 2016, 7, pp. 1661-1667 (№24, Scientific Research Publishing Inc, Google based IF=0.82, ResearchGate IF=0.43)
2. Г. Гулямов, А.Г. Гулямов. Определение линейной и квадратичной рекомбинаций методом фазовых портретов // Узбекский Физический Журнал.-Ташкент, 2016.- Т.18, №3.-С.167-172(01.00 00, №5)
3. Г. Гулямов, А.Г. Гулямов, Г.Н. Мажидова. Влияние деформации на фототоки в р-п-переходах // «Альтернативная энергетика и экология».–Россия, г.Саров, 2016.-№15-16. С. 24–30. (01.00.00, №9)
4. G. Gulyamov and A. G. Gulyamov. On the Tensosensitivity of a p–n Junction under Illumination // Semiconductors, 2015, Vol. 49, No. 6, pp. 819–822. (№11. Springer, IF:0.602).
5. Gafur Gulyamov, A. G. Gulyamov, A. Q. Ergashev, B. T. Abdulazizov. The Use of Phase Portraits for the Study of the Generation-Recombination Processes in Semiconductor // Journal of Modern Physics, 2015, 6, pp. 1921-1926 (№24, Scientific Research Publishing Inc, Google based IF=0.82, ResearchGate IF=0.43)
6. Г. Гулямов, А.Г. Гулямов, У.И. Эркабоев. Исследование влияния высоких температур и слабых магнитных полей на осцилляции магнитной восприимчивости в полупроводниках // Узбекский Физический Журнал.-Ташкент, 2015.- Т.17, №5.-С.288-294(01.00 00, №5)
7. A. G. Gulyamov. System of Potential Barriers in Nanostructures // World Journal of Condensed Matter Physics, 2015, 5, pp. 60-65 (№24, Scientific Research Publishing Inc, Google based IF=0.80, ResearchGate IF=0.57)
8. Г.Гулямов, А.Г.Гулямов. Влияние деформации на реактивные фототоки в полупроводниках. «Альтернативная энергетика и экология».–Россия, г.Саров, 2014.-№13. С. 17–21. (01.00.00, №9)
9. Г. Гулямов, А.Г. Гулямов, Г.Н. Мажидова. Тензорезистивный эффект в системе потенциальных барьеров в полупроводниковых пленках // Физическая инженерия поверхности, -2013.- Т. 11, № 2, стр. 243-245. (01.00.00, №91)
10. А.Г. Гулямов, М.Г. Дадамирзаев. Фазовые портреты деформационных эффектов в полупроводника в импульсном режиме// Физическая инженерия поверхности, Украина, ФИП, 2012, т.10, №4. с.308-310. (01.00.00, №91)

11. P. J. Baymatov, A. G. Gulyamov, A. B. Davlatov, B. B. Uzakov. Broadening Thermal Energy Levels and Density States Quasi One-Dimensional Electron Gas. Journal of Applied Mathematics and Physics- USA, 2016, 4, P. 706-710. (№24, Scientific Research Publishing Inc, Google based IF=0.53, ResearchGate IF=0.24)

II бўлим (II часть; II part)

12. Г. Гулямов, А.Г. Гулямов, У.И. Эркабоев. Влияние давления, света и сильного сверхвысокочастотного поля на вольтамперную характеристику р-п-перехода // Труды международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», секция-II, 13-14 июня, Ташкент-2017, с.129-132.

13. А.Г. Гулямов. Влияние деформации на вольтамперную характеристику полупроводников // Материалы республиканской научной конференции “Неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах”, 1-2 февраля, Ташкент-2017, с.27-29.

14. А.Г. Гулямов, А.Б. Давлатов. Тепловое уширение энергетических уровней и плотность состояний квазиодномерного электронного газа // Сборник тезисов докладов, XXIII международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам, «Ломоносов-2016», Физический факультет МГУ, 2016, стр. 139-140.

15. Г. Гулямов, А.Г. Гулямов. Влияние деформации на фототоки в прямозонных полупроводниках // Материалы конференции НПО «ФИЗИКА-СОЛНЦЕ» АН РУз им. С.А. Азимова, Институт материаловедения, 28-29 июня, Ташкент, 2016, стр. 128-129.

16. А. Б. Давлатов, А. Г. Гулямов. Тепловое уширение энергетических уровней и плотность состояний квазиодномерного электронного газа // Материалы 54-Й Международной Научной Студенческой Конференции МНСК–2016, 16–20 апреля 2016 г., Новосибирск, 2016, С.14.

17. Г. Гулямов, А.Г. Гулямов. Применение фазовых портретов для исследования генерационно-рекомбинационных процессов в полупроводниках // Международная конференция «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», 5-6 ноября, Ташкент, 2015, стр. 189-193.

18. А.Г. Гулямов. Исследование полупроводниковых структур методом фазовых портретов // Материалы 53-Й Международной Научной Студенческой Конференции МНСК–2015, 11–17 апреля 2015 г., Новосибирск, 2015, С.14.

19. G. Gulyamov, A.G. Gulyamov, Z. R. Toshbekova. Anomalously large tensosensitivity semiconductor when illuminated // 6th International Scientific Conference “Applied Sciences and technologies in the United States and Europe: common challenges and scientific findings”, p. 139-140, April 21, 2014, New York, USA.

20. Г.Гулямов, А.Г.Гулямов, Г.Мажидова. “XXI аср -интеллектуал авлод асри”шиори остидаги ҳудудий илмий-амалий конференция материаллари тўплами, 6-7 июн, Наманган-2014, стр. 461-466.

21. А.Г. Гулямов. Потенциал деформации сверхрешетки // Материалы III международной конференции «Оптические и фотоэлектронические явления в полупроводниковых микро- и наноструктурах», 14-15 ноября, Фергана-2014, стр. 291-294.

22. А.Г. Гулямов. Исследование полупроводниковых структур методом фазовых портретов// Материалы 52-й Международной Научной Студенческой Конференции МНСК–2014, 11–18 апреля 2014 г., Новосибирск, 2014, С.10.

23. Г.Гулямов, М.Д. Дадамирзаев, С.Р.Бойдедаев, А.Г.Гулямов. Коэффициент неидеальности вольтамперной характеристики р-п-перехода в сильном сверхвысокочастотном поле// Материалы международной конференции по «Неравновесные процессы в полупроводниках и в полупроводниковых структурах», ст. 147, 1-3 февраля,Ташкент-2007г.

24. Гулямов Г., Дадамирзаев М.Г., Бойдедаев С.Р., Гулямов А.Г., Тошбекова З.А. Кинетика установления электродвижущих сил в р-п-переходе в сильном сверхвысокочастотном электромагнитном поле// Фотоэлектрическим и оптическим явлениям в полупроводниковых структурах: Тез. докл. Межд. науч. конф. 2-3 октября 2006. – Фергана, 2006. – С.103.

25. Гулямов Г., Дадамирзаев М.Г., Бойдедаев С.Р., Гулямов А.Г., Хамидова Б. Влияние вихревых токов на магнитосопротивление полупроводника// Фотоэлектрическим и оптическим явлениям в полупроводниковых структурах: Тез. докл. Межд. науч. конф. 2-3 октября 2006. – Фергана, 2006. -С.84.

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари
«Тил ва адабиёт таълими» таҳририятида таҳрирдан ўтказилди.
(6.09.2017 йил)

Босишга рухсат этилди: 19.10.2017 йил
Бичими 60x45 ¹/₈, «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табоғи 3,7. Адади: 100. Буюртма: № 295.

Ўзбекистон Республикаси ИИВ Академияси,
100197, Тошкент, Интизор кўчаси, 68

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.