

**АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖА БЕРУВЧИ PhD.28.02.2018.FM.60.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ
КЕНГАШ**

ФАРҒОНА ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

РАСУЛОВ ВОХОБ РУСТАМОВИЧ

**КУБ СИММЕТРИЯЛИ ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАРДА БАЛЛИСТИК ВА
СИРТ ФОТОГАЛЬВАНИК ЭФФЕКТИ ҲАМДА ИККИ ЎЛЧАМЛИ
ЭЛЕКТРОНЛИ ҲОЛАТЛАРНИНГ НАЗАРИЙ ТАДҚИҚЛАРИ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Докторлик диссертацияси автореферати мундарижаси
Оглавление автореферата докторской диссертации
Content of the abstract of doctoral dissertation

Расулов Вохоб Рустамович Куб симметрияли яримўтказгичларда баллистик ва сирт фотогальваник эффект ҳамда икки ўлчамли электронли ҳолатларнинг назарий тадқиқлари ..	3
Расулов Вохоб Рустамович Теоретические исследования баллистического и поверхностного фотогальванического эффекта и двумерных электронных состояний в полупроводниках кубической симметрии	19
Rasulov Voxob Rustamovich Theoretical researches of ballistic and surface photogalvanic effect and the state of two-dimensional electronic states in semiconductors of cubic symmetry	35
Эълон қилинган ишлар рўйхати Список опубликованных работ List of published works	39

**АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖА БЕРУВЧИ PhD.28.02.2018.FM.60.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ
КЕНГАШ**

ФАРҒОНА ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

РАСУЛОВ ВОХОБ РУСТАМОВИЧ

**КУБ СИММЕТРИЯЛИ ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАРДА БАЛЛИСТИК ВА
СИРТ ФОТОГАЛЬВАНИК ЭФФЕКТИ ҲАМДА ИККИ ЎЛЧАМЛИ
ЭЛЕКТРОНЛИ ҲОЛАТЛАРНИНГ НАЗАРИЙ ТАДҚИҚЛАРИ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2017.2.PhD/FM83 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Фарғона давлат университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида (www.adu.uz) ҳамда «ZiyoNet» Ахборот таълим порталида (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Каримов Иброҳим Набиевич

физика-математика фанлари доктори

Расмий оппонентлар:

Имамов Эркин Зуннунович

физика-математика фанлари доктори, профессор

Гулямов Гафур

физика-математика фанлари доктори, профессор

Етакчи ташкилот:

Ўзбекистон Миллий университети

Диссертация ҳимояси Андижон давлат университети ҳузуридаги PhD.28.02.2018.FM.60.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2018 йил «__» _____ соат ____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 170100, Андижон шаҳри, Университет кўчаси, 129-уй. Тел./факс: 0(374) 223-88-30; e-mail: agsu_info@edu.uz, Андижон давлат университети мажлислар зали.)

Диссертация билан Андижон давлат университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин. (__ рақам билан рўйхатга олинган.) (Манзил: 170100, Андижон шаҳри, Университет кўчаси, 129-уй. Тел./факс: 0(374) 223-88-30.)

Диссертация автореферати 2018 йил «__» _____ да тарқатилди.

(2018 йил «__» _____ даги ____ рақамли реестр баённомаси).

С.З. Зайнабидинов

Илмий даража берувчи Илмий кенгаш
раиси, ф.-м.ф.д., академик

А.О. Курбанов

Илмий даража берувчи Илмий кенгаш
илмий котиби, ф.-м.ф.н.

М.З. Носиров

Илмий даража берувчи Илмий кенгаш
ҳузуридаги илмий семинар раиси
ўринбосари, ф.-м.ф.н., доцент

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда ҳозирги кунда яримўтказгичлар физикаси ва асбобсозлигининг интенсив ривожланишида куб симметрияли яримўтказгичлар муҳим ўрин эгаллайди. Бундай яримўтказгичлар негизида фотогальваник эффектга асосланган фотоўзгартиргичлар ва фотодатчиклар яратиш истиқболлидир. Куб симметрияли яримўтказгичларнинг қатор физик хусусиятлари уларнинг ҳажмидаги заряд ташувчиларнинг сочилиш механизмларига боғлиқ бўлиб, бу соҳада баллистик ва сирт фотогальваник эффект ҳамда икки ўлчамли электронли ҳолатларни тадқиқ этиш муҳим вазифалардан бири бўлиб келмоқда.

Мамлакатимизда илм-фан соҳасидаги устувор йўналишларда, жумладан, «Қайта тикланувчи энергия манбаларидан фойдаланишни ривожлантириш»да яримўтказгичли наноструктуралардаги фотонли кинетик ходисаларни ўрганиш бўйича муҳим натижалар олинди. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясига кўра, илмий тадқиқот ва инновация фаолиятини ривожлантириш, илмий ва инновация ютуқларини амалиётга жорий этишнинг самарали механизмларини яратиш масалаларига, жумладан, уч ва икки ўлчамли электронли системалардаги физик жараёнларни тадқиқ қилишга алоҳида эътибор қаратилди.

Бугунги кунда жаҳонда нанотузилмали яримўтказгичларда юз берувчи физик жараёнларни чуқур ўрганиш борасида, жумладан, қуйидаги йўналишлардаги илмий изланишларни амалга ошириш муҳим вазифалардан ҳисобланади: куб симметрияли яримўтказгичларда баллистик ва сирт фотогальваник эффекти шартларини ҳамда икки ўлчамли электронли ҳолатларни аниқлаш; квант ўраларининг фотонли кинетик хоссаларини, ўлчамли квантлашиш эффектларини, заряд ташувчилар сочилиш механизмларини, квазизарралар энергетик спектрини қутбий фотогальваник эффектларда таққослаш; мураккаб валент зонали яримўтказгичлар ва уларнинг нанотузилмаларидаги заряд ташувчилар билан қутбланган нурланишнинг ўзаро таъсирини ҳамда электронли, оптик ва фотогальваник хоссаларини аниқлаш.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармонини, 2017 йил 13 февралдаги ПҚ-2772-сон «2017-2021 йилларда Электротехника 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 меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Шундай қилиб, яримўтказгич ва яримўтказгичли ўлчамли квантлашган структураларда электронли ҳолатларни ҳамда фотонлар ютилишидаги ассимметрия ва фотоуйғотилган заряд ташувчилар импульси релаксацияси билан тавсифланувчи оптик ва фотогальваник эффектларнинг миқдорий назариясини тадқиқ қилиш долзарбдир ва **илмий-амалий истиқболга эга**.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланиши устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар тараққиётининг «III. Қайта тикланувчи энергия манбаларидан фойдаланишни ривожлантириш» устувор йўналишига доир бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Ҳажмий яримўтказгич ва унинг ўлчамли квантлашган структураларида оптик ва фотогальваник эффектлар тўғрисида тадқиқотлар жаҳоннинг илғор мамлакатлари илмий тадқиқот марказлари ва университетларида олиб борилмоқда. Хусусан, А.М.Гласс (АҚШ) ва В.М.Фридкин (Москва, Россия) томонидан бир жинсли сегнетоэлектрикларда фотогальваник эффект экспериментал тадқиқ этилиб, намунанинг бир жинсли кутбланган ёруғлик билан ёритилганида аномал катта стационар фотокучланиш 20 соатдан ортиқ кузатилган.

Бу ҳодисани тажрибада К.Х.Херман (Германия) ва А.Ф.Гибсон (АҚШ) *GaP* да, Г.Рибоков ва А.А.Гунджиан (Канада) ҳамда А.А.Рогачев (Санкт-Петербург, Россия) теллурда, Ж.М.Довиак ва С.Котари (АҚШ), С.Д.Ганичев (Дортмунд, Германия), А.В.Андрианов ва И.Д.Ярошецкий (Санкт-Петербург, Россия) *p-GaAs* да кузатишган.

Россия ФАнинг мухбир аъзоси Е.Л.Ивченко, профессорлар Г.Е.Пикус, Н.С.Аверкиев (Санкт-Петербург, Россия) ва В.И.Белиничер, И.Д.Стурман, Л.И.Магарилл ва М.В.Энтин (Новосибирск, Россия) раҳбарлик қилган бир гуруҳ олимлар томонидан циркуляр ва чизикли фотогальваник эффектлар механизмлари яримўтказгич ва сегнетоэлектрикларда назарий ўрганилган. Фотоэюк симметрия маркази бўлмаган бир жинсли муҳитлардаги заряд ташувчиларнинг фононлар, фотонлар ёки киришмаларда сочилиш актининг ассимметрияси билан боғланганлиги кўрсатилган.

Бугунги кунгача Ўзбекистон олимларидан Э.З.Имамов ва Р.Я.Расулов томонидан кутбланган ёруғлик ютилаётган куб симметрияли яримўтказгичлар ҳамда яримўтказгичли квант ўраларда электронни фотонли эргаштириш ва чизикли фотогальваник эффектининг механизмлари назарий ўрганилган.

Бу ҳолда қуйидагилар: а) яримўтказгич зонавий тузилишининг ўзига хослиги, масалан, валент зонасининг айниганлиги (*p-GaAs*) ва ўтказувчанлик зонаси тармоғининг «ўрқачсимон»лиги (*n-GaP*), шунингдек, чизикли фотогальваник эффектга когерентли тўйиниш эффектининг улуши; б) электронларнинг навбатма-навбат жойлашган ҳар хил баландликли потенциал тўсиқ ва ўралардан тузилган ассимметрик яримўтказгичли структуралардан ўтиш коэффициентининг осцилляцияланиш табиати; в) яримўтказгич зонавий тузилишининг ва ўлчамли квантлашишининг оптик хоссаларига таъсири; г) баллистик чизикли фотогальваник эффект токига бир

вақтда икки ва ундан ортиқ фотонлар ютилишининг таъсири; д) магнит майдоннинг сирт фотогальваник эффектга таъсири тадқиқ этилмаган. Ушбу диссертация бундай масалаларнинг назарий тадқиқига бағишланган.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган олий таълим муассасасидаги илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация иши Фарғона давлат университети илмий тадқиқот ишлари режасининг Ф-2.1.69 «Яримўтказгичли квант ўраларда кутбланишган фотогальваник эффектлар» (2003-2007 йй.) ва ОТ-Ф2 «Яримўтказгичлар ва уларнинг ўлчамли квантланишган ўраларида кутбий оптик эффектлар» (2007-2011 йй.) ҳамда Ўзбекистон Республикаси ФА Раёсати қошидаги фундаментал тадқиқотларни қўллаб-қувватлаш Фонди (ФПФИ) илмий тадқиқот ишлари режасининг 79-06 «Яримўтказгичлар ва яримўтказгичли наноструктураларнинг кутбланишган фотонлар иштирокидаги кинетик хоссаларини назарий тадқиқ этиш» (2006-2010 йй.) лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади куб симметрияли яримўтказгичларда юз берувчи баллистик ва сирт фотогальваник эффектларнинг намоён бўлиш қонуниятлари ҳамда икки ўлчамли электронли ҳолатларни аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

мураккаб зонали яримўтказгичда бир фотонли баллистик чизикли фотогальваник эффектнинг назариясини ишлаб чиқиш;

қўшни қатламларда электронлар эффектив массалари фарқланадиган яримўтказгичли қатламлардан ташкил топган структураларда электронли ҳолатларни ва тунелланишни назарий ўрганиш;

ярим чексиз яримўтказгичда электрон эффектив массаси анизотропиясининг сирт фотогальваник эффектга таъсирини тадқиқ этиш;

тетраэдр симметрияли яримўтказгичда баллистик чизикли фотогальваник эффект токининг спектрал ва температуравий боғланишини аниқлаш.

Тадқиқотнинг объекти кетма-кет жойлашган потенциал тўсиқ ва ўралардан ташкил топган кўп қатламли яримўтказгичли носимметрик структуралар ҳамда *p-GaAs* тур ҳажмий яримўтказгичлардан иборат.

Тадқиқотнинг предмети фотонли кинетик жараёнлар, хусусан, чизикли кутбланишган ёруғлик билан ёритилган яримўтказгичларда сирт ва баллистик фототокларнинг ҳосил бўлиши ҳамда баландлик ва қалинликларига нисбатан носимметриявий тўсиқ ва ўралардан ташкил топган кўп қатламли яримўтказгичли структураларда электронли ташишдан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Қўйилган масалаларни ҳал этишда квант механикаси ва физик кинетиканинг ҳисоблаш методлари, хусусан, Келдишнинг диаграммалар техникаси, ташиш матрицаси назарияси ҳамда зичлик матрицаси, қўзғалишлар назарияси, квант механикасининг олтин қоидаси ва Больцманнинг кинетик тенгламаси қўлланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгиллиги қуйидагилардан иборат:

ассимметриявий қатламли структураларда Бастард шартига асосан қўшни қатламлардаги электронлар эффектив массалари турли қийматли бўлгандаги электронлар ўтиш коэффициентининг осцилляцияси аниқланган;

*p-GaAs*да электрон-фонон ва электрон-фотон ўзаро таъсир ассимметриясига боғлиқ бўлган ҳамда зона тармоқлариаро бир фотонли ўтишларда кузатиладиган чизикли фотогальваник эффект токининг температуравий боғланиши учун математик ифода аниқланган;

мураккаб валент зонали яримўтказгичда электронларнинг фотон ва фононларда ассимметриявий сочилиши Келдиш диаграммалар техникаси методида ҳисобланган бўлиб, баллистик фототокнинг спектрал боғланиши ютилиш коэффицентининг спектрал боғланиши билан аниқланиши кўрсатилган;

баллистик фототок коваклар гамилтонианида тўлқин векторларига чизикли ва кубинчи даражасига мутаносиб бўлган ҳадларнинг эътиборга олиниши туфайли содир бўлиши кўрсатилган бўлиб, яримўтказгич зонавий параметрлар ишорасига боғлиқ ҳолда фототокнинг миқдоран ўзгариши аниқланган;

ташқи магнит майдонидаги кўп воҳали ярим чексиз яримўтказгичда температура ва частотага боғлиқ бўлган ҳол учун сирт фототокининг математик ифодаси келтириб чиқарилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

паст ўлчамли системалар ва симметрия маркази бўлмаган кристалларда физик кинетиканинг ҳисоблаш методларини ривожлантириб, улар чизикли фотогальваник эффект бўйича экспериментал натижаларни талқин қилишнинг мустаҳкам асослари яратилган;

яримўтказгичлар ва уларнинг ўлчамли квантлашган структураларида оптик ва фотогальваник ҳодисаларнинг келгуси назарий ва экспериментал тадқиқотлари стимуллаштирилган;

чизикли фотогальваник эффект асосида ишлайдиган яримўтказгичли фотоқабулқилгичлар ва оптик затворлар параметрларини оптималлаштириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларнинг ишончлилиги олинган ҳисоблаш натижаларининг фотогальваника соҳасидаги етакчи мутахассислар томонидан бажарилган тажриба натижаларига мос тушиши, квант статистик физика ва физик кинетиканинг ҳисоблаш методларидан фойдаланилган математик ҳисоблашларнинг қатъийлиги, номувозанатдаги электронли системалар учун қаттиқ жисмлар назариясидаги диаграммалар техникасидан фойдаланилганлиги, текшириш объектининг тўғри танланганлиги билан таъминланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Диссертация натижаларининг илмий аҳамияти яримўтказгичларда чизикли ва сирт фотогальваник эффект токининг қутбланиш даражасига, спектрал ва температуравий боғланишлари, шунингдек, кўп қатламли ўлчамли квантлашган яримўтказгичли структураларнинг электронли хоссалари ҳақида янги маълумотлар беришида ўз ифодасини топган.

Ишнинг амалий аҳамияти оптик ва фотогальваник эффектлар қўлланилган қутбланган нурланиш регистрациясининг частотали диапазонини орттириш ва регистрацияни нафақат ёруғликнинг

интенсивлигига нисбатан, балки унинг қутбланишига нисбатан олиб бориш мумкинлигида ўз ифодасини топган.

Диссертацияда олинган натижалар «Электронлар эффектив массаси анизотропиясини ҳамда уларнинг фонон ва фотонлар билан ўзаро таъсирларидаги асимметрия эътиборга олинган уч ва паст ўлчамли электронли системаларида ташиш ҳодисалари» илмий йўналишини бойитган.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Куб симметрияли яримўтказгичларда баллистик ва сирт фотогальваник эффекти ҳамда икки ўлчамли электронли ҳолатларни аниқлаш асосида:

фотогальваник эффект тадқиқотлари натижалари куб симметрияли яримўтказгичларда нозикли эффектларнинг электронли ҳолатларга боғлиқлигини ўрнатишда Россия фундаментал тадқиқотлар фонди (Санкт-Петербург Физика-техника институти) «Яримўтказгичларда нозикли ва дисперсиявий эффектлар» мавзули грант лойиҳасида дисперсиявий оптик ҳодисаларни ўрганишда фойдаланилган (Россия ФА А.Ф.Иоффе номидаги Физика-техника институтининг 2018 йил 15 мартдаги 11217-278/211.5-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш ҳажмий яримўтказгичларда интенсивликка нисбатан нозикли фотонли кинетик ҳодисаларни назарий ўрганишга имкон берган;

ярим чексиз кўп воҳали яримўтказгичдаги сирт фототокининг температуравий боғланишлари 10/2000 рақамли «Яримўтказгичли кристаллар ва квант ўлчамли фотоуфотилган ва каналлашган ионларнинг экситон-поляритон люминесценцияси» мавзули грант лойиҳасида ўлчамли квантлашган яримўтказгичларда оптик ҳодисалар механизмини тушунтиришда фойдаланилган (Фан ва технологиялар агентлигининг 2017 йил 10 октябрдаги ФТА-02-11/834-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш экситон-поляритонли оптик ўтишларга сирт ҳодисаларининг таъсирини ўрганиш имконини берган;

кўп қатламли яримўтказгичли структураларда Бастард шарти эътиборга олинган ҳолда электронли ҳолатларнинг назарий ҳисоблашлари Ф2-21 рақамли «Яримўтказгич-диэлектрик чегарасидаги сирт ҳолатлар зичлигини аниқлашнинг математик моделлаштириш» мавзули грант лойиҳасида яримўтказгич- диэлектрик контакти соҳасидаги ҳолатларни ўрганишда фойдаланилган (Фан ва технологиялар агентлигининг 2017 йил 10 октябрдаги ФТА-02-11/834-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш контакт соҳасидаги икки ўлчамли электронли тизимлардаги кинетик ҳодисаларни назарий ўрганиш имконини берган.

Диссертация ишининг натижалари 6 та халқаро ва 2 та республика миқёсидаги конференцияларда маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича асосий илмий натижалар жами 18 та илмий ишда чоп этилган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 6 та мақола нашр этилган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертация матни 117 бетда келтирилган.

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 очиқ берилган, тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар берилган.

Диссертациянинг «**Симметрия маркази бўлмаган яримўтказгичларда кутбий боғланган фотогальваник эффектлар**» деб номланган биринчи бобида яримўтказгичлардаги фотогальваник эффект (ФГЭ)ларга тегишли адабиётлар шарҳи ва феноменологиявий тавсифлар қайд қилинган. Бу бобда электронларнинг сочилиш жараёнларида содир бўладиган асимметрия ҳисобига яримўтказгичларда кузатиладиган фотогальваник эффект ёки заряд ташувчилар эффектив массаларининг анизотропиясига боғлиқ бўлган ҳолда кўп воқеали яримўтказгичларда намоён бўладиган сирт фотогальваник эффект бўйича ҳозирги вақтдаги ҳолатлари таҳлил қилинган.

Шуни қайд қилиш ўринлики, бу бобда икки фотонли фотогальваник эффект (ФГЭ)нинг умумий феноменологик муносабатлари ва айрим макроскопик назариясига тегишли масалалар қаралган. Бунинг учун ёруғликнинг интенсивлигига квадратик боғланган (J) фототок кутбланиш вектори ($\vec{e}$)га нисбатан қаторга ёйилган ва икки фотонли ФГЭ токи учун қуйидаги кўринишдаги ифода олинган:

$$j_{\alpha}^{(2)} = I^2 [A_{\alpha\beta\gamma\mu\nu} \frac{e_{\beta}e_{\gamma}^* + e_{\beta}^*e_{\gamma}}{2} \frac{e_{\mu}e_{\nu}^* + e_{\mu}^*e_{\nu}}{2} + iB_{\alpha\beta\gamma\lambda} (\vec{e} \times \vec{e}^*)_{\lambda} \frac{e_{\beta}e_{\gamma}^* + e_{\beta}^*e_{\gamma}}{2} + C_{\alpha\beta\gamma} (\vec{e} \times \vec{e}^*)_{\beta} (\vec{e} \times \vec{e}^*)_{\gamma}]. \quad (1)$$

Бу ерда $\alpha, \beta, \gamma, \mu, \nu, \lambda = x, y, z$. $[e_m e_n^*]$, $i(\vec{e}^* \times \vec{e})$ катталиклар ва $\vec{j}^{(2)}$ стационар ток ҳақиқий қийматли бўлганликлари учун (1)даги $A_{\alpha\beta\gamma\mu\nu}$, $B_{\alpha\beta\gamma\lambda}$, $C_{\alpha\beta\gamma}$ тензорлар ҳам ҳақиқий қийматлидир.

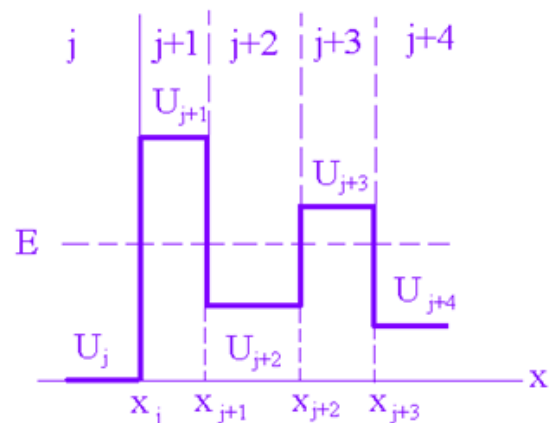
(1)нинг биринчи ҳади билан ифодаланган фототок ясси (чизиқли) кутбланган ёруғликкагина тегишли. $A_{\alpha\beta\gamma\mu\nu}$ тензор билан тавсифланувчи эффект, одатда, чизиқли кутбланган ёруғлик таъсирида кузатилганлиги сабабли уни икки фотонли чизиқли ФГЭ деб номлаш қулай. (1)нинг иккинчи ҳади билан аниқланувчи фототок эса бир вақтда эллиптик ва чизиқли кутбланган ёруғлик таъсирида намоён бўлади. Икки фотонли натижавий фототок мана шу (охирги) ҳол билан бир фотонли ФГЭда фарқ қилади. (1)нинг учинчи ҳади билан тавсифланувчи фототок эллиптик (циркуляр)

кутбланган ёруғликка тегишли. $C_{\alpha\beta\gamma}$ тензор билан тавсифланувчи эффект, одатда, циркуляр кутбланган ёруғлик таъсирида кузатилганлиги боис уникки фотонли циркуляр ФГЭ деб номлаш кулай.

Диссертациянинг «Яримўтказгичли қатламли структураларда электронли ҳолатларни ўлчамли квантлашишга эътибор олинган назарияси» деб номланган иккинчи боби хусусиятлари аниқ бир йўналишда ўзгарадиган муҳитда электрон тўлқинларининг тарқалиши назарий тадқиқ этилган. Эластик сочилиш жараёнларини ифодалаш учун, шунингдек, тўла энергияси ўзгармас қоладиган шартда ўзаро таъсирлашмовчи спинсиз зарраларнинг туннелланиши учун ёндашув бир электронли стационар Шрёдингер тенгламасига асосланган.

Кетма-кет жойлашган потенциал ўра ва потенциал тўсиқлардан иборат ассимметриявий структураларда электронли ҳолатлар назарияси қаралган. Қуйидаги натижалар олинган:

1. Электронлар де-Бройль тўлқинининг потенциал тўсиқ орқали ўтаётган оқимининг тўла оқимига нисбати каби киритилган $(t_{j,j+2})$ ўтиш коэффиценти $j \leftrightarrow (j+2)$ шакл алмаштиришга инвариантдир (1-расм). Бу электронларнинг потенциал тўсиққа қайси томондан ёндашишига боғлиқ эмаслигини англатади.



1-расм. Икки потенциал тўсиқли ассимметрик структура

2. Симметриявий структура ($U_j = U_{j+2}$) учун ўтиш коэффиценти қуйидаги кўринишни олади

$$t_{j \rightarrow j+2} = 4 \left\{ \left(1 + \frac{m_j}{m_{j+2}} \right)^2 \left[\left(1 - \frac{k_j m_{j+1}}{k_{j+1} m_j} \right) \left(1 - \frac{k_{j+1}^2 m_j}{k_j^2 m_{j+1}} \right) \sin \left[k_{j+1} (x_{j+1} - x_j) \right] \right]^2 \right\}^{-1}. \quad (2)$$

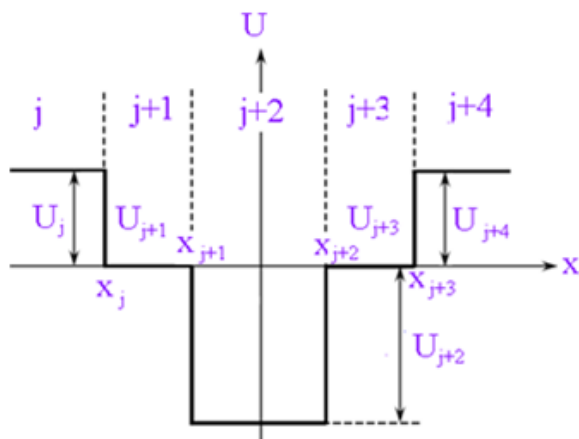
Бу ерда m_j - j тартиб рақамли қатламдаги электроннинг эффектив массаси

$$k_j(x) = k_j = \sqrt{\frac{2m_j}{\hbar^2} (E - U_j)}, \quad j = 1, 2, 3, \dots$$

3. Ассимметриявий (симметриявийда ҳам, бироқ ҳар хил структуранинг қатламларида электронларнинг эффектив массалари ҳар хил бўлса) $t_{j \rightarrow j+2}$ коэффицентнинг, яъни туннелланиш эффектнинг ҳам, потенциал тўсиқ тиниқлик коэффицентининг ҳам спектрал боғланишида осцилляция кузатилиши керак.

Бу осцилляция потенциал тўсикдан қайтаётган электрон де Бройль тўлқинларининг интерференцияси билан тавсифланади ва унинг амплитудаси потенциал тўсиқ ва унга қўшни потенциал ўрадаги электронлар тўлқин векторларининг фарқи, яъни $(\tilde{k}_{j+1} - \tilde{k}_j)$ ва $(\tilde{k}_{j+2} - \tilde{k}_{j+1})$ билан аниқланади.

Таъкидлаймизки, структурадаги бундай интерференцион ходиса структуранинг ҳар хил қатламларидаги электронлар эффектив массалари ҳар хил бўлган симметриявий структурада ҳам йўқолмайди. Бу ҳодиса фақат тўсиқ параметрлари билан назорат қилинади. Табиийки, у бундай структура тўсиғи остидан ўтаётган электронлар учун $k_{j+2}(x_{j+2} - x_{j+1}) \gg 1$ (ёки $k_{j+2}(x_{j+2} - x_{j+1}) \ll 1$) бўлган ҳолда йўқолади. Натижада, потенциал ўрадаги ўлчамли квантлашиш ҳисобига бундай структурада у орқали ўтаётган электронларнинг туннелланишида интерференцион ҳодисалар кузатилмайди.



2-расм. Тўғри бурчакли асимметрик потенциал тўсиқли структура

Охирги муносабатларни 2-расмда тасвирланган структурага нисбатан таҳлил қилинса, у ҳолда қуйидагиларга ишониш қийин эмас:

эффектив массанинг миқдоран камайиши рухсат этилган энергетик сатҳларнинг ортишига олиб келади;

потенциал тўсиқ қалинлиги ва чуқурлигининг ортиши рухсат этилган энергетик сатҳларнинг паст энергиялар соҳаси томон силжишига олиб келади;

энергетик сатҳларнинг натижавий силжиши бундай эффектлар суперпозицияси билан аниқланади. Бундай ҳолда эффектив масса улуши, одатда, қатлам параметрларининг таъсиридан кичик бўлади.

Натижада эффектив массаси кичик бўлган қатламда электронларнинг асосий ва уйғотилган ҳолатлари орасида энергетик фарқ юзага келадиган яримўтказгичли структурани яратиш мумкин. Бу ҳол, масалан, резонансли туннелли диоддан ўтаётган токнинг унга тушаётган кучланишга ўзаро боғлиқлигидаги ўзига хосликни ўрганишда қўлланилади.

Электронларнинг яримўтказгичли кўп қатламли структураларда сочилиш ҳамда туннелланиш жараёнлари назарий таҳлил қилинган.

Икки потенциал тўсиқли яримўтказгичли структураларда электронли ҳолатлар қаралган. Бунда электронларга энергиявий рухсат этилган ҳолатларнинг таҳлиллари бажарилган.

Электронларга тегишли де Бройль тўлқинларининг кетма-кет жойлашувчи потенциал ўра ва тўсиқлардан ташкил топган структурада тарқалишига оид умумий масалалар ёритилган. Ўзаро таъсирлашмайдиган

спинсиз микрозарраларнинг эластик сочилиши (ёки туннелланиши) тўғрисидаги масала ечимига нисбатан назарий ёндашув Шредингернинг стационар тенгламасини ечишга асосланган. Бунда ташиш матрицаси методидан фойдаланилган ҳолда электронларнинг туннелли боғланган потенциал тўсиқлари мавжуд структуралардаги электронларнинг энергетик спектрлари ҳисобланган. Хусусан, бир ўлчамли потенциалда локаллашган ток ташувчиларнинг стационар ҳолатлари $T_{11} = 0$, яъни ташиш матрицаси диагонал элементининг ноль бўлиш шартидан аниқланади. Агар потенциал тўсиқлар баландликлари электронларнинг энергиясидан катта бўлганида, уларнинг энергетик спектри қатламларнинг ўлчамларига боғлиқ ҳолда квантлашади.

Бобнинг тугал қисмида хулосалар келтирилган.

Диссертациянинг «**Пьезояримўтказгичларда бир фотонли қутбий фотогальваник эффектлар**» деб номланган учинчи бобида ёритилишнинг ножинслилиги билан эмас, балки симметрия маркази бўлмаган кристаллардаги эркин заряд ташувчиларнинг фотон, фонон, киришмалар билан ассимметриявий ўзаро таъсири билан боғланган фотогальваник эффект (ФГЭ) тадқиқ этилган.

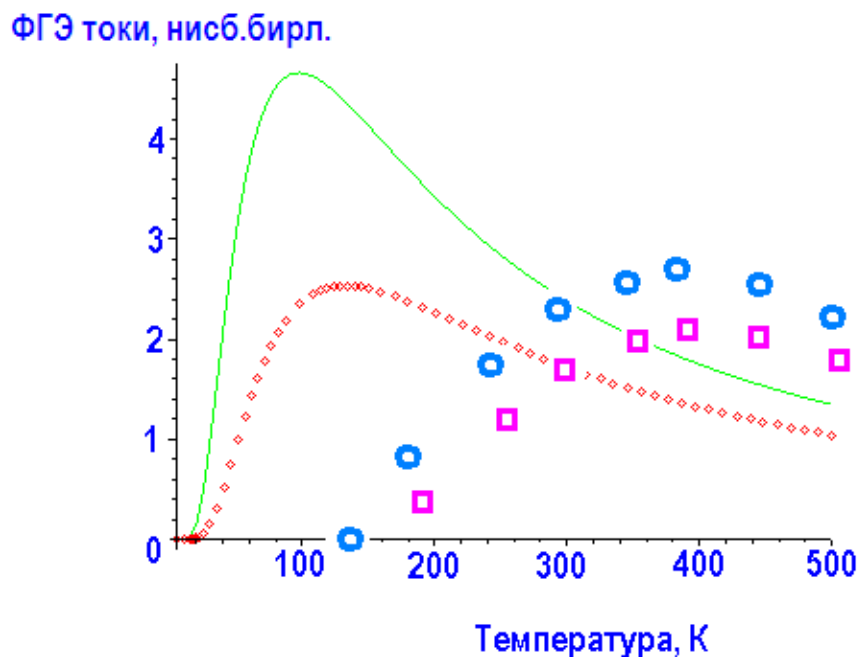
Квант механикавий таҳлил асосида симметрия маркази бўлмаган яримўтказгич (очиқ намуналар)да чизиқли қутбланган ёруғлик таъсирида ҳосил бўладиган фототок билан боғланган чизиқли фотогальваник эффектнинг механизмлари табақалаштирилган. ФГЭ токига улуш берадиган: а) бир зона ичидаги; б) зоналараро оптик ўтишлар гуруҳлаштирилган. Бу ерда, аслида, фотоннинг даставвал ютилиши, сўнгра нурланиши билан тавсифланувчи индуцирланган фотонлар билан боғлиқ жараёнларни ҳам эътиборга олиш зарур.

Мураккаб валент зонали яримўтказгичдаги чизиқли фотогальваник эффект (ЧФГЭ)га тегишли фотонли механизмнинг миқдорий назарияси қурилган бўлиб, унинг фотонли механизмига нисбатан олинган назарий натижалар *p-GaAs*да кузатилган эксперимент натижалар билан солиштирилган. Кўрсатилганки, симметрия маркази бўлмаган яримўтказгичда баллистик чизиқли фотогальваник эффект (БЧФГЭ) ковакларнинг фотон билан (БЧФГЭнинг фотонли механизми) ёки фонон билан (БЧФГЭнинг фононли механизми) ўзаро таъсир операторларида турли жуфтликли ҳадларнинг мавжудлиги билан тушунтирилади. Чизиқли фотогальваник эффект фотонли механизмининг *p-GaAs* даги токи ҳисобланган ва назарий ҳамда экспериментал натижалар солиштирилган. 3-расмда бу фототокни тавсифловчи $\chi(T)$ катталиқнинг коваклар концентрацияси $p = 7,4 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ҳамда $T > 200 \text{ К}$ бўлгандаги назарий ва экспериментал боғланишлари *p-GaAs* учун келтирилган. Бу ҳолда назарий боғланиш

$$\chi(T) \sim T^{-3/2} e^{-E^*/kT} \frac{aN_{\Omega} + b(N_{\Omega} + 1)}{2N_{\Omega} + 1} \quad (3)$$

каби ифодаланган. Бу ерда $a = b = 3,4 \times 10^{-24} \text{ sm}^{-3} / Wt$, $N_{\Omega} - \hbar\Omega$ энергияли фононнинг тақсимот функцияси, $E^* = \frac{m_{hh}m_{lh}}{m_{hh} - m_{lh}}\hbar\omega$, $m_{hh}(m_{lh})$ -оғир (енгил) ковакларнинг эффектив массаси, $\hbar\omega$ - фотон энергияси.

Таъкидлаймизки, чизикли ФГЭ бир фотонли механизмида χ температуранинг ортиши билан монотон тарзда ортиши керак. Паст температуралар соҳасида фототокка асосий улушни киришмалардан уйғотилаётган заряд ташувчилар беради. Кўриняптики, бу ҳолда фототок ўз ишорасини ўзгартиради.



3-расм. Коваклар концентрацияси $p = 7,4 \times 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ бўлган $p\text{-GaAs}$ учун чизикли ФГЭ токининг температуравий боғланиши: квадратлар $10,6 \mu\text{m}$, доиралар эса $9,5 \mu\text{m}$ тўлқин узунликли ёруғлик учун тажриба натижалари.

Баллистик чизикли ФГЭнинг фотонли механизмига тегишли назарий натижалар бўлиб, узлуксиз чизик $\lambda = 9,5 \mu\text{m}$ учун, ромблар $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ учун қайд қилинган.

Назарий боғланишнинг экспериментал боғланишга нисбатан силжиши бошқа механизмларнинг мавжудлигидан далолат беради. Бу ҳол алоҳида ҳисоблашларни талаб қилади.

Эркин заряд ташувчиларда ютилиш соҳасида $p\text{-GaAs}$ учун чизикли ФГЭ токининг микдорий ҳисоблашлари кўрсатадики, фононли ва фотонли механизмлар фототокка микдоран тенг улушлар беради. Ҳар бир улушларнинг абсолют қийматлари тажриба натижаларидан 2,5 мартадан ортмайдиган тарзда бўлади. Шундай қилиб, юқорида қайд қилинган механизмлар $p\text{-GaAs}$ да нафақат температуравий боғланишни, балки чизикли ФГЭ токини микдоран тавсифлай олади.

Фототокнинг паст температуралар ($T < 300 \text{ K}$) соҳасига келсак, у ҳолда тажриба натижаларининг таҳлилидан келиб чиқадики, у нейтрал акцепторлар (Zn). N_a^0 концентрациясига пропорционалдир. Киришмаларнинг уйғонишига боғлиқ бўлган фототок фотоэлектронлар тақсимот функциясининг киришма октупол моменти ҳисобига содир бўладиган ассимметрияси билан тушунтирилади. Юқорида қайд қилинган механизм учун A_3B_5 кристаллардаги фототок

$$j_\alpha = IN_a R(\omega) Q e_\beta e_\gamma |\delta_{\alpha\beta\gamma}|, \quad (4)$$

ифода билан аниқланади, бу ерда Q - киришманинг октуполь моментини тавсифловчи доимийлик. Бундай ФГЭ токининг тажрибада кузатилган натижаларини тавсифловчи ҳисоблашлардан фойдаланган ҳолда Q доимийликнинг миқдорини аниқлаш мумкин. $GaAs$ учун $Q/e = 2,5 \cdot 10^{-33} \text{ см}^3$. Q нинг бу миқдори назарий баҳоланган $Q/e = (a_0/4)^3 = 1,33 \cdot 10^{-33} \text{ см}^3$ миқдорга яқиндир.

Назарий ҳисоблашлар кўрсатадики, фототок нафақат $\chi(T)$ катталик ёрдамида, балки узунлик бирликли ҳамда намунанинг зонавий параметрлари билан аниқланадиган $L^{(v)}$ катталик билан тавсифланади. Хусусан, электрон-фотонли ўзаро таъсир ассимметрияси эффектив гамильтонианда $\vec{k}$ га нисбатан асосий квадратик $H_{k^2}(\vec{k}) = -\left[\left(A + \frac{5}{4}B\right)k^2 - B(\vec{j} \cdot \vec{k})^2\right]$, ҳадлардан ташқари, $\vec{k}$ га нисбатан куб ва чизикли: $D \sum_\alpha J_\alpha k_\alpha (k_{\alpha+1}^2 - k_{\alpha+2}^2), \quad \frac{4}{\sqrt{3}} k_0 \sum_\alpha k_\alpha [J_\alpha, J_{\alpha+1}^2 - J_{\alpha+2}^2]$ ҳадларни ҳам эътиборга олиш талаб этилади. Бу ерда k_0 ва D - яримўтказгичнинг зонавий параметрлари, $A \pm B = \hbar^2 / (2m_{hh, lh})$, $J_\alpha - Y_m^{3/2} (m = \pm 3/2, \pm 1/2)$ базисга тегишли бурчакли момент операторлари матрицалари, $[J_\alpha, J_\beta]$ -бурчакли момент матрицаларининг симметриявий кўпайтмаларини англатади, $\alpha, \beta = x, y, z$. k_0 доимийлик қатор кристалларда $(1 \div 6) \cdot 10^{-10} \text{ eV} \cdot \text{см}$ қийматлар қабул қилади. Агар k_0 нинг $p\text{-GaAs}$ учун ушбу қийматларидан фойдаланилса, у ҳолда намуна CO_2 -лазер билан ёритилганида ($\hbar\omega = 0,12 \text{ eV}$) ҳамда хона температурасида $L_1^{(1)} = (0,2 \div 1,4) \cdot 10^{-8} \text{ см} = (0,15 \div 1) X_{\text{exp}}$ бўлади, бу ерда $X_{\text{exp}} = 0,17 \cdot 10^{-7} \text{ см}$. Бу баҳо шуни кўрсатадики, баллистик чизикли ФГЭ токига каваклар эффектив гамильтонианидаги $\vec{k}$ га нисбатан чизикли релятивистик ҳад эътиборга олинишида содир бўладиган ковак-фотонли ўзаро таъсир ассимметрияси ҳисобига бериладиган улуш тажриба натижаларига яқин бўлади.

Шунингдек, $\vec{k} \parallel [011]$ ҳолда $p\text{-GaAs}$ учун қуйидаги параметрларда: $|D'| = 3,25 \cdot 10^{-23} \text{ eV} \cdot \text{см}^3$, $B = 3,25 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{см}^2$ ($m_{lh} = 0,068 m_0$, $m_{hh} = 0,12 m_0$) $L^{(3)} = 4,2 \cdot 10^{-8} \text{ см} = 2,7 X_{\text{exp}}$ натижани оламиз. Бу ерда таъкидлаймизки, таҳлил

этилган адабиётларда эффектив гамильтонианда тўлқин векторга нисбатан чизиқли ва кубли ҳадлар олдидаги зонавий параметрларнинг ишораси тўғрисида маълумот берилмаган. Шу сабабли фототокка D ва k_0 доимийликларга мутаносиб бўлган улушлар ҳақида аниқ бир мулоҳаза юритиш қийин.

Бироқ, агар D катталик мусбат, k_0 эса манфий ишорали деб олинса, у ҳолда фототокка берилган натижавий улуш тажриба натижаларига яқин бўлади. Агар у катталиклар бир хил ишорали бўлса, у ҳолда фототокка берилган натижавий улушнинг модули тажриба натижаларидан сезиларли фарқ қилади.

Ҳисоблашлар шуни кўрсатадики, зонавий параметрлар миқдоран бир хил бўлса, у ҳолда фотон энергиясининг ортиши билан фототокнинг максимуми миқдоран ортиб, катта температуралар соҳасига силжийди. Масалан, $m_{hh}=0,68m_0$, $m_l=0,12m_0$ ҳамда $\hbar\omega=117\text{ meV}$ ҳолларда фототокнинг фононларнинг нурлантирилишига боғлиқ максимуми $T=120\text{K}$ да, фононларнинг ютилишида эса $T=360\text{K}$ да кузатилади. $\hbar\omega=130\text{ meV}$ ҳолда фототокнинг фононларнинг нурлантирилишига боғлиқ максимуми $T=180\text{K}$ да, фононларнинг ютилишида эса $T=420\text{K}$ да кузатилади.

Фотон энергиясининг ортиши билан фототокнинг фононлар ютилишига боғлиқ максимал қиймати деярли ўзгармайди, фононларнинг нурланишида эса 1,1 марта ортади. Таъкидлаш жоизки, оғир ковак эффектив массаси ($m_{hh}=0,12m_0$) ва фотон энергияси ($\hbar\omega=117\text{ meV}$) ўзгармаган ҳолда енгил ковак эффектив массасининг (масалан, $4/3$ мартага) ортишида, фототокнинг фононларнинг нурланишига оид максимуми тақрибан 1,6 марта ортади ва катта температуралар соҳасига силжийди. Бу ҳолда фототокнинг максимуми миқдоран деярли ўзгармайди (аниқроғи 1,08 мартага камаяди), бироқ бу ҳолда ҳам катта температуралар соҳасига силжийди. Ниҳоят, таъкидламоқчимизки, фототокнинг назарий ва экспериментал температуравий боғланишлари $m_{hh}/m_l=1.135$ ҳолда бир-бирига яқин бўлади, бироқ фононларнинг ютилишига боғлиқ улуш сезиларли бўлади.

Шунингдек мураккаб зонали яримўтказгичда когерентли тўйиниш ҳодисаси эътиборга олинганида чизиқли ФГЭнинг содир бўлиши назарий таҳлил қилинган.

Диссертациянинг «**Кўп воҳали яримўтказгичда сирт фотогальваник эффект**» деб номланган тўртинчи боби кўп воҳали яримўтказгичда сирт фотогальваник эффектининг назарий тадқиқотида бағишланган бўлиб, унда электронларнинг сиртдан кўзгули қайтишда содир бўладиган сирт ФГЭ токини ҳисоблаш имконини берувчи умумий муносабатлар келтирилган. Бу ҳолда Больцман тенгламаси ечилган, электромагнит тўлқин электр майдон кучланганлигига нисбатан иккинчи тартибли яқинлашишда тақсимот функцияси аниқланган. Шунингдек, кўп воҳали яримўтказгичда эргаштириш токи ҳисобланган.

Электронлар тақсимот функциясининг кўп воҳали ярим чексиз германий ёки кремний каби яримўтказгичда сирт фототокини ҳисоблаш имконини берувчи номувозанатли ҳади ифодаси олинган. Бу ҳолда электронларнинг сиртдан ҳам кўзгули ва ҳам диффузияли сочилиши эътиборга олинган. Шунингдек, фототокнинг икки: фотон импульсига боғлиқ ва боғлиқ бўлмаган ҳадлари ҳисобланган. Улар ёрдамида чизиқли (ёки циркуляр) фотогальваник эффект ва фотонли эргаштириш эффекти токлари таҳлил қилиниши мумкин. Бундай фототоклар ҳам спектрал ва ҳам температуравий боғланишлар табиати билан бир-биридан фарқ қилади. Шунингдек, уларнинг кузатилиши тажрибанинг геометрияси ва ёруғликнинг қутбланиш даражасига боғлиқ бўлади.

Шунингдек, ярим чексиз яримўтказгичда баллистик фотоэюк ёруғлик интенсивлигига тўғри мутаносиб бўлиб, фотоэлектронларнинг тезлигига, заряд ташувчилар эркин югуриш вақти ва йўлига боғлиқ бўлиши кўрсатилган. Заряд ташувчиларнинг сиртдан кўзгули қайтишига боғлиқ фотоэюк ёруғликнинг ютилиши сезиларли бўлган ва заряд ташувчилар эркин югуриш йўли катта бўлган намуналарда ҳажмий эюкдан миқдоран катта бўлиши мумкин.

Таъкидлаш ўринлики, чизиқли сирт ФГЭ токи билан бир вақтда фотонли эргаштириш эффекти токи ҳамда спинга боғлиқ ток (спингальваник эффект) ҳам содир бўлиши мумкин. Охирги эффект ёки спин ориентирланган заряд ташувчиларнинг қарама-қарши сиртлардан ассимметриявий сочилиши билан ёхуд спинларнинг диффузияси ёки релаксацияси ҳисобига содир бўлиши мумкин.

ХУЛОСА

Куб симметрияли яримўтказгичларда баллистик ва сирт фотогальваник эффекти ҳамда икки ўлчамли электронли ҳолатларни тадқиқ қилиш асосида куйидаги хулосалар қилинди:

1. Бастард шарти эътиборга олинган ҳолда ассимметрияли структуралардаги потенциал тўсиқлар тиниқлик коэффиценти учун ифода, икки ўлчамли электронларнинг туннелланишидаги осцилляцияни кузатиш шартлари аниқланган.

2. Симметрия маркази бўлмаган яримўтказгичда баллистик чизиқли фотогальваник эффект ковакларнинг фотонлар ўзаро таъсир операторида ҳар хил жуфтликли ҳадларнинг мавжудлиги туфайли содир бўлиши кўрсатилган.

3. p -GaAs валент зонаси оғир ва енгил коваклар тармоқлариаро оптик ўтишлар эҳтимоллиги ассимметриясига боғлиқ баллистик фототокнинг температуравий ва частотали боғланиши учун математик ифода олинган бўлиб, бунда зонавий параметрларнинг ишоралари ҳисобига фототокнинг миқдоран ўзгариши кўрсатилган.

4. p -GaAsда экспериментал кузатилган фототокнинг температура ортиши билан экстремум орқали ўтиши коваклар гамилтонианида тўлқин векторларига чизиқли ва кубинчи даражасига мутаносиб бўлган зонавий параметрларнинг қиймати ва ишораси билан боғланганлиги кўрсатилган.

5. Релаксация вақти яқинлашишида ярим чексиз кристалл сиртидан кўзгули ёки диффузиявий сочилаётган электронларнинг номувозанатдаги тақсимот функцияси билан аниқланадиган фототок ҳисобланган. Сиртдан диффузияли сочилаётган электронлар тақсимот функцияси фақат уларнинг энергиясига боғлиқлиги ва электронлар тўлиқ оқимининг нолга айланиш шарти билан аниқланиши кўрсатилган.

6. Заряд ташувчилар энергетик спектрининг анизотропиясини эътиборга олиб, қутбланган ёруғлик ютилишида ярим чексиз кўп воҳали яримўтказгичдаги сирт фототокига ташқи магнит майдон таъсири аниқланган. Бу ҳолда сиртдан электронларнинг лармор орбитаси радиусига тенг масофада фототокнинг мужассамлашган бўлиши кўрсатилган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.28.02.2018.FM.60.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ПРИ АНДИЖАНСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ**

ФЕРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

РАСУЛОВ ВОХОБ РУСТАМОВИЧ

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО И
ПОВЕРХНОСТНОГО ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА И
ДВУМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ В
ПОЛУПРОВОДНИКАХ КУБИЧЕСКОЙ СИММЕТРИИ**

01.04.10 – Физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК**

Андижан – 2018

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2017.2.PhD/FM83.

Диссертация выполнена в Ферганском государственном университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.adu.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный руководитель:

Каримов Иброхим Набиевич
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты:

Имамов Эркин Зуннунович
доктор физико-математических наук, профессор
Гулямов Гафур
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация:

Национальный университет Узбекистана.

Защита диссертации состоится «__» _____ 2018 года в ____ часов на заседании Научного совета PhD.28.02.2018.FM.60.01 при Андижанском государственном университете. (Адрес: 170100, г. Андижан, ул. Университетская, дом 129. Зал конференций Андижанского государственного университета Тел./факс: 0(374) 223-88-30; e-mail: agsu_info@edu.uz)

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Андижанского государственного университета (зарегистрирована за № ____). (Адрес: 170100, г. Андижан, ул. Университетская, дом 129. зал конференций Андижанского государственного университета. Тел./факс: 0(374) 223-88-30; e-mail: agsu_info@edu.uz)

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2018 г.
(протокол рассылки № _____ от «__» _____ 2018 г.)

С.З.Зайнабидинов

Председатель научного совета
по присуждению ученой степени, д.ф.-м.н., академик

А.О. Курбанов

Ученый секретарь научного совета по
присуждению ученой степени, к.ф.-м.н.

М.З. Носиров

Заместитель председателя научного семинара при
научном совете по присуждению ученой степени,
к.ф.-м.н., доцент

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время в мире в интенсивном развитии физики полупроводников играют важную роль полупроводники кубической симметрии. Создание фотопреобразователей, фотодатчиков на основе таких полупроводников, работающих на базе фотогальванического эффекта, интенсивно развивается. Ряд физических свойств полупроводников кубической симметрии зависит от механизмов рассеяния носителей заряда в его объеме, исследование баллистического и поверхностного фотогальванического эффекта и двумерных электронных состояний является одной из важнейших задач в этой области.

В нашей стране получены заметные результаты в приоритетных направлениях науки, в том числе, по «Развитию использования источников возобновляемой энергии», в исследованиях фотонно-кинетических явлений в полупроводниковых наноструктурах. В стратегии действий дальнейшего развития Республики Узбекистан уделено особое внимание развитию научных исследований и инновационной деятельности, задачам создания эффективных механизмов внедрения в практику научных и инновационных достижений, в том числе исследований физических процессов в трех и двумерных электронных системах.

На сегодняшний день в мире большое внимание обращается на физические процессы в полупроводниковых наноструктурах, в том числе важнейшими задачами являются реализации целевых научных исследований по: определению баллистического и поверхностного фотогальванического эффекта в полупроводниках кубической симметрии, а также двумерных электронных состояний; сопоставлению фотонно-кинетических свойств квантовых ям, эффектов размерного квантования, механизмов рассеяния носителей заряда, энергетических спектров квазичастиц в поляризационных фотогальванических эффектах; определению взаимодействия поляризованного излучения с носителями заряда полупроводников со сложной валентной зоной и их наноструктур, а также электронных, оптических и фотогальванических свойств.

Настоящее диссертационное научное исследование в определенной степени служит ответственному выполнению задачи, предусмотренной в ряде указов и постановлений Президента страны, в том числе в Указе Президента № УП-4947 «О мерах по дальнейшей реализации Стратегии действий по развитию Республики Узбекистан в 2017-2021 годах» от 7 февраля 2017 года, и в Постановлениях Президента № 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, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере и изложенных в соответствующих законодательных актах.

Таким образом, исследование электронных состояний и создание количественной теории оптических и фотогальванических эффектов, обусловленных асимметрией акта поглощения фотонов, процессов релаксации импульса фотовозбужденных носителей заряда, как в полупроводниках, так и в полупроводниковых размерно-квантованных структурах является **актуальным** и имеет **научную практическую перспективу**.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данная исследовательская работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий: «III. Развитие использования источников возобновляемой энергии».

Степень изученности проблемы. Исследования оптических и фотогальванических эффектов в объемных полупроводниках и в их размерно-квантованных структурах проводятся в университетах и научно-исследовательских центрах ведущих стран мира. В частности, А.М.Гласс (США) и В.М.Фридкин (Москва, Россия) экспериментально наблюдали аномально большое стационарное фотонапряжение в однородном сегнетоэлектрике при однородном освещении поляризованным светом более чем 20 часов. Перенос заряда в течение нескольких часов столь большой, что возможность объяснения данного явления с помощью релаксации полей в кристаллах полностью исключается.

Такое явление экспериментально исследовано К.Х.Херманом (Германия) и А.Ф.Гибсоном (США) в *GaP*, Г.Рибаковсом и А.А.Гунджианом (Канада) и А.А.Рогачевым (Санкт Петербург, Россия) в теллуре, Дж.М.Довиаком и С.Котари (США), С.Д.Ганичевым (Дортмунд, Германия), А.В.Андриановым и И.Д.Ярошецким (Санкт Петербург, Россия) в *p-GaAs*.

Группой российских ученых, руководимых профессором Г.Е.Пикусом, членом корреспондентом РАН Е.Л.Ивченко, профессором Н.С.Аверкиевым (Санкт Петербург, Россия) и В.И.Белиничером, И.Д.Стурманом, Л.И.Магариллом и М.В.Энтиным (Новосибирск, Россия) теоретически исследованы механизмы циркулярного и линейного фотогальванического эффекта в полупроводниках и сегнетоэлектриках. Показано, что возникновение фотоэдс в однородных средах без центра симметрии обусловлено асимметрией актом рассеяния носителей заряда на фононах, на фотонах или на примесях.

До сегодняшнего дня учеными Узбекистана Э.З.Имамовым и Р.Я.Расуловым теоретически изучены ряды механизмов эффекта фотонного увлечения, линейного фотогальванического эффекта в полупроводниках кубической симметрии и поглощения поляризованного света в полупроводниковых квантовых ямах.

При этом не исследованы: а) влияние особенности зонной структуры полупроводника, например, вырождение валентной зоны (в *p-GaAs*) и «горбообразность» подзоны зоны проводимости (в *n-GaP*), а также вклад эффекта когерентного насыщения на линейный фотогальванический эффект; б) осцилляционный характер коэффициента прохождения электронов через

ассимметричные полупроводниковые структуры, состоящие из чередующихся потенциальных барьеров различной высоты и ям; в) влияние особенности зонной структуры полупроводников и размерного квантования на их оптические свойства; г) вклад в ток баллистического линейного фотогальванического эффекта одновременного поглощения двух или более фотонов; д) влияние магнитного поля на поверхностный фотогальванический эффект, теоретическому исследованию которых посвящена данная диссертация.

Связь темы диссертационного исследования с тематическими планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках плана научно-исследовательских работ Ферганского государственного университета при Ф-2.1.69 «Поляризационные фотогальванические эффекты в полупроводниковых квантовых ямах» (2003-2007 гг.) и ОТ-Ф2 (Физика и астрономия) «Поляризационные оптические эффекты в полупроводниках и в размерно-квантованных ямах» (2007-2011 гг.), а также в рамках плана научно-исследовательских работ Фонда поддержки фундаментальных исследований при Президиуме АН РУз (ФПФИ) 79-06 «Теоретическое исследования кинетических свойств полупроводников и полупроводниковых наноструктур с участием поляризованных фотонов» (2006-2010 гг.).

Целью исследования являются теоретические выявления механизмов поверхностного и линейного фотогальванического эффекта в полупроводниках кубической симметрии, а также двумерных электронных состояний.

Задачи исследования:

построение теории однофотонного баллистического линейного фотогальванического эффекта в полупроводнике со сложной зоной;

теоретическое изучение электронных состояний и туннелирования в слоистых полупроводниковых структурах с учетом разности эффективной массы электронов в соседних слоях;

исследование влияния анизотропии эффективных масс электронов на поверхностный фотогальванический эффект в полубесконечном полупроводнике;

определение спектральной и температурной зависимости тока баллистического линейного фотогальванического эффекта в полупроводнике симметрией тетраэдра.

Объектами исследования являются несимметричные многослойные полупроводниковые структуры, состоящие из чередующихся потенциальных барьеров и ям, и объемные полупроводники типа p -GaAs.

Предметами исследования являются фотонно-кинетические процессы, в частности, возникновение поверхностного и баллистического фототоков в полупроводниках при их освещении линейно поляризованным светом, а также электронные переносы в многослойных полупроводниковых структурах, состоящих из несимметричных по высоте и ширине барьеров и ям.

Методы исследования. Для решения поставленных задач применены методы расчетов квантовой механики и физической кинетики, в частности, использованы диаграммная техника Келдыша, теория матрицы переноса и матрицы плотности, теория возмущений, золотое правило квантовой механики, кинетическое уравнение Больцмана.

Научная новизна исследования:

определена осцилляция коэффициента прохождения, когда различны эффективные массы электронов в соседних слоях ассиметричной слоистой структуры на основе условия Бастарда;

определено математическое выражение температурной зависимости тока линейного фотогальванического эффекта в p -GaAs, наблюдаемого при межподзонных однофотонных переходах, обусловленного ассиметрией электрон-фононного и электрон-фотонного взаимодействий;

ассиметричное рассеяние электронов на фотонах и на фононах в полупроводниках со сложной валентной зоной рассчитано методом диаграммной техники Келдыша, показано, что спектральная зависимость баллистического фототока определяется спектральной зависимостью коэффициента поглощения;

показано, что возникновение баллистического фототока, обусловлено с учетом линейного и кубического по волновому вектору слагаемыми в гамильтониане дырок, определено изменение численного значения фототока в зависимости от знака зонных параметров полупроводника;

выведено математическое выражение для поверхностного фототока в полубесконечном многодолинном полупроводнике во внешнем магнитном поле, в зависимости от температуры и частоты.

Практические результаты исследования состоят из следующих:

развивают методы расчетов физической кинетики в низкоразмерных системах и в кристаллах без центра симметрии, закладывают прочную основу для интерпретации экспериментальных результатов по линейному фотогальваническому эффекту;

стимулируют дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования оптических и фотогальванических явлений в полупроводниках и в их квантово-размерных структурах;

дают возможность оптимизации параметров полупроводниковых фотоприемников и оптических затворов, работающих на основе линейного фотогальванического эффекта.

Достоверность результатов исследования обеспечена совпадением теоретических результатов с экспериментальными данными, полученными ведущими специалистами по фотогальванике, правильным выбором объектов исследования, строгостью математических выкладок, где использованы методы квантовой статистической физики и физической кинетики, применяемые в теории твердого тела, такие как диаграммная техника для неравновесных электронных систем.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования заключается в получении

новых данных о поляризационной, спектральной и температурной зависимостях тока линейного и поверхностного фотогальванических эффектов в полупроводниках, а также данных об электронном свойстве многослойных размерно-квантованных полупроводниковых структур.

Практическая значимость работы заключается в том, что применение поляризационных оптических и фотогальванических эффектов для регистрации излучения позволяет расширить частотный диапазон и проводить регистрацию не только по интенсивности, но и по поляризации света.

Результаты, полученные в диссертации, позволяют развивать научное направление: «Явления переноса в трехмерных и низкоразмерных электронных системах с учетом анизотропии эффективных масс электронов и ассиметрии их взаимодействия с фононами и фотонами».

Внедрение результатов исследования. Следующие результаты по исследованию баллистического и поверхностного фотогальванического эффекта и двумерных электронных состояний в полупроводниках кубической симметрии:

расчеты по фотогальваническим эффектам использованы в гранте «Нелинейные и дисперсионные эффекты в полупроводниках» при изучении дисперсионных оптических явлений (Справка Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе АН России № 11217-278/211.5 от 15 марта 2018 г.). Использование научных результатов делает возможным теоретическое изучение нелинейных по интенсивности фотонно-кинетических явлений в объемных полупроводниках.

температурная зависимость поверхностного фототока в полубесконечном многодолинном полупроводнике использована в гранте №10/2000 «Экситон-поляритонная люминесценция полупроводниковых кристаллов и квантово-размерных структур при фотовозбуждении и каналировании ионов» при объяснении механизмов оптических явлений в размерно квантованных полупроводниках (Справка Агентства Науки и технологий № ФТА-02-11/834 от 10 октября 2017 г.). Использование научных результатов делает возможным изучение влияния поверхностных явлений на экситон-поляритонные оптические переходы;

расчеты по электронным состояниям в многослойных полупроводниковых структурах с учетом условия Бастарда использованы в проекте Ф2-21 «Математическое моделирование определения плотности поверхностных состояний на границе полупроводник-диэлектрик» при изучении состояний в области контакта полупроводник-диэлектрик (Справка Агентства Науки и технологий № ФТА-02-11/834 от 10 октября 2017 г.). Использование научных результатов даёт возможность теоретически изучить кинетические явления в двумерных электронных системах в области контакта;

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 6 международных и 2 Республиканских конференциях.

Опубликованность результатов. По материалам диссертации опубликованы 18 научных работ, из них 6 статей в журналах, рекомендованных

Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и использованной литературы. Текст диссертации изложен на 117 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Настоящая диссертация посвящена теоретическому исследованию одно и двух фотонного фотогальванического эффекта (ФГЭ) в полупроводнике со сложной зонной структурой. В ней также исследованы электронные состояния в многослойных полупроводниковых структурах, состоящих из чередующихся квантовых ям и потенциальных барьеров.

Во введении обоснованы 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 «**Поляризационно-зависимые фотогальванические эффекты в полупроводниках без центра симметрии**» дается обзор литературы и феноменологическая интерпретация поляризационных фотогальванических эффектов в полупроводниках и поверхностного фотогальванического эффекта в многодолинном полупроводнике. В этой главе анализируется современное состояние фотогальванических эффектов, обусловленное либо асимметрией актов рассеяния электронов, либо анизотропией эффективных масс носителей заряда.

В этой главе также рассмотрены феноменологическое описание и некоторые общие вопросы макроскопической теории двухфотонного фотогальванического эффекта. Для этого квадратичный по интенсивности возбуждающего света (J) фототок разложен в ряд по степеням вектора поляризации ($\vec{e}$) света. В результате получим выражение для тока двухфотонного ФГЭ в виде

$$j_{\alpha}^{(2)} = I^2 [A_{\alpha\beta\gamma\mu\nu} \frac{e_{\beta}e_{\gamma}^* + e_{\beta}^*e_{\gamma}}{2} \frac{e_{\mu}e_{\nu}^* + e_{\mu}^*e_{\nu}}{2} + iB_{\alpha\beta\gamma\lambda} (\vec{e} \times \vec{e}^*)_{\lambda} \frac{e_{\beta}e_{\gamma}^* + e_{\beta}^*e_{\gamma}}{2} + C_{\alpha\beta\gamma} (\vec{e} \times \vec{e}^*)_{\beta} (\vec{e} \times \vec{e}^*)_{\gamma}], \quad (4)$$

где $\alpha, \beta, \gamma, \mu, \nu, \lambda = x, y, z$. Так как величины $[e_m e_n^*]$, $i(\vec{e}^* \times \vec{e})$ и стационарный ток $\vec{j}^{(2)}$ вещественны, тензоры $A_{\alpha\beta\gamma\mu\nu}$, $B_{\alpha\beta\gamma\lambda}$, $C_{\alpha\beta\gamma}$ в (4) также вещественны. Фототок, связанный с третьим слагаемым (4), отличен от нуля для линейно поляризованного света. Эффект, описываемый тензором $A_{\alpha\beta\gamma\mu\nu}$ обычно, наблюдается при линейно поляризованном возбуждении и его удобно называть двухфотонным линейным ФГЭ. Фототок, связанный со вторым и четвертым слагаемыми (4), отличен от нуля при одновременном освещении эллиптически и линейно поляризованным светом. Именно последним вкладом в общий фототок отличается двухфотонный ФГЭ от однофотонного.

Во второй главе «Теория электронных состояний в полупроводниковых слоистых структурах с учетом размерного квантования» теоретически исследовано распространение электронных волн в среде, свойства которой меняются только вдоль определенного направления. Подход основан на использовании одноэлектронного стационарного уравнения Шрёдингера для описания процессов упругого рассеяния, в том числе туннелирования, не взаимодействующих бесспиновых частиц при условии сохранения их полной энергии.

Теоретически рассматриваются электронные состояния в ассиметричных структурах, состоящих из чередующихся потенциальных ям и потенциальных барьеров. Получены следующие результаты:

1. Коэффициент прохождения ($t_{j,j+2}$)

через потенциальный барьер, введенный как отношение плотности, прошедшей через барьер де-Бройльовских волн электронов к полной плотности потока, инвариантен преобразованию $j \leftrightarrow (j+2)$. Это означает, что коэффициент прохождения не зависит от того, с какой стороны налетают электроны на потенциальный барьер (рис.1).

2. Для симметричной структуры ($U_j = U_{j+2}$) коэффициент прохождения имеет вид

$$t_{j \rightarrow j+2} = 4 \left\{ \left(1 + \frac{m_j}{m_{j+2}} \right)^2 \left[\left(1 - \frac{k_j m_{j+1}}{k_{j+1} m_j} \right) \left(1 - \frac{k_{j+1}^2 m_j}{k_j^2 m_{j+1}} \right) \sin[k_{j+1}(x_{j+1} - x_j)] \right]^2 \right\}^{-1}. \quad (1)$$

где m_j - эффективная масса электронов в слое с номером j ,

$$k_j(x) = k_j = \sqrt{\frac{2m_j}{\hbar^2}(E - U_j)}, \quad j = 1, 2, 3, \dots$$

3. В ассиметричной (и в симметричной, но с различными эффективными массами электронов в различных областях (слоях)) структуре должна наблюдаться осцилляция в спектральной зависимости как коэффициента $t_{j \rightarrow j+2}$, т.е. в эффекте туннелирования, так и в коэффициенте прозрачности потенциального барьера. Эта осцилляция обусловлена интерференцией волн, отраженных от потенциального барьера, и ее амплитуда определяется разностью между волновыми векторами электронов, находящихся в потенциальном барьере и в соседней ему потенциальных ямах, т.е. $(\tilde{k}_{j+1} - \tilde{k}_j)$ и $(\tilde{k}_{j+2} - \tilde{k}_{j+1})$.

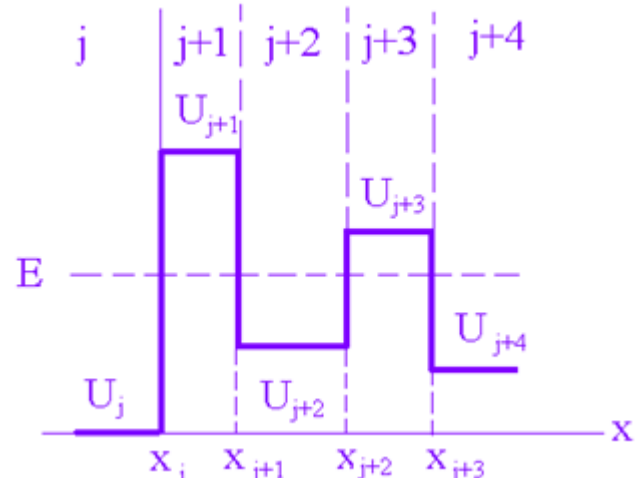


Рис.1. Ассиметричная структура с двумя потенциальными барьерами.

Отметим лишь, что такое интерференционное явление в структуре не исчезает даже в симметричной структуре из-за разности эффективных масс электронов, находящихся в различных областях структуры. Это явление контролируется только с параметрами барьера и оно исчезает при подбарьерном переходе электронов через такие структуры в случае, когда $k_{j+2}(x_{j+2} - x_{j+1}) \gg 1$ (либо $k_{j+2}(x_{j+2} - x_{j+1}) \ll 1$). В результате в таких структурах из-за размерного квантования в потенциальных ямах не наблюдаются интерференционные явления в туннелировании электронов через структуру.

Анализируя последние соотношения в отношении структуры, представленной на рис.1, нетрудно убедиться в том, что

уменьшение эффективной массы повышает разрешенный уровень энергии;

увеличение толщины и глубины провала сдвигает разрешенный уровень энергии в область меньших энергий;

результатирующее смещение уровня энергии определяется суперпозицией данных эффектов, при этом влияние эффективной массы обычно слабее, чем влияние параметров провала.

В результате оказывается, что можно создать полупроводниковую структуру, у которой наличие слоя с меньшей эффективной массой приведет к энергетическому зазору между основным и возбужденным состояниями электронов. Этот случай, например, используется в увеличении контрастности зависимости тока, проходящего через резонансно-туннельный диод от падения напряжения.

Также проведен теоретический анализ процессов рассеяния и туннелирования микрочастиц в полупроводниковых слоистых полупроводниковых структурах.

Рассмотрены электронные свойства структур с двумя потенциальными барьерами. Проанализированы разрешенные энергетические состояния электронов.

Также рассмотрены общие вопросы распространения волн де Бройля электронов в структуре, состоящей из чередующихся потенциальных ям и барьеров (слоев). Теоретический подход к задаче об упругом рассеянии (или туннелировании) не взаимодействующих бесспиновых микрочастиц основан на решении стационарного уравнения Шредингера. При этом, используя метод матрицы переноса, рассчитан энергетический спектр электронов в структурах с туннельно-связанными потенциальными барьерами, в частности, стационарные состояния носителей заряда, локализованные в

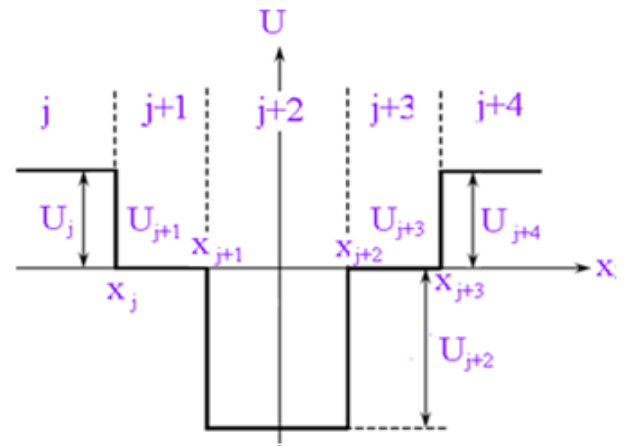


Рис.2. Структура с ассиметричными прямоугольными потенциальными барьерами

одномерном потенциале, которые определяются из условия $T_{11} = 0$, т.е. из условия обращения в ноль диагонального элемента матрицы переноса. Когда высота потенциальных барьеров превышает энергию электронов, тогда энергетический спектр электронов квантуется в зависимости от размера слоев.

В заключении главы приведены соответствующие выводы.

В третьей главе «**Однофотонные поляризационные фотогальванические эффекты в пьезополупроводниках**» исследован фотогальванический эффект (ФГЭ), обусловленный не неоднородностью освещения, а асимметрией элементарных процессов взаимодействия свободных носителей с фотонами, фононами, примесями и между собой в кристаллах без центра симметрии.

На основе квантово-механического анализа классифицированы механизмы линейного фотогальванического эффекта, обусловленного возникновением э.д.с. (в разомкнутом образце) в полупроводнике без центра симметрии при освещении его линейно поляризованным светом. Сгруппированы оптические переходы: а) внутризонные; б) междוזонные, дающие вклады в ток ФГЭ. Указано, что, в принципе, надо учитывать процессы, связанные с индуцированным излучением фотона, предполагая, при этом, что сначала излучается фотон, а потом поглощается.

Построена количественная теория фотонного механизма линейного фотогальванического эффекта (ЛФГЭ) в полупроводниках со сложной валентной зоной. Проведено сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными по фотонному механизму линейного фотогальванического эффекта в *p-GaAs*. Показано, что в полупроводнике без центра симметрии баллистический линейный ФГЭ (БЛФГЭ) обусловлен наличием членов разной четности в операторах взаимодействия дырок с фотонами (фотонный механизм БЛФГЭ) или с фононами (фононный механизм БЛФГЭ). Рассчитан ток фотонного механизма линейного фотогальванического эффекта в *p-GaAs* и проведено сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными.

Экспериментальные исследования температурной зависимости тока ФГЭ в *GaAs* проводились А.В.Андреановыми и И.Д.Ярошецким. На рис. 3 приведены теоретический и экспериментальный результаты зависимости величины $\chi(T)$, характеризующей фототок, для *p-GaAs* с концентрацией дырок $p = 7,4 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при $T > 200\text{K}$. Теоретическая зависимость $\chi(T)$ для фотонного механизма описывается формулой

$$\chi(T) \sim T^{-3/2} e^{-E^*/kT} \frac{aN_{\Omega} + b(N_{\Omega} + 1)}{2N_{\Omega} + 1} \quad (2)$$

с $a = b = 3,4 \times 10^{-24} \text{ см}^{-3} / \text{Wt}$, N_{Ω} - функция распределения фонона с энергией

$\hbar\Omega$, $E^* = \frac{m_{hh}m_{lh}}{m_{hh} - m_{lh}} \hbar\omega$, $m_{hh}(m_{lh})$ - эффективная масса тяжелых(легких)

дырок, $\hbar\omega$ -энергия фотона. Заметим, что при однофотонном механизме линейного ФГЭ χ должно было бы монотонно возрастать с повышением температуры. При более низких температурах основной вклад в фототок связан возбуждением с примесей. Отметим, что сдвиг теоретической зависимости по отношению к экспериментальной связан с вкладом других механизмов, например, фононного механизма. Этот случай требует отдельного рассмотрения.

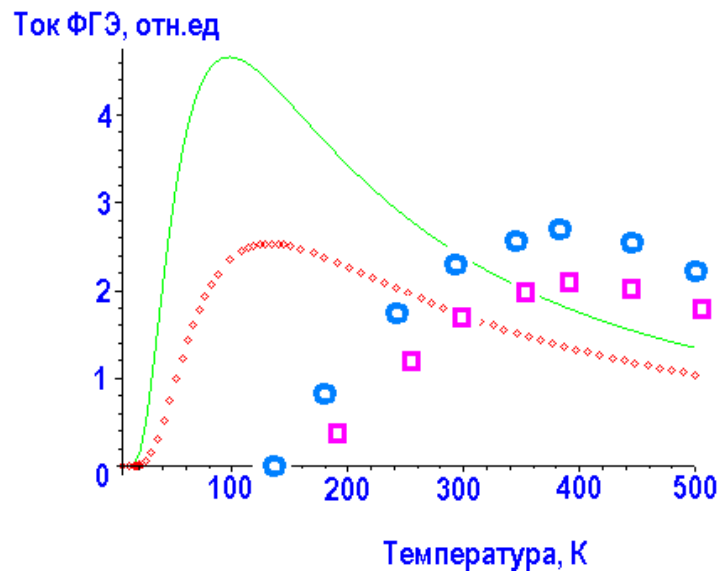


Рис.3. Температурная зависимость тока линейного ФГЭ для p -GaAs при концентрации дырок $p = 7,4 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$: эксперимент: квадратики для длины волны света $10,6 \mu\text{m}$, а кружки для $9,5 \mu\text{m}$. Непрерывные линии — теоретические результаты по фотонному механизму баллистического линейного ФГЭ: сплошная линия для $\lambda = 9,5 \mu\text{m}$, ромбики для $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$.

Количественные расчеты тока линейного ФГЭ в области поглощения света свободными носителями для p -GaAs показали, что фононный и фотонный механизмы дают сравнимые по величине вклады и абсолютные значения токов для каждого из них, отличаются от экспериментального не более чем в 2,5 раза. Таким образом, указанные механизмы объясняют не только температурную зависимость, но и величину тока линейного ФГЭ в p -GaAs.

Что касается фототока в области низких температур ($T < 300 \text{ K}$), то, как показывает анализ экспериментальных данных, он пропорционален концентрации N_a^0 нейтральных акцепторов (Zn). Фототок при возбуждении с примеси может возникать за счет асимметрии функции распределения фотоэлектронов, создаваемой октупольным моментом примеси. Для указанного механизма фототок в кристаллах A_3B_5 определяется формулой

$$j_\alpha = IN_a R(\omega) Q e_\beta e_\gamma |\delta_{\alpha\beta\gamma}|, \quad (3)$$

где Q -константа, определяющая октупольный момент примеси. В результате использования этого расчета определено значение константы Q ,

соответствующее наблюдаемой величине тока ФГЭ, которая для *GaAs* оказалось равной $Q/e = 2,5 \cdot 10^{-33} \text{ см}^3$. Это значение Q хорошо согласуется с теоретической оценкой $Q/e = (a_0/4)^3 = 1,33 \cdot 10^{-33} \text{ см}^3$.

Оценка величины фототока. Теоретический расчет показывает, что фототок определяется не только с помощью $\chi(T)$, но и величиной $L^{(\nu)}$ с размерностью длины, определяемой зонными параметрами полупроводника. В частности, асимметрия электрон-фотонного взаимодействия связана с наличием в эффективном гамильтониане, наряду с основными квадратичными по $\vec{k}$ членами $H_{k^2}(\vec{k}) = -\left[\left(A + \frac{5}{4}B\right)k^2 - B(\vec{j} \cdot \vec{k})^2\right]$, кубическими и линейными по $\vec{k}$ слагаемым: $D \sum_{\alpha} J_{\alpha} k_{\alpha} (k_{\alpha+1}^2 - k_{\alpha+2}^2), \quad \frac{4}{\sqrt{3}} k, \sum_{\alpha} k_{\alpha} [J_{\alpha}, J_{\alpha+1}^2 - J_{\alpha+2}^2]$. Здесь $A \pm B = \hbar^2 / (2m_{hh, lh})$, J_{α} -матрицы оператора углового момента в базисе $Y_m^{3/2}$ ($m = \pm 3/2, \pm 1/2$), $[J_{\alpha}, J_{\beta}]$ означает симметризованное произведение матриц углового момента, k_0 и D-зонные параметры полупроводника, $\alpha, \beta = x, y, z$. При этом постоянная k_0 для различных кристаллов лежит в пределах $(1 \div 6) \cdot 10^{-10} \text{ eV} \cdot \text{см}$. Если примем это значение k_0 для *p-GaAs*, тогда при освещении CO_2 -лазером и при комнатной температуре ($\hbar\omega = 0,12 \text{ eV}$) имеем $L_1^{(1)} = (0,2 \div 1,4) \cdot 10^{-8} \text{ см} = (0,15 \div 1) X_{\text{exp}}$, где $X_{\text{exp}} = 0,17 \cdot 10^{-7} \text{ см}$. Эта оценка показывает, что вклад в ток баллистического линейного ФГЭ, связанный с асимметрией дырочно-фотонных взаимодействий, вызываемых из-за учета релятивистских линейных по $\vec{k}$ слагаемых в эффективном гамильтониане дырок, сравним с экспериментальным. Также в случае $\vec{k} \parallel [011]$ для *p-GaAs* со следующими параметрами: $|D'| = 3,25 \cdot 10^{-23} \text{ eV} \cdot \text{см}^3$, $B = 3,25 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{см}^2$ ($m_{lh} = 0,068m_0$, $m_{hh} = 0,12m_0$) имеем, что $L^{(3)} = 4,2 \cdot 10^{-8} \text{ см} = 2,7 X_{\text{exp}}$. Отметим здесь, что в рассмотренной нами литературе не даны знаки зонных параметров перед линейными и кубическими по волновому вектору, слагаемые в эффективном гамильтониане. Поэтому нельзя конкретно говорить о вкладах в фототок, зависящих от констант D' и k_0 .

Однако, если считаем, что величина D' положительная, а k_0 отрицательная, тогда суммарный вклад в фототок сближается с экспериментальным. Если это величины одного знака, тогда, естественно, модуль результирующего вклада в фототок сильно отличается от экспериментального.

Расчеты показывают, что при одинаковых значениях зонных параметров с ростом энергии фотонов максимум фототока увеличивается и смещается в сторону больших температур. Например, для случая, когда $m_2 = 0,068m_0$, $m_{hh} = 0,12m_0$ при $\hbar\omega = 117 \text{ meV}$ максимум фототока, связанный с испусканием

фононов, имеется при $T=120\text{K}$, а с поглощением фононов-при $T=360\text{K}$. При $\hbar\omega=130\text{ meV}$ максимум фототока, связанный с испусканием фононов, имеется при $T=180\text{K}$, а с поглощением фононов-при $T=420\text{K}$.

С ростом энергии фотонов максимальное значение фототока, обусловленное поглощением фононов, почти не меняется, а с испусканием фононов увеличивается в 1,1 раза. Уместно, отметить, что с ростом значения эффективной массы легких дырок (например, в $4/3$ раза), но при одном и том же значении эффективной массы тяжелых дырок ($m_{hh}=0,12m_0$) и энергия фотона ($\hbar\omega=117\text{ meV}$) максимум фототока, обусловленного испусканием фононов, увеличивается (примерно, в 1,6 раза) и смещается в сторону больших температур. В этом случае максимум фототока, обусловленного поглощением фононов, почти не меняется (незначительно, точнее, в 1,08 раза уменьшается), но также смещается в сторону больших температур. Наконец, заметим, что настоящие теоретические и экспериментальные температурные зависимости фототока сопоставимы в том случае, если процессы, обусловленные поглощением фононов, являются преобладающими и при $m_{hh}/m_{lh}=1,135$.

Также проведен анализ возникновения линейного фотогальванического эффекта в полупроводнике со сложной зонной структурой при учете когерентного насыщения.

Четвертая глава под названием «**Поверхностный фотогальванический эффект в многодолинном полупроводнике**» посвящена теоретическому исследованию поверхностного фотогальванического эффекта в многодолинном полупроводнике: приведены общие соотношения, с помощью которых рассчитан ток поверхностного ФГЭ при зеркальном отражении электронов о поверхность. При этом решено уравнение Больцмана, определено выражение для функции распределения во втором порядке по напряженности электрического поля электромагнитной волны. Также рассчитан ток увлечения для многодолинного полупроводника, где предполагалось, что вероятность оптического перехода зависит не только от импульса фотона лишь за счет его учета в законах сохранения энергии и импульса, но и зависимостью квадрата матричного элемента оптических переходов носителей заряда от волнового вектора фотона. Получено выражение для неравновесной части функции распределения электронов, с помощью которой рассчитывается поверхностный фототок в бесконечном многодолинном полупроводнике типа германия или кремния. При этом учтено как зеркальное, так и диффузное отражение электронов о поверхность образца, а также анизотропия в эффективной массе электронов. Отметим, что рассчитан фототок, который состоит из двух зависящих и не зависящих от волнового вектора фотона слагаемых, которые описывают токи линейного (или циркулярного) фотогальванического эффекта и эффекта увлечения фотонами. Эти фототоки отличаются друг от друга как по спектральной и температурной зависимости, так и по зависимости от степени поляризации света, а также от геометрии опыта обнаружения рассматриваемых эффектов.

Показано, что баллистическая фотоэдс, возникающая в полубесконечном полупроводнике, прямо пропорциональна интенсивности света и определяется скоростью фотоэлектронов, временем и длиной свободного пробега носителей тока. Фотоэдс, обусловленная отражением носителей заряда о поверхности, может преобладать над объемной электродвижущей силой лишь в образцах с большой длиной свободного пробега при сильном поглощении света и проявляться как объемная электродвижущая сила. Уместно отметить, что наряду с током линейного поверхностного ФГЭ должен возникать как ток эффекта фотонного увлечения, так и спин зависимый ток (спингальванический эффект). Указано, что последний эффект обусловлен либо ассиметричным рассеянием спин ориентированных носителей заряда от противоположно расположенных на поверхности образца, либо диффузией или релаксацией спинов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе исследования баллистического и поверхностного фотогальванического эффекта и двумерных электронных состояний в полупроводниках кубической симметрии сделаны следующие выводы:

1. Определены выражения для коэффициента прозрачности барьеров ассиметричной структуры с учетом условия Бастарда, а также условия наблюдения осцилляции туннелирования электронов.
2. Показано, что баллистический линейный фотогальванический эффект в полупроводнике без центра симметрии обусловлен наличием членов разной четности в операторах взаимодействия дырок с фотонами.
3. Получено математическое выражение для температурной и частотной зависимости баллистического фототока, зависящего от ассиметрии вероятности оптических переходов между подзонами валентной зоны p -GaAs, где показано изменение численного значения фототока за счет знаков зонных параметров.
4. Показано, что прохождение экспериментально наблюдаемого фототока с ростом температуры через экстремум связано со знаком и значением зонных параметров, пропорциональных линейно и кубически по волновому вектору дырок слагаемых в гамильтониане.
5. В приближении времени релаксации рассчитан фототок, определяемый неравновесной функцией распределения электронов как при их зеркальном, так и при их диффузном рассеянии о поверхность. Показано, что функция распределения диффузно рассеянных от поверхности электронов зависит только от их энергии и определяется из условия обращения в ноль полного потока электронов на поверхности.
6. Определено влияние внешнего магнитного поля на поверхностный фототок в полубесконечном многодолинном полупроводнике с учетом анизотропии в энергетическом спектре носителей тока при поглощении поляризованного излучения. Показано, что в этом случае поверхностный

фототок сосредоточится у поверхности на расстоянии порядка радиуса ларморовой орбиты электронов.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREE
PhD.28.02.2018.FM.60.01 AT ANDIJAN STATE UNIVERSITY**

FERGANA STATE UNIVERSITY

RASULOV VOXOB RUSTAMOVICH

**THEORETICAL RESEARCHES OF BALLISTIC AND SURFACE
PHOTO GALVANIC EFFECT AND TWO-DIMENSIONAL ELECTRONIC
STATES IN CUBIC SYMMETRY SEMICONDUCTORS**

01.04.10 – Physics of semiconductors

**ABSTRACT OF DISSERTATION OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD) ON
PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

Andijan – 2018

The theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under No. B2017.2.PhD/FM83.

Dissertation has been prepared at Fergana state university.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (uzbek, russian, english (resume)) on the website of scientific council (www.adu.uz) and on the «Ziyonet» Information and educational portal (www.ziyonet.uz).

Scientific supervisor:	Karimov Ibroxim Nabiyeovich Doctor of Physical and Mathematical Sciences
Official opponents:	Imamov Erkin Zunnunovich Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor Gulyamov Gafur Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor
Leading organization:	National university of Uzbekistan.

Defense will take place «____» _____ 2018 at _____ at the meeting of Scientific Council number PhD.28.02.2018.FM.60.01 at Andijan state university. (Address: 170100, Uzbekistan, Andijan, 129 Universitet street. Phone/fax: 0(374) 223-88-30, e-mail: agsu_info@edu.uz.)

Dissertation is possible to review in Information-resource centre at Andijan state university (is registered under No.____) Address: 170100, Uzbekistan, Andijan, 129 Universitet street. Phone/fax: 0(374) 223-88-30, e-mail: agsu_info@edu.uz.

Abstract of dissertation sent out on «____» _____ 2018
(Registry record No. _____ on «____» _____ 2018)

S.Z. Zaynabidinov
Chairman of scientific council
on award of scientific degree,
DSc in physics and mathematics, academician

A.O. Kurbanov
Scientific secretary of scientific council
on award of scientific degree,
PhD in physics and mathematics

M.Z. Nosirov
Vice- chairman of scientific Seminar under Scientific
Council on award of scientific degree,
PhD in physics and mathematics, docent

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The aim of research work is a theoretical investigation of the mechanisms of the surface and linear photovoltaic effect in semiconductors with cubic symmetry, also two-dimensional electronic states.

The objects of research work are asymmetric multilayer semiconductor structures consisting of alternating potential barriers and wells, and bulk *p-GaAs* semiconductors.

Scientific novelty of dissertation work consists in the following:

the oscillation of the transmission coefficient was determined when the effective masses of electrons in the neighboring layers of an asymmetric layered structure are different on the basis of the Bastard condition;

a mathematical expression was determined for the temperature dependence of the current of the linear photovoltaic effect in *p-GaAs* observed in intersubband single-photon transitions due to the asymmetry of electron-phonon and electron-photon interactions;

an asymmetric scattering of electrons by photons and phonons in semiconductors with a complex valence band was calculated by the Keldysh diagram technique, it was shown that the spectral dependence of the ballistic photocurrent is determined by the spectral dependence of the absorption coefficient;

it was shown that the appearance of a ballistic photocurrent is due to the change in the numerical value of the photocurrent, depending on the sign of the band parameters of the semiconductor, taking into account the linear and cubic terms depending to the wave vector in the Hamiltonian of holes;

a mathematical expression for the surface photocurrent in a semi-infinite multivalley semiconductor in an external magnetic field was determined, depending on temperature and frequency.

Implementation of the research results:

Based on the results of the research of the ballistic and surface photovoltaic effect and two-dimensional electron states in semiconductors of cubic symmetry:

the results of researches of photovoltaic effects were used in the grant «Nonlinear and dispersion effects in semiconductors» in the study of dispersion optical phenomena (Reference No. 11217-278/211.5 of the Physical-technical Institute named after A.F. Ioffe of the Russian Academy of Sciences from March 15, 2018) . The use of scientific results made it possible to study theoretically nonlinear intensities of photon-kinetic phenomena in bulk semiconductors.

temperature dependence of the surface photocurrent in a semi-infinite multivalley semiconductor was used in the grant No. 10/2000 «Exciton-polariton luminescence of semiconductor crystals and quantum-size structures during photoexcitation and channeling of ions» in explaining the mechanisms of optical phenomena in dimensionally quantized semiconductors. (Reference No. FTA-02-11/834 of Agency of Science and Technology from October 10, 2017). The use of scientific results made it possible to study the effect of surface phenomena on exciton-polariton optical transitions;

the results of the research of electronic states in multilayer semiconductor structures with allowance for the Bastrad condition were used in the project F2-21 «Mathematical modeling of the determination of the density of surface states at the semiconductor-insulator interface» in the study of states in the semiconductor-dielectric contact region (Reference No. FTA- 02-11/834 of Agency of Science and Technology from October 10, 2017). The use of scientific results made it possible to study theoretically the kinetic phenomena in two-dimensional electron systems in the contact region;

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusions and used literature. The text of the dissertation is outlined on 117 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. Rasulov V.R. To the Theory of Electron Passage in a Semiconductor Structure Consisting of Alternating Asymmetric Rectangular Potential Wells and Barriers // Russian Physics Journal. – Springer, 2017. – Vol.59, No.10. – P. 1699-1702. (№1, Web of Science, IF=0.671)
2. Rasulov V.R., Rasulov R. Ya. On the surface photovoltaic effect in a multivalley semiconductor in an external magnetic field // Semiconductors. – Springer, 2016. – Vol.50, No.2. – P. 162-166. (№11, Springer, IF=0.705)
3. Мамадалиев Б.А., Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Эшболтаев И. Двух фотонный линейный фотогальванический эффект в полупроводниках со сложной зоной. Баллистический вклад // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2015. – №3. – С.116-125. (01.00 00, №5)
4. Расулов В.Р. К теории фотонного механизма линейного фотогальванического эффекта в *p-GaAs* // Научно-технический журнал ФерПИ. – Фергана, 2013. – № 3. – С. 12-16. (05.00.00, №20)
5. Каримов И.Н., Коканбаев И.М. Расулов В.Р. Линейно-циркулярный дихроизм эффекта увлечения фотонами в полупроводниковых сверхрешетках // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2003. – № 1. – С. 66-68. (01.00 00, №5)
6. Коканбаев И.М., Расулов Р.Я., Камбаров Д., Расулов В.Р. О поглощении поляризованного излучения в структурах с размерно - индуцированными состояниями // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2002. – № 2. – С. 80-86. (01.00 00, №5)

II бўлим (II часть; II part)

7. Ахмедова З., Маматова М., Расулов В.Р., Расулов Р.Я. О функции состояний электронов в полупроводниковых многослойных структурах // Научный Вестник ФерГУ. – Фергана, 2014. – № 2. – С.10-15.
8. Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Камбаров Д., Каримова Г.О. Волновая функция и время релаксации импульса электронов в размерно-квантованной структуре при их рассеянии на акустических фононах // Естественные и технические науки. – Россия, 2014. – № 1. – С. 30-33.
9. Каримов И.Н., Расулов В.Р. Электронные свойства полупроводниковых структур с ассимметричными прямоугольными потенциальными ямами и барьерами // Научный Вестник Андижанского ГУ. – Андижан, 2012. – №4. – С. 12-15.
10. Расулов В.Р. Линейный фотогальванический эффект в горбообразных полупроводниках с учетом эффекта Раби // Естественные и технические науки. – Россия, 2009. – №3. – С. 45-46.

11. Абдуллаева Д., Расулов В.Р., Каримов Ш.Б., Мамадалиев Б. Размерное квантование электронов в полупроводнике со сложной зоной проводимости // Аспирант и соискатель. – Москва, 2003. – №6. – С.155-157
12. Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Каримов И.Н., Маматова М. Электронный перенос в полупроводниковой структуре, состоящей из чередующихся ассиметричных прямоугольных потенциальных ям и барьеров / Материалы Республиканской научно-практической конференции по микроэлектронике, физике и технологии наночастиц. – 4-5 декабря 2015 г. – Андижан. – С. 102-104.
13. Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Рахматуллаев Х.Х., Камбаров Д., Каримова Г.О. К теории поверхностного фотогальванического эффекта в полупроводнике во внешнем магнитном поле / Материалы XII международной научно-практической конференции «Техника и технология: новые перспективы развития» – Москва. 25 февраля 2014 г. – С. 15-17.
14. Камбаров Д., Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Рахматуллаев Х. Х., Умарова М.Х., Хатамов Х. О теории поверхностного магнитофотоэлектрического эффекта в многодолинном полубесконечном полупроводнике / Материалы III Международной конференции по оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах. – Фергана. – 14-15 ноября 2014 г. – С.111-115.
15. Rasulov V.R., Rasulov R.Ya., Mamatova M., Muminov I. About the photon mechanism of linear photovoltaic effect in p-GaAs / 11th International Scientific Conference «European Applied Science: modern approach in scientific researches». – Stuttgart, Germany. – 10th August, 2014. – P.80-85.
16. Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Мамадалиев Б., Эшболтаев И. К теории электронных свойств структур, состоящей из чередующихся ассиметричных прямоугольных потенциальных ям и барьеров / Материалы VIII международного симпозиума «Фундаментальные и прикладные науки» – Москва, Россия. – 25 мая 2013 г. – С.72-79.
17. Расулов В.Р., Урманова М. Об осцилляции туннельных переходов электронов в полупроводниковых ассиметричных супернаноструктурах // IV международная конференция «Актуальные проблемы молекулярной спектроскопии конденсированных сред» – Самарканд. – 29-31 мая 2013 г. – С.129.
18. Мамадалиев Б., Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Эшболтаев И. Двухфотонный фотогальванический эффект в полупроводниках. Баллистический вклад / IPES-6, VI международная конференция по физической электронике. – Ташкент. – 23-25 октября 2013 г. – С.186-188.

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари
Андижон давлат университетининг «Илмий хабарнома» журнаלי
таҳририятида таҳрирдан ўтказилди.
(«__»_____2018 йил)