

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҚОШИДАГИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ФАЛСАФА
ДОКТОРИ ИЛМИЙ ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ
PhD.30.08.2018.FM/T.01.12 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ҚЎҚОН ДАВЛАТ ПЕДАГОГИКА ИНСТИТУТИ

МАМАДАЛИЕВА НАРГИЗАХОН ЗОКИРЖОН ҚИЗИ

**ЎРКАЧСИМОН ЗОНАЛИ ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАРДА ЎЛЧАМЛИ
КВАНТЛАШИШ ВА ҚУТБИЙ ОПТИК ҲОДИСАЛАРНИНГ НАЗАРИЙ
ТАДҚИҚИ**

01.04.10 – яримўтказгичлар физикаси

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

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)
диссертацияси автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)
по физико-математическим наукам**

**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD) on
physical-mathematical sciences**

Мамадалиева Наргизахон Зокиржон кизи

Ўрқачсимон зонали яримўтказгичларда ўлчамли квантлашиш ва
кутбий оптик ҳодисаларнинг назарий тадқиқи.....3

Мамадалиева Наргизахон Зокиржон кизи

Теоретическое исследование размерного квантования и
поляризационных оптических явлений в полупроводниках
с горбообразной зоной.....20

Mamadaliyeva Nargiza Zokirjon qizi

Theoretical research of dimensional quantization and polarization
optical phenomena in semiconductors with the camel's back zone38

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works.....42

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҚОШИДАГИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ФАЛСАФА
ДОКТОРИ ИЛМИЙ ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ
PhD.30.08.2018.FM/T.01.12 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ҚЎҚОН ДАВЛАТ ПЕДАГОГИКА ИНСТИТУТИ

МАМАДАЛИЕВА НАРГИЗАХОН ЗОКИРЖОН ҚИЗИ

**ЎРКАЧСИМОН ЗОНАЛИ ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАРДА ЎЛЧАМЛИ
КВАНТЛАШИШ ВА ҚУТБИЙ ОПТИК ҲОДИСАЛАРНИНГ НАЗАРИЙ
ТАДҚИҚИ**

01.04.10 – яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2019

**Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси
Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида
B2018.4.PhD/FM297 рақам билан рўйхатга олинган.**

Докторлик диссертацияси Қўкон давлат педагогика институтида бажарилган.

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

Илмий раҳбар:

Расулов Рустам Явкачович

физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Дадамирзаев Мухаммаджон Гуломкодиорович

физика-математика фанлари доктори, доцент

Аюханов Рашид Ахметович

физика-математика фанлари доктори

Етакчи ташкилот:

Тошкент давлат техника университети

Диссертация ҳимояси Ўзбекистон Миллий университети қошидаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий тадқиқот-институти ҳузуридаги фалсафа доктори илмий даражасини берувчи PhD.30.08.2018.FM/T.01.12 рақамли илмий кенгашнинг 2019 йил «___» _____ соат _____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100057, Ўзбекистон, Тошкент шаҳри, Янги Олмазор кўчаси, 20-уй. Тел.: (+99871) 248-79-94; факс: (+99871) 248-79-92; e-mail: info@ispm.uz), ЎзМУ қошидаги ЯФМ ИТИ мажлислар зали).

Диссертация билан Ахборот технологияларини жорий этиш бўлимида танишиш мумкин. (___ рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100057, Ўзбекистон, Тошкент шаҳри, Янги Олмазор кўчаси, 20-уй. Тел.: (+99871) 248-79-59; e-mail: info@ispm.uz),

Диссертация автореферати 2019 йил «___» _____ да тарқатилди.
(2019 йил «___» _____ даги рақамли реестр баённомаси)

Ш.Б. Утамурадова

Фалсафа доктори илмий даражасини берувчи
Илмий кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., профессор

С.С. Насриддинов

Фалсафа доктори илмий даражасини берувчи
Илмий кенгаш котиби т.ф.д., доцент

А.Т. Мамадалимов

Фалсафа доктори илмий даражасини Илмий
кенгаш қошидаги илмий семинар раиси,
ф.-м.ф.д., профессор, академик

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг зарурати ва долзарблиги. Жаҳонда жадал суратда ривожланиб бораётган нано- ва оптоэлектроника, поляритоника ва фотоника соҳаларида ҳажмий ва паст ўлчамли яримўтказгичли қурилмалар катта аҳамият касб этмоқда. Интенсивликка нисбатан чизиқли ва ночизиқли кутбий оптик ва фотовольтаик эффектларни ўрганиш соҳасида ўта паст инерцияли инфрақизил соҳада ишлайдиган фотокучайтиргичлар ва фотоелектрон қурилмаларни яратилишига эҳтиёж туғилмоқда. Шу сабабдан кўп яримўтказгич ва унинг наноўлчамли структураларида ёруғликнинг кутбланиш даражасига боғлиқ бўлган оптик ва фотовольтаик эффектлар муаммоларини назарий ва экспериментал тадқиқ қилиш қаттиқ жисмлар физикаси соҳасида бугунги куннинг асосий вазифаларидан бири бўлиб қолмоқда.

Бугунги кунда жаҳонда ўлчамли квантлашган ва ҳажмий яримўтказгичларда содир бўлувчи физик жараёнларни чуқур тадқиқ қилиш борасида қуйидаги йўналишлардаги илмий изланишлар муҳим вазифалардан ҳисобланади: «потенциал ўра+потенциал тўсиқ» даврий тўпламидан ташкил топган яримўтказгичли структурада электронларнинг локаллашган ҳолатларини аниқлаш, кутбланган ёруғлик таъсирида яримўтказгичларда содир бўлувчи оптик ва фотовольтаик эффектларнинг механизмларини аниқлаш; кутбий фотовольтаик эффектларга тегишли фотонли эргаштириш фототокининг спектрал ва температуравий боғланишларини ҳисоблаш; кутбланган ёруғлик ютилишининг яримўтказгич зонасининг ўзига хослигига, хусусан ўркачсимонлигига, боғлиқлигини аниқлаш.

Мамлакатимизда илм-фан соҳасидаги устувор йўналишларда, жумладан, фотоелектрик ходисаларни қамраб олувчи ҳажмий ва паст ўлчамли яримўтказгичларда кечадиган оптик ва фотонли кинетик ходисаларни ўрганиш бўйича муҳим натижалар олинган. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясига кўра, илмий тадқиқот ва инновацион фаолиятни ривожлантириш, илмий ва инновацион ютуқларни амалиётга жорий этишнинг эффектив механизмларини яратиш масалаларига оид муаммоларни ҳал қилишга алоҳида эътибор қаратилган.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2018 йил 17 июлидаги ПҚ-3855-сон «Илмий ва илмий-техникавий фаолият натижаларини тижоратлаштириш самарадорлигини ошириш бўйича қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида»ги, 2018 йил 6 августдаги ПҚ-3899-сон «Илмий ва инновацион фаолиятни интеграциялаш тизимининг самарадорлигини ошириш бўйича чора-тадбирлар 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 бошқа тегишли меъёрий-

хукукий хужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация иши муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланиши-нинг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар тараққиётининг «III. Қайта тикланувчи энергия манбалари-дан фойдаланишни ривожлантириш» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Қутбланган ёруғлик таъсири-да содир бўладиган ҳодисаларнинг мураккаб валент зонали яримўтказгич-лардаги тадқиқоти жаҳоннинг қатор ривожланган мамлакатлар илмий тадқиқот институтлари ва университетларида олиб борилмоқда. Жумладан, The American Institute of Physics (АҚШ), University of New Hampshire (АҚШ), Universität Regensburg (Германия), Institute of Physics (Варшава, Польша), академик А.Ф. Иоффе номи Физика-техника институти (Санкт-Петербург), П.Н.Лебедев номи Физика институти (Москва), яримўтказгичлар физикаси институтлари (Новосибирск, Россия; Киев, Украина)да бундай турдаги илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда.

Хусусан, қутбланган ёруғлик таъсирида содир бўладиган фотовольтаик ҳодисаларнинг қатор механизмлари А.М.Гласс (АҚШ), фон Балтц (Германия) ва В.М.Фридкин (Москва, Россия)лар томонидан сегнетоэлектрикларда тадқиқ қилинган. Шунингдек, ҳажмий яримўтказгичларда қутбий фотовольтаик эффектларнинг экспериментал тадқиқотлари К.Н.Herman (Германия) ва А.Ф.Gibson (АҚШ) томонидан *GaP*да, G.Ribakovs, A.A.Gudjian (Канада) ва А.А.Рогачев (Санкт-Петербург, Россия) томонидан теллурда, J.M.Doviak, S.Kothari (АҚШ) ва И.Д.Ярошецкий (Санкт-Петербург, Россия), С.Д.Ганичев (Дортмунд, Германия) томонидан *p-GaAs*да, кузатилган бўлиб, В.А.Шалыгин (Санкт-Петербург, Россия) томонидан икки ўлчамли яримўтказгичлар наноструктураларида (ток ташувчилар спинларига боғлиқ бўлган фотовольтаик эффект тадқиқи) олиб борилган.

Россия ФА академиклари В.И.Перель (Санкт-Петербург) ва Ю.В.Копаев (Москва), Россия ФА мухбир аъзолари Е.Л.Ивченко ва М.М.Глазов, профессорлар Г.Е.Пикус, Н.З.Аверкиев, Л.Е.Голуб, С.А.Тарасенко, М.И. Дьяконов (Санкт-Петербург), профессорлар В.И.Белиничер, Б.И.Стурман, Л.И.Магарилл, А.В.Чаплик, М.В.Энтин, (Новосибирск) раҳбарлигидаги бир гуруҳ россиялик олимлар томонидан яримўтказгичли наноструктуралар ва топологик диэлектрикларда ҳамда графенда қутбий фотовольтаик эффектларнинг айрим механизмлари назарий ўрганилган.

Мамлакатимиз олимларидан Э.З.Имамов ва Р.Я.Расулов томонидан фотонли эргаштириш, айрим қутбий оптик ва фотовольтаик эффектларнинг механизмлари ҳажмий ва паст ўлчамли яримўтказгичларда тадқиқ қилинган.

Қутбий оптик ва фотовольтаик эффектларга оид адабиётларда чоп этилган илмий ишлар натижаларининг таҳлиллари шуни кўрсатадики, айти пайтгача: а) ўрқачсимон ўтказувчанлик зонали *n-GaP*да ўлчамли квантлашиш эффекти ва зона тармоқлариаро қутбланган ёруғликнинг ютилиш механизмлари оптик ўтишларнинг табиатига ҳамда ёруғликнинг кристалл

бош симметриясига нисбатан тарқалиш йўналишига боғлиқлиги; б) ўрқачсимон зонали яримўтказгичларда бир фотонли эргаштириш ҳодисаси ва ёруғликнинг ютилиши; в) *n-GaP* да бир фотонли ёруғлик ютилишининг чизикли циркуляр дихроизми; д) фотонли эргаштириш токига спин-орбитал таъсир (*g*-фактор)нинг таъсири тадқиқ этилмаган. Бундай тадқиқотлар ушбу диссертация ишида олиб борилган.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган олий таълим муассасаси илмий тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация Қўқон давлат педагогика институтининг «Яримўтказгичлар характеристикаларини назарий ва экспериментал тадқиқ қилиш» мавзусида (2016-2018 й.) илмий тадқиқот лойиҳаси ва Фарғона давлат университети рақамли «Яримўтказгичлар ва уларнинг наноструктураларида фотонли кинетик эффектларнинг назарий тадқиқи» (2017-2019 й.) фундаментал тадқиқотлар гранти доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади ўрқачсимон зонавий тузилишга эга бўлган яримўтказгичдаги икки ўлчамли электронлар учун локаллашган ҳолатлар ва бир зона тармоқлариаро кечадиган оптик ўтишлар билан тавсифланувчи оптик ва фотонли эргаштириш эффектларининг механизмларини квант-механикавий аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

навбатма-навбат жойлашган потенциал тўсиқ ва ўралардан ташкил топган яримўтказгичли носимметрик структурада электронли ҳолатларни назарий тадқиқ қилиш;

ўрқачсимон зонавий тузилишга эга бўлган яримўтказгичда кутбланган ёруғлик ютилишининг квант механикавий ҳисоблашларини бажариш;

n-GaP ўтказувчанлик зонаси тармоқлариаро оптик ўтишларни табақалаштириш ҳамда бир фотонли чизикли кутбланган ёруғлик ютилиш коэффиценти спектрал ва температуравий боғланишларининг математик ифодаларини аниқлаш;

ўрқачсимон зонавий тузилишга эга бўлган яримўтказгичда ток ташувчилар фотонли эргаштириш токининг спин-орбитал ўзаро таъсир коэффиценти (*g*-фактор)га боғлиқ улушини ҳисоблаш;

олинган назарий натижаларни электрон ўтказувчанликли галлий фосфида олинган тажриба натижалари билан солиштиришдан иборат.

Тадқиқотнинг объекти сифатида ўрқачсимон зонали тетраэдр симметрияли яримўтказгичлар ва икки ўлчамли ток ташувчилар тизимлари олинди.

Тадқиқотнинг предмети ўрқачсимон зонали тетраэдр симметрияли яримўтказгичлар ва икки ўлчамли ток ташувчилар тизимларида ўлчамли квантлашиш ва кутбий фотонли кинетик эффектларидан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқ қилинган масалаларни ечишда Шредингер тенгламаси, квант статистик физикаси ва физикавий кинетикада қўлланиладиган диаграммалар техникаси, гуруҳлар ва инвариантлар назарияси методлари фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

потенциал ўра ва тўсиқларнинг даврий жойлашувидан ҳосил бўлган носимметрик структурада электронларнинг локаллашган ҳолатлари ҳисобланган ва асимметриявий структура қатламларидаги ток ташувчиларнинг транспорт матрицасининг (transfer matrices) унитар матрица бўлмаслиги исботланган;

зоналараро оптик ўтишлар билан тавсифланувчи уч фотонли чизиқли-циркуляр дихроизм ҳисобланган;

ўрқачсимон зонали яримўтказгичларда кутбланган ёруғликнинг ютилишида тарқалиш йўналишига боғлиқ бўлган квадрат илдиз табиатли ўзига хослик мавжудлиги аниқланган;

тажрибада кузатилган *n-GaP*да ёруғлик ютилиш коэффициенти спектрал боғланишининг экстремум орқали ўтиши зонанинг ўрқачсимонлиги билан боғлиқлиги назарий исботланган;

ўрқачсимон зонали яримўтказгичда бир фотонли эргаштириш токига коваклар *g*-факторининг улуши квант механикавий усулида ҳисобланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари:

кўп қатламли яримўтказгичларда электронли ҳолатларнинг ҳисоблаш усуллари яримўтказгичли паст ўлчамли ток ташувчилар тизимида қўлланилган;

кутбий оптик ва фотонли эргаштириш эффектлар натижаларини татбиқ этиш билан оптоэлектрон қурилмалар ва фотоқабулқилгичлар маълумотларини оптикавий голографик ёзиш, хотирада сақлаш, қайта ишлаш системаларининг оптик хусусиятларини оптималлаштиришда қўллаш мумкин.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги олинган ҳисоблаш натижаларининг мураккаб зонали яримўтказгичлардаги фотонли кинетик ҳодисалар соҳасида бажарилган тажриба натижаларига мос тушиши, қаттиқ жисмлар назариясида қўлланиладиган гуруҳлар назарияси ва квант статистик физиканинг ҳисоблаш методларидан фойдаланилганлиги, текшириш объектининг тўғри танланганлиги билан асосланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Диссертация натижаларининг илмий аҳамияти *n-GaP*да ўлчамли квантлашиш, кутбий оптик ва айрим фотовольтаик эффектлар зонасининг ўзига хослигига эътибор қаратиб олинган натижалар тўғрисида янги маълумотлар беришда ўз ифодасини топган.

Олинган натижаларнинг амалий аҳамияти ҳажмий ва паст ўлчамли яримўтказгичда кечадиган кутбий оптик ва фотовольтаик эффектлар опто-ва наноэлектроника, фотоника ва поляритоника каби соҳаларда қўллаш имконини беришдан иборат.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Ўрқачсимон зонали яримўтказгичларда ўлчамли квантлашиш ва кутбий оптик ҳодисалар механизмларини аниқлаш асосида:

ўрқачсимон зонали яримўтказгичдаги кутбланган ёруғликнинг бир ва

кўп фотонли спектрлари бўйича ҳисоблаш натижалари «FOTON» акционерлик жамиятида жорий этилган (“Ўзэлтехсаноат” акционерлик компаниясининг 2019 йил 7 мартдаги 02-35-сон маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши ўта паст инерцияли галлий арсенидли фотодатчикларнинг яратилишига ва яримўтказгичли оптоэлектрон қурилмаларнинг оптик характеристикаларини оптималлаштириш имконини берган;

ўрқачсимон зонали яримўтказгичларда фотонли эргаштириш токининг спектрал боғланиши натижалари АҲР(Ғ) 2015/6 рақамли «The investigation of photoelectrical properties of the Photodiodes for 1-4 μm infrared region» лойиҳасида 1-4 μm тўлқин узунликли яримўтказгич фотодиодларининг хоссаларини назарий тадқиқ қилишда фойдаланилган (Улудағ университетининг (Туркия) 2019 йил 2 февралдаги маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш яримўтказгичли фотоўзгартиргичларнинг юқори частоталар соҳасида ишлаш имконини яратган;

навбатма-навбат жойлашган потенциал ўра ва потенциал тўсиқлардан ташкил топган структурадаги локаллашган ҳолатлар бўйича олинган натижалар Ф2-ОТ-О-15494 рақамли «Квант нуқтали гетеро- ва наноструктуралардаги экситонларни, поляронларни, биполяронларни ва кўчиш ҳодисаларини тадқиқ этиш асосида нурлагичлар, фотоэлементлар ва бошқа турдаги оптоэлектрон асбобларнинг эффектдорлигини яхшилаш» лойиҳасида квант нуқтали гетеро- ва наноструктуралардаги оптик ўтишларнинг таҳлилларида фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2019 йил 15 февралдаги 89-03-670-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш мураккаб зонали яримўтказгичлар асосида ўстирилган гетеро ўтишли структураларда фотонли кинетик эффектларни тадқиқ қилиш имконини берган;

зонаси битта тармоғининг ўрқачсимон бўлган куб симметрияли яримўтказгичларда фотонли эргаштириш токининг ҳисоблашлари 10/2000 рақамли «Ионларнинг каналланиши ва фотоўйғотилишида яримўтказгичли кристаллар ва ўлчамли квантлашган структураларда экситон-поляритонли люминесценция» лойиҳасида яримўтказгичли кристалларнинг люминесценция спектрал таҳлилларини ўрганишда фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2019 йил 15 февралдаги 89-03-670-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш яримўтказгич ва ўлчамли квантлашган структураларда кузатиладиган люминесценция тадқиқотлари соҳасини кенгайтириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқотнинг асосий натижалари 5та халқаро ва 2та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича асосий илмий натижалар жами 14та илмий ишда нашр этилган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 7та мақола чоп этилган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертация матни 111 бетдан иборат.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Мазкур диссертация *n-GaP*да ўлчамли квантлашиш, ёруғликнинг кутбланиш даражасига боғлиқ бўлган оптик ва фотовольтаик эффектлар яримўтказгич зонасининг ўрқачсимонлигига эътибор қаратилган ҳолда тадқиқ қилишга бағишланган.

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, олиб борилган илмий тадқиқотларнинг Ўзбекистон фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги қайд қилинган, хорижий ва республикамызда мавзу бўйича илмий тадқиқотлар шарҳи, муаммонинг ўрганилганлик даражаси таҳлил қилинган, тадқиқотнинг мақсади, вазифалари, текшириш предмети ва объекти келтирилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари очиқ берилган, тадқиқот натижаларининг назарий, амалий аҳамияти ҳамда уларнинг жорий қилиниши, нашр этилган ишлар шунингдек диссертациянинг структураси бўйича маълумотлар берилган.

«Яримўтказгичли ва унинг ўлчамли квантлашган тизимларида кутбланган оптик ва фотовольтаик эффектлар» номли биринчи боб ҳажмий ва ўлчамли квантлашган яримўтказгичларда кечадиган ҳамда ёруғликнинг кутбланиш даражасига боғлиқ бўлган оптик ва фотовольтаик эффектларнинг тадқиқига бағишланган. Бу бобда мураккаб зонали яримўтказгичда кутбланган ёруғликнинг ютилиши, икки ўлчамли яримўтказгичда кутбланган ёруғлик ютилишининг танлаш қоидалари, мураккаб валент зонали яримўтказгичли квантлашган ўраларда ёруғлик ютилиши, яримўтказгич ва унинг ўлчамли квантлашган структураларида кутбий фотовольтаик эффектлар, кутбий фотовольтаик эффектларнинг феноменологик таҳлиллари бўйича адабиётлар шарҳи олиб борилган. Бу ҳолда ток ташувчиларларнинг ўлчамли квантлашиши, яримўтказгичларнинг зонавий тузилиши, импульс операторининг бир зона тармоқлари ичидаги матрицавий элементлари ҳисобланган, бу ҳодисаларнинг диссертация мавзусига тегишли механизмлари эффектив гамильтониан усулига нисбатан таҳлил қилинган. Бу бобда таҳлил қилинган ишларда *n-GaP*да ўлчамли квантлашиш, кутбланган ёруғликнинг ютилиши ва фотонли эргаштириш фототокининг тадқиқида ўтказувчанлик зона ўрқачсимонлигига эътибор қаратилмаганлиги, бир фотонли когерентли тўйиниш эффектининг бир фотонли ютилишига улуши тадқиқ этилмаганлиги қайд қилинган.

Икки ўлчамли квантлашган электронлар газида фотонли эргаштириш эффектининг элементар механизмлари қатор ишларда тадқиқ қилинган бўлиб, бироқ уларда: энергетик спектрининг ўлчамли квантлашиши электронлар импульсининг ўлчамли квантлашиши билан боғлиқлиги; оғир ва енгил коваклар кўндаланг эффектив массаларининг ўлчамли квантлашган

сатҳларнинг тартиб рақамига боғлиқлиги; оптик ўтишлар матрицавий элементларининг фотон импульсига боғлиқлиги эътиборга олинмаган.

«Электрон ўтказувчанликли галлий фосфидида қутбланган ёруғликнинг ютилиш назарияси» номли иккинчи бобда қутбланган ёруғликнинг бир ва кўп фотонли ютилиши ҳисоблашлари нафақат яримўтказгич зонавий тузилишининг ўзига хослигига, балки ёруғлик тарқалишининг яримўтказгич бош симметрия ўқиға нисбатан ориентациясига боғлиқ ҳолда олиб борилган. Бунда ёруғлик ютилиш коэффициентининг спектрал боғланишида унинг тарқалиш йўналишига боғлиқ ҳолда ўзига хосликнинг кузатилиши хусусида таҳлиллар олиб борилган.

Келгусида ковак ўтказувчанликли, масалан $p-GaAs$ тур, яримўтказгич валент зонасидаги енгил ва оғир коваклар тармоқлари орасидаги икки фотонли оптик ўтишларда қатнашаётган n_1 тартиб рақамли оралик (виртуал) ҳолатлар ўша Γ_8 зонада жойлашган деб ҳисобланган. У ҳолда $n \equiv (V_2, m) \rightarrow n' \equiv (V_1, m')$ оптик ўтишларга тегишли икки фотонли ютилишга $(V_2; \pm 1/2) \rightarrow (V_2; \pm 1/2) \rightarrow (V_1; \pm 3/2)$, $(V_2; \pm 1/2) \rightarrow (V_1; \pm 3/2) \rightarrow (V_1; \pm 3/2)$ тур тўртта жараён улуш беради. Бундай оптик ўтишлар эътиборга олинса, у ҳолда частотаси $\hbar\omega \gg k_B T$ шартни қаноатлантирганида икки ва бир фотонли ёруғлик ютилиш коэффициентларининг нисбати қуйидаги кўринишда ифодаланади:

$$\frac{K^{(2)}(\omega)}{K^{(1)}(\omega)} = \frac{2 \cdot W^{(2)}}{W^{(1)}} = 2g_2 \frac{2\pi e^2 I}{m_0^2 \omega^2 c n_\omega} \frac{m_0^2}{\hbar^2} \frac{16B^2}{(\hbar\omega)^2} \frac{k_2^4}{k_1^4} \frac{e_z^2 |e_+^+|^2}{(1 - e_z^2)} \frac{k_2}{k_1} e^{(\mu - E^*)/k_B T}, \quad (1)$$

бу ерда g_2 когерентлик фактори, I – ёруғлик интенсивлиги, B – яримўтказгич зонавий параметри, $k_2(k_1)$ – ковакларнинг икки (бир) фотонли ютилишдаги тўлқин вектори, E^* – ковакларнинг бир фотонли ютилишдаги энергияси, μ – Ферми энергияси, ифода устидаги чизик бурчакка нисбатан ўрталаштиришни англатади. Қолганлари маълум катталиклардир. Бу ҳолда икки ва бир фотонли оптик ўтишларда энергиянинг сақланиш қонуни ҳамда $\overline{(1 - e_z^2)} = \frac{2}{3}$,

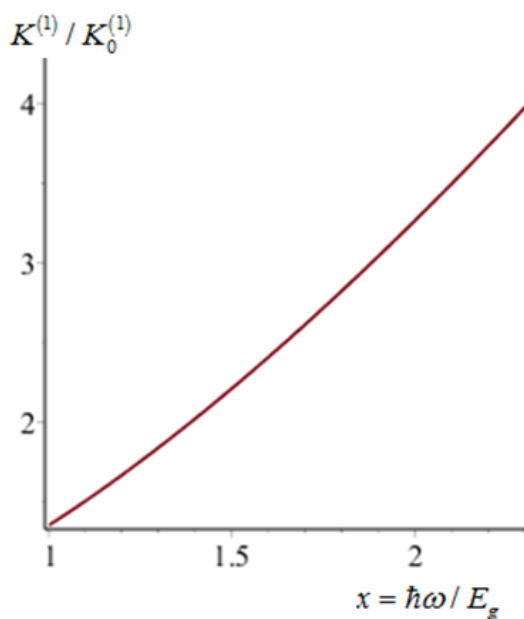
шунингдек $\overline{(|e_z^-|^2 |e_+^+|^2)}$ чизикли қутбланган ёруғлик учун 2/15, циркуляр қутбланган ёруғлик учун 1/5 экани эътиборга олинса, у ҳолда ёруғликнинг икки фотонли ютилишда чизикли-циркуляр дихроизм содир бўлади.

Ёруғликнинг зоналараро вертикал оптик ўтишлар ҳисобига ютилиш коэффициенти ҳисоблашда электрон энергетик спектридаги нопараболик ҳад эътиборга олинса, у ҳолда куб симметрияли яримўтказгичда бир квантли ютилиш коэффициенти $x = E_g / \hbar\omega$ нинг ортиши билан орта боради (1-расм). Бу ҳол частотанинг ортиши билан ток ташувчилар тақсимот функциясининг камайишига нисбатан концентрациясининг ортиши сезиларли бўлиши билан тушунтирилади.

Ўтказувчанлик ва валент зоналари ҳамда валент ва спин орбитал кенгайган зоналараро оптик ўтишлар эътиборга олинганида куб симметрияли яримўтказгичларда ёруғликнинг $3 \cdot \hbar\omega - E_g \ll E_g$ шартни қаноатлантирувчи уч

фотонли ютилишида чизикли ва циркуляр кутбланган ёруғликлар таъсирида оптик ўтишлар эҳтимолликларининг $W_{\text{чиз}}^{(3)} / W_{\text{цирк}}^{(3)}$ нисбати $E_g / (3\hbar\omega - E_g)$ нисбат билан аниқланади, яъни $W_{\text{чиз}}^{(3)} \gg W_{\text{цирк}}^{(3)}$ шарт бажарилади. Бу натижа моментларнинг сақланиш қонунига мазмунан мос келади, чунки учта циркуляр кутбланган фотонлар моментининг ёруғлик тўлқин вектори йўналишига бўлган проекцияси $+3\hbar$, зоналараро оптик ўтишларда эса фотон моменти икки бирликдан ортиқ қийматга ўзгармайди, чунки оғир ковак ва электрон моментларнинг йиғиндиси $+3\hbar/2 + \hbar/2 \equiv 2\hbar$ га тенг бўлиши мумкин.

Агар, $(3\hbar\omega - E_g)$ катталик миқдоран орта борса, у ҳолда “рухсат этилган-тақиқланган-тақиқланган”



1-расм. $K^{(1)} / K_0^{(1)}$ нисбатнинг $x = \hbar\omega / E_g$ катталикка боғлиқлиги. Бу ҳолда

$$K_0 = \frac{e^2}{\hbar c n_\omega} k_1^{(g)}, \quad k_1^{(g)} = [2\mu_1 E_g / \hbar^2]^{1/2}.$$

$V \rightarrow V \rightarrow V \rightarrow c, \quad V \rightarrow c \rightarrow c \rightarrow c,$
 $V \rightarrow V \rightarrow c \rightarrow c$ тур оптик ўтишлар ҳам содир бўлади. Бундай тур уч фотон(этап)ли оптик ўтишлар чизикли кутбланган ёруғлик учун ҳам, циркуляр кутбланган ёруғлик учун ҳам рухсат этилган бўлади, чунки бундай оптик ўтишларда циркуляр кутбланган фотонлар моментларининг бир қисми электронларнинг битта зона ичидаги ҳаракатига ҳам узатилади. Масалан, *InAs* учун уч фотонли чизикли-циркуляр дихроизм коэффициенти $\alpha^{(3)} = W_{\text{чиз}}^{(3)} / W_{\text{цирк}}^{(3)} > 10$ бўлади.

n-GaP ўтказувчанлик зонаси пастки тармоғининг ўрқачсимонлигига эътибор қаратилса, у ҳолда бир фотонли ёруғлик ютилиш коэффициенти спектрал ва температуравий боғланиши куйидагича ифодаланади:

$$K = \frac{4\pi^2}{3} \frac{e^2}{\hbar c} \frac{a}{n_\omega} \frac{P^2 N}{(\hbar\omega)^2} \frac{\Delta}{\sqrt{(\hbar\omega)^2 - \Delta^2}} e^{-\frac{Ak_\omega^2 - (\hbar\omega/2)}{k_B T}} \quad (2)$$

бу ерда $\left[1 - \frac{4P^2 k_\omega^2}{\hbar\omega(\hbar\omega + \Delta)}\right]^2 = \left(\frac{\Delta}{\hbar\omega}\right)^2$ ва $\sum_\alpha e_\alpha^2 = 1$ муносабатлар эътиборга

олинган, Δ – зона тармоқлари орасидаги Бриллюэн зонаси марказидаги энергетик тирқиш, A, P – электронлар эффектив гамильтонианидаги тўлқин векторга нисбатан квадратик ва чизикли ҳадларга тегишли зонавий

параметрлар, k_ω – ток ташувчиларнинг энергиянинг сақланиш қонуни ёрдамида аниқланадиган ўлқин вектори.

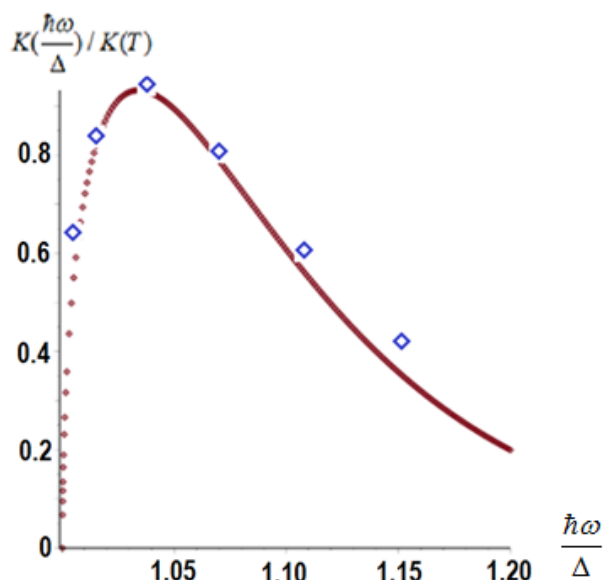
2-расмда ёруғликнинг ютилиш коэффициентининг $a = const$ ҳолда (2) ифодага нисбатан ҳисобланган спектрал боғланиши тажриба натижалари билан солиштирилган. $K(\frac{\hbar\omega}{\Delta}) / K(T)$ катталиқнинг спектрал боғланишидаги максимумнинг ҳосил бўлиши $n-GaP$ ўтказувчанлик зонаси пастки тармоғининг ўрқачсимонлиги туфайли содир бўлади. Бунда фотонлар энергиясининг $\Delta \leq \hbar\omega \leq \Delta + \varepsilon_{min}$ соҳасида оптик ўтишда иштирок этаётган ўрқач соҳасидаги электронлар сонининг орта, $\hbar\omega > \Delta + \varepsilon_{min}$ соҳада - камая бориши билан тушунтирилади, бу ерда ε_{min} -ўрқачнинг чуқурлиги (масалан, $n-GaP$ учун $\varepsilon_{min} \cong 3.5 \text{ meV}$). Ҳисоблашлар кўрсатадики, $K(\frac{\hbar\omega}{\Delta}) / K(T)$ катталиқ $\lambda_{max}^{(theor)} = 3.35 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ да максимумга эришади, тажрибада эса: $\lambda_{max}^{(exp)} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}$.

«Икки ўлчамли яримўтказгичларда электронли ҳолатларнинг назарий тадқиқи» мавзули учинчи бобда асимметрий потенциал ўра ва потенциал тўсиқлардан ташкил топган яримўтказгичли структурада электронли транспорт (ташиш) ҳодисаси таҳлил қилинган: $x \leq x_1$ ҳолда $U(x) = U_1$, $x_1 \leq x \leq x_2$ ҳолда $U(x) = U_2$, $x \geq x_2$ ҳолда $U(x) = U_3$ бўлган потенциал майдонда транспорт матрицасининг матрицавий элементлари

$$T_{11}^{(3)} T_{22}^{(3)} - T_{12}^{(3)} T_{21}^{(3)} = \frac{\tilde{k}_3}{\tilde{k}_1} \text{ шартни}$$

қаноатлантиради ва умумий ҳолда бу матрица унитар матрица эмас, аммо симметриявий ва қатламлари кимёвий бир хил (электронларнинг эффектив массалари бир хил) бўлган структураларда эса унитар матрица бўлади. Агар $j, j+1, j+2, j+3$ тартиб рақамли қатламлари учун

$$E_{j+1}(k_n) = \frac{\pi^2 n_{j+1}^2}{4 m_{j+1}^2 (x_{j+1} - x_j)^2},$$



2-расм. $K(\frac{\hbar\omega}{\Delta}) / K(T)$ катталиқнинг ҳона температурасига мос келувчи назарий (нуқталар) ва экспериментал (ромблар) спектрал боғланишлари. Бу ерда

$$K(T) = \frac{5e^2}{3\hbar c n_\omega} \frac{P^2 e^{\frac{E_F}{k_B T}}}{(A_3 - A_1)^{3/2} \sqrt{\Delta}}.$$

$E_{j+3}(k_n) = \frac{\pi^2 n_{j+3}^2}{4m_{j+3}^2(x_{j+3} - x_{j+2})^2}$ ўлчамли квантлашиш шарти бажарилса, у ҳолда

транспорт матрицасининг диагонал матрицавий элементи

$$\begin{aligned} |T_{11}^{(j,j+4)}|^2 &= (4\tilde{k}_j\tilde{k}_{j+1}\tilde{k}_{j+2}\tilde{k}_{j+3})^{-2} \times \\ &\times \left\{ \cos^2[k_{j+2}(x_{j+2} - x_{j+1})] \cdot [\tilde{k}_{j+1}\tilde{k}_{j+3}(\tilde{k}_j + \tilde{k}_{j+2})(\tilde{k}_{j+2} + \tilde{k}_{j+4}) + \tilde{k}_{j+1}\tilde{k}_{j+3}(\tilde{k}_j - \tilde{k}_{j+2})(\tilde{k}_{j+2} - \tilde{k}_{j+4})] \right. \\ &+ \sin^2[k_{j+2}(x_{j+2} - x_{j+1})] \cdot [\tilde{k}_{j+1}\tilde{k}_{j+3}(\tilde{k}_j - \tilde{k}_{j+2})(\tilde{k}_{j+2} - \tilde{k}_{j+4}) - \tilde{k}_{j+1}\tilde{k}_{j+3}(\tilde{k}_j + \tilde{k}_{j+2})(\tilde{k}_{j+2} + \tilde{k}_{j+4})] \left. \right\}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$E_{j+1}(k_n) = \frac{\pi^2}{4m_{j+1}^2(x_{j+1} - x_j)^2}(2n_{j+1} + 1)^2, \quad E_{j+3}(k_n) = \frac{\pi^2}{4m_{j+3}^2(x_{j+3} - x_{j+2})^2}(2n_{j+3} + 1)^2 \text{ шарт}$$

бажарилганида эса

$$\begin{aligned} |T_{11}^{(j,j+4)}|^2 &= (4\tilde{k}_j\tilde{k}_{j+1}\tilde{k}_{j+2}\tilde{k}_{j+3})^{-2} \times \\ &\times \left\{ \cos^2[k_{j+2}(x_{j+2} - x_{j+1})] \cdot [(\tilde{k}_{j+1}^2 + \tilde{k}_j\tilde{k}_{j+2})(\tilde{k}_{j+3}^2 + \tilde{k}_{j+2}\tilde{k}_{j+4}) + (\tilde{k}_{j+1}^2 - \tilde{k}_j\tilde{k}_{j+2})(\tilde{k}_{j+3}^2 - \tilde{k}_{j+2}\tilde{k}_{j+4})] \right. \\ &+ \sin^2[k_{j+2}(x_{j+2} - x_{j+1})] \cdot [(\tilde{k}_{j+1}^2 - \tilde{k}_j\tilde{k}_{j+2})(\tilde{k}_{j+3}^2 - \tilde{k}_{j+2}\tilde{k}_{j+4}) - (\tilde{k}_{j+1}^2 + \tilde{k}_j\tilde{k}_{j+2})(\tilde{k}_{j+3}^2 + \tilde{k}_{j+2}\tilde{k}_{j+4})] \left. \right\}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

Бу ифодаларда $n_j - j$ тартиб рақамли қатламдаги ўлчамли квантлашган сатҳларнинг тартиб рақами, $k_j(x) = k_j = \sqrt{2m_j(E - U_j)/\hbar^2}$, $\tilde{k}_n = k_n / m_n$, $m_n - n$ тартиб рақамли қатламдаги электроннинг эффектив массаси. Натижада потенциал ўралари ўлчамли квантлашган наноструктураларда ҳам интерференциявий туннел ҳодисалари кузатилади ва бу ҳодиса потенциал тўсиқнинг катталиклари билан назорат қилинади. Бундай ҳоллар каскадли гетеролазерларда катта аҳамиятга эгадир. 3-расмда уч қатламли $AlAs - In_{0.53}Ga_{0.47}As - InAs$ структура учун

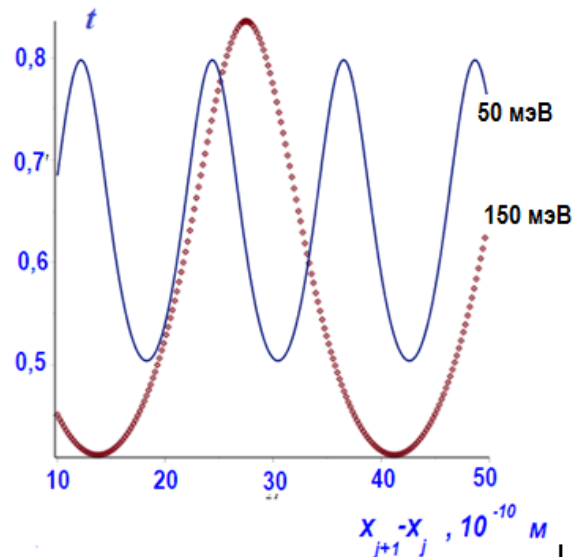
потенциал тўсиқ ости ўтиш коэффициентининг потенциал тўсиқ ($AlAs$) қалинлигига боғлиқлиги тасвирланган: узлуксиз чизик 150 meV энергияли электронларга, нукталар эса 50 meV энергияли электронларга тегишли. Микдорий ҳисоблашларда қуйидаги катталиклар танланган:

$$U_1 = 55 \text{ meV}, \quad U_2 = 35 \text{ meV},$$

$$U_3 = 45 \text{ meV}, \quad m_1 = 0.046 \cdot m_0,$$

$$m_2 = 0.023 \cdot m_0, \quad m_3 = 0.124 \cdot m_0.$$

Бу ҳолда энергиянинг ортиши билан потенциал ости ўтиш коэффициенти осцилляция амплитудасининг ортиши электрон де-Бройль тўлқин амплитудасининг энергияга тўғри пропорционал-



3-расм. $AlAs - In_{0.53}Ga_{0.47}As - InAs$ структура учун потенциал тўсиқ ости ўтиш коэффициенти тўсиқ ($AlAs$) қалинлигига боғлиқлиги.

лиги билан, такрорланишнинг камайиши эса ихтиёрий икки қўшни қатламдаги де-Бройль тўлқинлар фазаларининг ҳар хиллиги ва уларнинг фазалар фарқига боғлиқ интерференцияланиши билан тушунтирилади.

Шундай тарзда электроннинг симметриявий структурадаги потенциал тўсиқ устидан ўтиш коэффицентининг электрон энергиясига боғлиқ ҳолда осцилляцияланишини ҳам келтириб чиқариш мумкин (3-расм). Бундай осцилляция потенциал тўсиққа бораётган ва ундан қайтаётган электронлар де-Бройль тўлқинларининг интерференцияси билан тушунтирилади.

Ҳисоблашлар кўрсатадики, агар структура симметриявий: потенциал ўра ва потенциал тўсиқларнинг геометрик ўлчамлари ҳамда тўсиқларнинг баландликлари бир хил бўлса, у ҳолда тўсиқ усти ўтиш коэффицентининг осцилляция амплитудаси потенциал ўра орқали ўтиш коэффицентиникидан катта бўлади (4-расм). Бу ҳолда электрон энергияси ортиши билан осцилляция амплитудаси энергияга тўғри пропорционал бўлганлиги сабабли орта бориб, осцилляциянинг такрорланиш частотаси ўзгармайди.

Асимметриявий структура учун бундай мулоҳазалар ўз мазмунини йўқотмайди, бироқ потенциал тўсиқдан қайтиш ва ундан ўтиш коэффицентлар осцилляцияси амплитудаси ва осцилляция частотаси ўрага нисбатан чап ва ўнг тарафдаги потенциал тўсиқлар баландликлари ҳамда электронларнинг қўшни қатламлардаги эффектив массаларига боғлиқ бўлади. Бундай структураларида локаллашган ҳолатлар

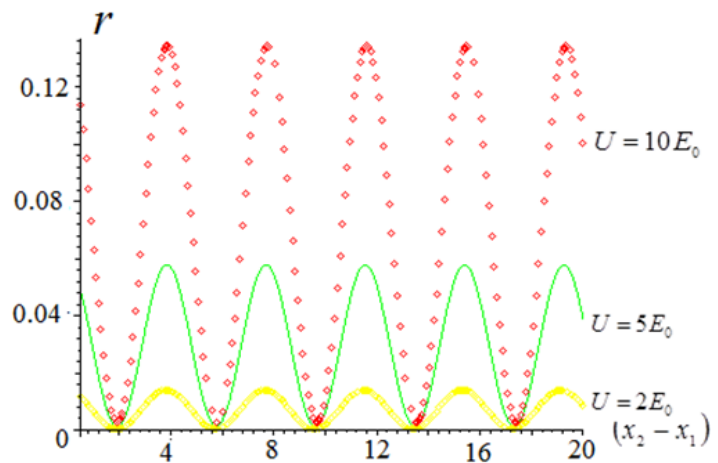
$$e^{i(k_3 x_2 - k_1 x_1)} \left[\left(1 + \frac{\tilde{k}_2}{\tilde{k}_1} \right) \left(1 + \frac{\tilde{k}_3}{\tilde{k}_2} \right) e^{-ik_2(x_2 - x_1)} + \left(1 - \frac{\tilde{k}_2}{\tilde{k}_1} \right) \left(1 - \frac{\tilde{k}_3}{\tilde{k}_2} \right) e^{ik_2(x_2 - x_1)} \right] = 0 \quad (5)$$

муносабат ёрдамида аниқланади.

Келгуси таҳлилларда уч қатламли структурада четки қатламларни, яъни потенциал тўсиқларни бир хил физикавий табиатли деб ҳисобланган. У ҳолда локаллашган сатҳларнинг ўлчамли квантлашган энергияси

$$E_{3,1}(k_{y,z} = 0; n_{3,1}) = \frac{\pi^2 \hbar^2 n_{3,1}^2}{8m_{3,1}(x_2 - x_{3,1})^2} \text{ каби ифодаланади, бу ерда } n_{3,1} = 0, 1, 2, \dots. \text{ Агар}$$

бундай ўлчамли квантлашиш содир бўлмаса, у ҳолда локаллашган сатҳ



4-расм. Симметриявий структурадаги $U = 2E_0$, $U = 5E_0$, $U = 10E_0$ баландликли потенциал тўсиқ устидан қайтиш коэффицентининг потенциал тўсиқ қалинлиги $(x_2 - x_1)$ га боғланиш графиги, бу ерда $E_0 = \hbar^2 / (2m_0(x_2 - x_1))$, m_0 - эркин электрон массси, $(x_2 - x_1)$ нанометрларда қайд қилинган.

энергияси: электронларнинг потенциал тўсиқ устидан ўтишида $\frac{(\tilde{k}_2 + \tilde{k}_1)^2}{\tilde{k}_2^2 - \tilde{k}_1^2} = \cos[k_2(x_2 - x_1)]$; электронларнинг потенциал тўсиқ орқали ўтишида

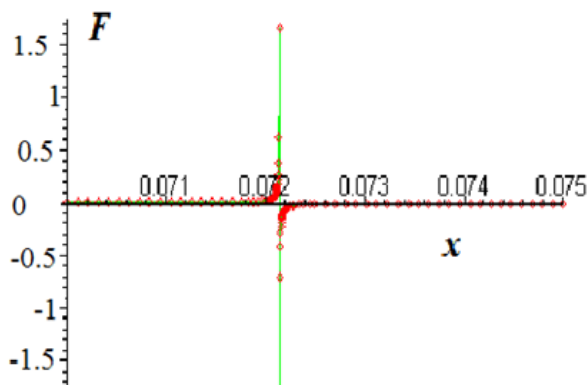
$e^{\kappa_2(x_2 - x_1)} = \frac{\tilde{k}_2^2 - \tilde{k}_1^2}{\tilde{k}_2^2 + \tilde{k}_1^2}$ трансцендент тенгламалар ёрдамида аниқланади. Охирги

трансцендент тенгламадан кўриняптики, потенциал тўсиқ соҳасида электронлар учун битта локаллашган сатҳ бўлиши мумкин (5-расм). Агар қатламлардаги эффектив массалари бир хил бўлса, у ҳолда электронларнинг потенциал тўсиқ орқали ўтишида локаллашган сатҳлар энергияси эса куйидаги ифода билан аниқланади:

$$E_n^{(2)} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{8 m_2 (x_2 - x_1)^2} n^2 + U_2. \quad (6)$$

$x_2 - x_1$ – ўра қалинлиги.

3-ва 4-расмларда потенциал тўсиқ ости ўтиш ва қайтиш коэффициентларининг $k_2(x_2 - x_1)$ параметрга боғлиқлиги тасвирланган. Бунда уч қатламли структуранинг қатламларидаги электронларнинг эффектив массалари $m_1=0.078 m_0$, $m_2=0.036 m_0$, $m_3=0.078 m_0$ каби танланган. Микдорий ҳисоблашларда потенциал тўсиқ қалинлиги $x_2 - x_1 = x = 1 \cdot 10^{-9}$ м., ўнг ва чап тараф баландликлари мос ҳолда $U_1=20$ meV, $U_3=10$ meV каби танланган. Структуранинг асимметриявийлиги туфайли потенциал тўсиқнинг маълум бир соҳалари электронлар тўлқинлари учун шаффоф соҳа бўлиб ҳисобланади. Бунинг сабаби электронлар тўлқин векторлари учун рухсат этилган ва тақиқланган қийматлар соҳаси мавжудлигидадир.



5-расм. Электронларнинг локаллашиш энергиясини тавсифловчи $F(\tilde{k}_2, \tilde{k}_1; x) = \frac{(\tilde{k}_2 + \tilde{k}_1)^2}{\tilde{k}_2^2 - \tilde{k}_1^2} - \cos[k_2(x_2 - x_1)]$ функциянинг (вертикал ўқ) $x = k_2(x_2 - x_1)$ катталиқка боғлиқлиги.

Натижавий потенциал тўсиқ ости ўтиш коэффицентининг (z ўқи) нанометрларда қайд қилинган (x ўқи) потенциал тўсиқ қалинлигига ҳамда электрон вольтларда қайд қилинган электрон энергиясига (y ўқи) осцилляциявий боғлиқлиги 6-расмда тасвирланган.

Диссертацияда натижалари таҳлил этилган ишларда ўлчамли квантлашиш ҳодисасининг тадқиқоти мураккаб зонали, масалан ўркач-симон зонали (масалан, n -GaP ёки p -Te), яримўтказгичларда олиб борилмаган. Шу сабабли n -GaPда ўстирилган ўлчамли квантлашган ўрадаги электронли ҳолатларни тадқиқ қилиш учун электронларнинг

$U(z)$ потенциалли эффектив гамильтониани қуйидаги кўринишда танлаймиз

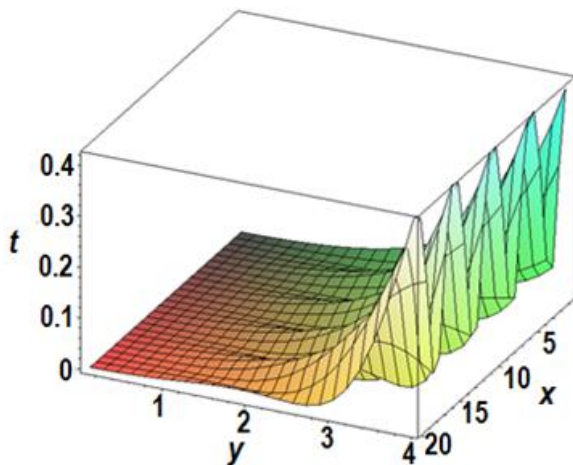
$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{R}_2 k_{\perp}^2, \quad (7)$$

бу ерда

$$\hat{H}_0 = \frac{\Delta}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A_3 & 0 \\ 0 & A_1 \end{bmatrix} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + U(z), \quad \hat{R}_2 = \begin{bmatrix} B_3 & D \sin \varphi \cos \varphi \\ D \sin \varphi \cos \varphi & B_1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$A_{3,1}, B_{3,1}, D, P$ - n -GaPнинг зонавий параметрлари, $k_{\perp}^2 = k_x^2 + k_y^2$, $\vec{k}_{\perp} = (k_x, k_y)$ (ёки $k_x = k_{\perp} \cos \varphi$, $k_y = k_{\perp} \sin \varphi$) электроннинг интерфейс бўйлаб йўналган икки ўлчамли тўлқин вектори, $\vec{r}_{\perp} = (x, y)$, φ – интерфейлда жойлашган икки ўлчамли Декарт координаталар системасининг Ox ўқи ва \vec{k}_{\perp} вектор орасидаги бурчак. (7) гамильтонианли Шредингер тенгламасини ечиб, ўтказувчанлик зонаси икки тармоқдан иборат ва уларнинг орасида энергетик тирқиш мавжуд бўлган яримўтказгичда электронларнинг ўлчамли квантлашган энергетик спектри: изотроп эффектив масса яқинлашишида импульслар фазосида ўзаро кесишмайдиган, анизотропиявий эффектив масса яқинлашишида эса ўзаро кесишадиган энергетик сатҳлар тўпламидан иборат эканлиги кўрсатилган

«Ўрқачсимон зонали яримўтказгичда фотонли кинетик ходисалар» номли тўртинчи бобда ковакли ўтказувчанликли теллурда содир бўладиган фотонли эргаштириш токининг спектрал ва температуравий боғланиши тушаётган ёруғликнинг қутбланиш даражасига эътибор қаратиб ҳисобланган.



6-расм. Потенциал тўсиқ ости ўтиш коэффициенти (z ўқи)нинг нанометрларда қайд қилинган (x ўқи) потенциал тўсиқ қалинлигига ҳамда электрон вольтларда қайд қилинган электрон энергияси га (y ўқи) боғлиқлиги.

Бунда дастлаб фотонли эргаштириш токининг феноменологиявий таҳлиллари бажарилиб, сўнгра унинг ёруғлик қутбланиш дажарасига боғлиқ ҳолда микроскопик назарияси қурилган.

Фотонли эргаштириш токини ҳисоблашда ток ташувчилар энергиявий спектрининг табиати (изотроп ёки анизотроп бўлиши) катта мазмун касб этади. Шу сабабли дастлаб ковакли теллурнинг зонавий тузилиши: валент зонасининг тармоқларидаги ковакларнинг энергетик спектрлари, сўнгра фотонли эргаштириш токининг тензорлари ҳисобланган. Хусусан, ковакларнинг қуйидаги

энергетик спектрига нисбатан

$$E_l(\vec{k}) = A_{\parallel} k_z^2 + A_{\perp} k_{\perp}^2 + (-1)^{l+1} \sqrt{\Delta_z^2 + \beta_v^2 k_z^2} \quad (9)$$

фотонли эргаштириш токи тензори учун қуйидаги ифода олинган ($\vec{e} \parallel c_3$)

$$\sigma_{yzx}^{(i)} = (-1)^i \frac{16\pi eI}{\hbar\omega} K' \frac{\delta k_B T \Delta_2 \hbar\omega g \tau_{lk_0} \hbar}{m_0 \beta_v^2 \left[(\hbar\omega)^2 - 4\Delta_2^2 \right]}, \quad (10)$$

бу ерда $A_{\parallel} = 0.363 \times 10^{-14} \text{ eV} \cdot \text{cm}^2$, $A_{\perp} = 0.326 \times 10^{-14} \text{ eV} \cdot \text{cm}^2$, $\beta_v^2 = 0.6 \times 10^{-15} \text{ eV}^2 \cdot \text{cm}^2$

$\Delta_2 = 63.15 \times 10^{-3} \text{ eV}$, δ -Тенинг зонавий параметрлари, Бундай ҳолда $l = 1$ (M_1') тармоқнинг спектрида «ўркач» пайдо бўлади ва унинг чуқурлиги

$$\varepsilon_{\min} = \Delta_2 - \left(\frac{\beta_v^2}{4A} + \frac{\Delta_2^2 A_{\parallel}}{\beta_v^2} \right) = -2.37 \text{ meV} \quad \text{унга мос келувчи тўлқин вектор}$$

$$k_{z,\min} = \pm \frac{1}{\beta_v} \sqrt{\frac{\beta_v^4}{4A_{\parallel}^2} - \Delta_2^2} = \pm 2.16 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-1}.$$

(10)дан кўриняптики, p -Теда фотонли эргаштириш токида ковакларнинг g -фактори ҳисобига ҳосил бўладиган улуши температуранинг ортиши билан орта боради. Ҳисоблашлар кўрсатадики, $\lambda = 10,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ тўлқин узунликли CO_2 лазер билан хона температурасидаги $p\text{-Te}$ ёритилганида фотонли эргаштириш токи спектрал боғланишидаги назарий ҳисобланган максимал қиймати экспериментал қийматдан 1,2 марта кичиклиги келиб чиқади, бу ерда коваклар учун $g \approx 5$ миқдор танланган. Назарий ва экспериментал натижалардаги бундай фарқ коваклар эффектив массаси ва g -факторининг анизотропияси эътиборга олинганида камайиши мумкин. Микроскопик нуқтаи назардан $\hbar\omega \ll \Theta < 2\Delta$ частоталар соҳасида циркуляр силжишли (бош симметрия ўқига нисбатан) кўндаланг фотонли эргаштириш токининг спектрал боғланиши тақсимот функцияси ва коваклар импульси релаксация вақтининг энергиявий боғланиши билан аниқланади. Бундай фототок теллурнинг бир ўқли симметрияга эга бўлиши, яъни ε_{\perp} , ε_{\parallel} – кўндаланг ва бўйлама диэлектрик киритувчанлик билан аниқланувчи анизотропияси мавжудлиги билан содир бўлади.

Силжишли фотонли эргаштириш токининг спектрал боғланишида $\lambda \ll \frac{\hbar \cdot c}{(k_B T)}$ шартни қаноатлантирувчи тўлқин узунликлар соҳасида

$$j_y^{(PDE, circ)} \propto \frac{1}{\lambda} \text{ тур, } \lambda \gg \frac{\hbar \cdot c}{(k_B T)} \text{ тўлқин узунликлар соҳасида эса } j_y^{(PDE, circ)} \propto \lambda^3$$

тур асимптотик боғланишлар кузатилади. Шунингдек, фотонли эргаштириш токининг спектрал боғланишида даражали: $(\hbar\omega - 2\Delta_2)^{-n}$ тур сингулярлик (ўзига хослик) аниқланган ва у коваклар энергиявий спектридаги ўркачсимон соҳанинг мавжудлиги, яъни бош симметрия ўқи йўналишидаги ҳолатлар зичлиги билан унга тик йўналишдаги ҳолатлар зичлигини бир-биридан фарқ қилиши билан тушунтирилади. Масалан, ковакларнинг g -фактори билан боғланган бир фотонли эргаштириш токи учун $n = 1/2$. Натижада зонанинг битта тармоғи ичидаги оптик ўтишлардаги сингулярлик зонанинг тармоқлариаро оптик ўтишлардагига нисбатан $\sim \hbar / (|2\Delta - \hbar\omega| \tau)$ марта катта бўлади.

ХУЛОСА

Ўркачсимон зонали яримўтказгичларда ўлчамли квантлашиш ҳамда кутбий оптик ва фотовольтаик ходисаларнинг назарий тадқиқи бўйича қуйидаги хулосалар қилинди:

1. Бир фотонли ютилишининг спектрал боғланишида яримўтказгич зонавий тузилишига, ёруғликнинг кристалл бош симметрия ўқиға нисбатан тарқалиш йўналишига боғлиқ даражали ўзига хослик-сингулярлик кузатилиши шарти аниқланган.
2. Электронлар учун локаллашган сатҳ содир бўлиши шартлари аниқланган ва уч қатламли яримўтказгичли структура ўрасида ўлчамли квантлашиш содир бўлмаган ҳолда электронларнинг локаллашиш энергияси потенциал тўсиқ устидан ёки тўсиқ орқали ўтишига боғлиқ ҳолда икки хил трансцендент тенгламалар ёрдамида ҳисобланган.
3. Асимметриявий уч қатламли структурада потенциал тўсиқдан қайтиш ва ўтиш коэффициентининг фазовий осцилляцияси амплитудаси ва частотаси потенциал тўсиқнинг ўнг ва чап баландликлари ҳамда электронларнинг қўшни қатламлардаги эффектив массаларига боғлиқлиги аниқланган.
4. *n*-тип галлий фосфида ёруғликнинг ютилиши ёруғликнинг кристалл симметрия ўқиға нисбатан тарқалиш йўналишига боғлиқлиги аниқланган ва унга боғлиқ ҳолда оптик ўтишлар табақалаштирилган. Хусусан бош симметрия ўқи бўйлаб тарқалаётган ёруғлик ютилиш коэффициентида квадрат илдизли сингулярлик ҳисобланган. Бир фотонли ёруғлик ютилиши спектри бўйича назарий ва тажриба натижалари солиштирилган.
5. *n*-тип галлий фосфида электронларнинг ўлчамли квантлашган энергетик спектри: сферавий эффектив масса яқинлашишида ўзаро кесишмайдиган, анизотропиявий эффектив масса яқинлашишида эса ўзаро кесишадиган энергетик сатҳлар тўпламидан иборат эканлиги аниқланган.
6. *p*-тип теллурда фотонли эргаштириш токининг ковакларнинг *g*-факторига боғлиқ улуши ва токнинг спектрал боғланишида даражали сингулярлик аниқланган. Бу ўзига хосликнинг зонанинг битта тармоғи ичидаги оптик ўтишларида тармоқлараро оптик ўтишлардагига нисбатан $\sim \hbar / (|2\Delta - \hbar\omega| \tilde{\tau})$ марта катта бўлиши ҳисобланган, бу ерда τ – коваклар импулси релаксация вақти.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.30.08.2018.FM/T.01.12 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ
ПРИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ
ПРИ НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА**

**КОКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ**

МАМАДАЛИЕВА НАРГИЗА ЗОКИРЖОН КИЗИ

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗМЕРНОГО
КВАНТОВАНИЯ И ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ
ЯВЛЕНИЙ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ С ГОРБООБРАЗНОЙ ЗОНОЙ**

01.04.10 – Физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)
ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент–2019

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2018.4.PhD/FM297.

Диссертация выполнена в Кокандском государственном педагогическом институте.

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

Научный руководитель:	Расулов Рустам Явкачович, доктор физико-математических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Дадамирзаев Мухаммаджон Гуломкодирович, доктор физико-математических наук, доцент Аюханов Рашид Ахметович, доктор физико-математических наук
Ведущая организация:	Ташкентский государственный технический университет

Защита диссертации состоится «__» _____ 2019 года в __ часов на заседании Научного совета по присуждению ученой степени доктора философии PhD.30.08.2018.FM/T.01.12 при Научно-исследовательском институте физики полупроводников и микроэлектроники Национального университета (Адрес: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871) 248-79-94, факс (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Отделе внедрения информационных технологий института (зарегистрирована за №____) по адресу: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871) 248-79-59.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2019 года
(реестр протокола рассылки №__ от «__» _____ 2019 г.)

Ш.Б. Утамурадова,
председатель Научного совета по присуждению
ученой степени доктора философии, д.ф.-м.н.,
профессор

С.С. Насриддинов,
ученый секретарь Научного совета по
присуждению ученой степени доктора философии,
д.т.н., доцент

А.Т. Мамадалимов,
председатель научного семинара при Научном
совете по присуждению ученой степени доктора
философии, д.ф.-м.н., профессор, академик

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. Интенсивно развивающиеся в мире объемные и низкоразмерные полупроводниковые приборы в области нано- и оптоэлектроники, поляритоники и фотоники приобретают все большее значение. В области исследований линейных и нелинейных по интенсивности поляризационных оптических и фотовольтаических эффектов возникает необходимость создания сверхнизкоинерционных фотоэлектрических элементов и фотоэлектрических устройств, которые работают в инфракрасной области излучения. По этой причине теоретические и экспериментальные исследования оптических и фотовольтаических эффектов, зависящих от степени поляризации света в полупроводниках и их наноразмерных структурах, являются одной из важнейших задач в области физики твердого тела.

В настоящее время в мире исследования физических процессов, происходящих в размерно-квантованных и объемных полупроводниках, являются одной из важнейших задач в следующих направлениях научных исследований: определение локализованных состояний электронов в полупроводниковой структуре, состоящей из периодически расположенных систем «потенциальная яма+потенциальный барьер»; определение механизмов оптических и фотоэлектрических эффектов, возникающих в полупроводниках под действием поляризованного света; расчет спектральных и температурных зависимостей фототока фотонного увлечения, относящегося к поляризационным фотовольтаическим эффектам; определение зависимости поглощения поляризованного света от своеобразия, в частности от горбообразности, зонной структуры полупроводника.

В нашей стране в приоритетных направлениях развития науки, в том числе, в изучении фотоэлектрических явлений, получены значительные результаты. В частности, в области исследования оптических и фотонно-кинетических явлений в объемных и низкоразмерных полупроводниках. Согласно Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан особое внимание уделяется решению вопросов развития научно-инновационной деятельности, механизмов эффективности реализации научных и инновационных достижений.

Результаты научного исследования данной диссертации в определенной степени служат выполнению задач, предусмотренных в ряде Указов и Постановлений Президента Республики Узбекистан, в том числе в Указе Президента № УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшей реализации Стратегии действий по развитию Республики Узбекистан в 2017–2021 годах» и в Постановлениях Президента № ПП-3855 от 14 июля 2018 года «О дополнительных мерах по повышению эффективности коммерциализации результатов научной и научно-технической деятельности», № ПП-3899 от 6 августа 2018 года «О мерах по повышению эффективности системы интеграции научной и инновационной деятельности» и № ПП-2789 от 17 февраля 2017 года «О мерах по

дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности», а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере и изложенных в соответствующих законодательных актах.

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

Степень изученности проблемы. Исследования явлений, возникающих под действием поляризованного света в полупроводниках со сложной зоной, проводятся в ряде научно-исследовательских институтов и университетов развитых стран мира. В частности, такие научные исследования проводятся в American Institute of Physics (США), University of New Hampshire (США), Universität Regensburg (Германия), Institute of Physics (Варшава, Польша), Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург), Физическом институте им. П.Н. Лебедева (Москва), в Институтах физики полупроводников (Новосибирск, Россия; Киев, Украина).

В частности, ряд механизмов фотовольтаических явлений, возникающих под воздействием поляризованного света, исследовали А.М. Гласс (США), фон Балтц (Германия) и В.М. Фридкин (Москва, Россия) в сегнетоэлектриках. Также экспериментальные исследования поляризованного фотовольтаического эффекта в объемных полупроводниках проведены К.Н. Герман (Германия) и А.Ф. Гибсон (США) в GaP, G. Ribakovs, A.A. Gudjian (Канада) и А.А. Рогачевым (Санкт-Петербург, Россия) в теллуре, J.M. Doviak, S. Kothari (США) и И.Д. Ярошецким (Санкт-Петербург, Россия), С.Д. Ганичевым (Дортмунд, Германия) в *p-GaAs*, В.А. Шалыгиным (Санкт-Петербург, Россия) в полупроводниковых наноструктурах (фотовольтаический эффект, зависящий от спина носителей тока).

Группой российских ученых под руководством академиков Российской АН В.И. Переля (Санкт-Петербург), А.В. Чаплика (Новосибирск) и Ю.В. Копеева (Москва), членов-корреспондентов Российской АН Е.Л. Ивченко и М.М. Глазова, профессоров Г.Е. Пикуса, Н.С. Аверкиева, Л.Е. Голуба, С.А. Тарасенко, М.И. Дьяконова (Санкт-Петербург), профессоров В.И. Белиничера, Б.И. Стурмана, Л.И. Магарилла, А. Чаплика, М.В. Энтина (Новосибирск) теоретически исследованы некоторые механизмы поляризационных фотовольтаических эффектов в полупроводниковых наноструктурах, в топологических диэлектриках и в графене.

Механизмы некоторых поляризационных оптических, фотоэлектрических эффектов и эффекта фотонного увлечения в объемном и низкоразмерном полупроводнике были исследованы учеными нашей страны Э.З. Имамовым и Р.Я. Расуловым.

Анализ результатов научных работ, опубликованных в специальной литературе, посвященных поляризационным оптическим и фотоэлектрическим эффектам показывает, что до настоящего времени не исследованы:

а) эффект размерного квантования в $n\text{-GaP}$ и зависимость механизмов межподзонного поглощения света от природы оптических переходов и направления распространения света относительно главной оси симметрии кристалла в $n\text{-GaP}$ с горбообразной зоной проводимости; б) поглощение света и эффект однофотонного увлечения в полупроводнике с горбообразной зонной структурой; в) линейно-циркулярный дихроизм однофотонного поглощения света $n\text{-GaP}$; г) влияние спин-орбитального взаимодействия (g -фактора) на ток фотонного увлечения. Такие исследования были проведены в настоящей диссертации.

Связь темы диссертационного исследования с тематическими планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках научно-исследовательского проекта КИ-02-35 Кокандского государственного педагогического института на тему «Теоретическое и экспериментальное исследование характеристик полупроводников» (2016–2018 гг.) и гранта фундаментальных исследований Ферганского государственного университета ОТ-Ф2-66 на тему «Теоретическое исследование фотонно-кинетических явлений в полупроводниках и в их наноструктурах» (2017–2019 гг.).

Целью исследования является квантово-механическое определение локализованного состояния для двумерных электронов и механизмов оптического эффекта, а также эффекта фотонного увлечения, характеризующихся оптическими переходами, происходящими между подзонами в полупроводнике с горбообразной зонной структурой.

Задачи исследования:

теоретическое исследование электронных состояний в полупроводниковой несимметричной структуре, состоящей из чередующихся потенциальных барьеров и ям;

выполнение квантово-механических расчетов поглощения поляризованного света в полупроводнике с горбообразной зонной структурой;

классификация оптических переходов, происходящих между подзонами зоны проводимости $n\text{-GaP}$ и определение математических выражений спектральной и температурной зависимости коэффициента однофотонного линейно поляризованного света;

определение вклада в ток эффекта фотонного увлечения, зависящий от коэффициента спин-орбитального взаимодействия (g -фактора) в полупроводнике с горбообразной зонной структурой;

сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными, полученными в фосфиде галлия электронной проводимости.

Объектом исследования являются полупроводники с горбообразной зоной и тетраэдрической симметрией, а также система двумерных носителей тока.

Предметом исследования являются размерное квантование в системе двумерных носителей тока и поляризационные фотонно-

кинетические эффекты в полупроводниках с горбообразной зоной и тетраэдрической симметрией.

Методы исследования. При решении поставленных задач применены уравнение Шреденгера, методы диаграммной техники, теории групп и инвариантов, используемые в квантовой статистической физике и физической кинетике.

Научная новизна исследования:

из расчетов локализованного состояния электронов в несимметричной структуре, состоящей из периодически расположенных потенциальных барьеров и ям, установлено, что матрицы переноса (transfer matrices) носителей тока в слоях такой структуры являются неунитарной матрицей;

рассчитан трехфотонный линейно-циркулярный дихроизм, характеризуемый межзонными оптическими переходами;

определено наличие корня квадратной сингулярности коэффициента поглощения поляризованного света в полупроводнике с горбообразной зоной, связанного с зависимостью направления распространения света;

теоретически доказано, что экспериментально обнаруженный в *n-GaP* переход спектральной зависимости коэффициента поглощения света через экстремум связан с горбообразностью зоны;

с помощью квантово-механического метода рассчитан вклад g фактора в ток фотонного увлечения в полупроводнике с горбообразной зоной.

Практические результаты исследования:

методы расчета электронных состояний в многослойных полупроводниках использованы в полупроводниковой низкоразмерной системе носителей тока;

результаты изучения поляризационных оптических явлений и эффектов фотонного увлечения могут быть использованы при оптимизации оптических характеристик систем оптико-голографической записи, сохранения в памяти и переобработки информации оптоэлектронных устройств и фотоприемников.

Достоверность результатов исследования обосновывается совпадением теоретических результатов с экспериментальными данными, полученными ведущими специалистами по фотонно-кинетическим явлениям в полупроводниках со сложной зонной структурой, правильным выбором объектов исследования, строгостью математических выкладок, где использованы методы теории поля и квантовой статистической физики, применяемые в теории твердого тела.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования отражена в получении новых данных по размерному квантованию, поляризационным оптическим и некоторым фотовольтаическим эффектам в *n-GaP*, учитывающим своеобразности его зонной структуры.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что результаты по поляризационным оптическим и фотовольтаическим эффектам, протекающим в объемном и низкоразмерном полупроводнике,

могут быть использованы в опто- и наноэлектронике, фотонике, поляритонике и стимулируют последующие теоретические и экспериментальные исследования упомянутых выше фотонно-кинетических эффектов.

Внедрение результатов исследования. На основе определения механизмов поляризационных оптических и размерно-квантованных явлений в полупроводниках с горбообразной зоной представлены:

результаты по расчету спектров одно- и многофотонного поглощения поляризованного света в полупроводнике с горбообразной зоной был внедрен на АО «Фотон» и АК «Узэлтехсаноат» (Справка Узэлтехсаноат № 02-35 от 07 марта 2019 г.). Применение научных результатов привело к созданию сверхнизкоинерционных арсенид галлиевых фотодатчиков, а также оптимизированию оптических характеристик полупроводниковых оптоэлектронных устройств;

результаты по спектральной зависимости тока фотонного увлечения в полупроводниках с горбообразной зоной использованы в гранте АҲР(Ғ) - 2015/6 "The Investigation of Foelectrical Properties of the Photodiodes for 1-4 μm Infrared Region" при теоретических исследований оптических свойств полупроводниковых фотодиодов длины волны 1-4 μm (Справка университета Улудаг (Турция) – АҲР(Ғ)-2015/6 05-12/1025 от 02 февраля 2019 г.). Использование научных результатов позволило повысить работоспособность полупроводниковых фотопреобразователей в области высоких частот;

расчеты по локализованным состояниям электронов в структуре, состоящей из чередующихся потенциальных ям и барьеров, использованы в гранте Ф2-ОТ-О-15494 «Квантовые точечные диссипации и наноструктуры, экситоны, полюса, биполяроны и движения, фотоэлементы и оптимизация эффективности других типов оптоэлектронных устройств» при теоретическом анализе оптических переходов в квантовых точках и наноструктурах (Справка Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан 89-03-670 от 15 февраля 2019 г.). Использование научных результатов позволило исследовать фотонно-кинетические свойства структур с гетеропереходами, выращенных на основе полупроводников со сложной зоной;

расчеты тока фотонного увлечения в полупроводниках кубической симметрии с зоной, одна ветвь которой горбообразна, использованы в гранте №10/2000 «Экситон-поляритонная люминесценция полупроводниковых кристаллов и квантово-размерных структур при фотовозбуждении и каналировании ионов» при изучении спектрального анализа люминесценции полупроводниковых кристаллов (Справка Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан 89-03-670 от 15 февраля 2019 г.). Использование научных результатов позволило расширить области исследований люминесценции, наблюдаемые в полупроводнике и размерно-квантованных структурах.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 5 международных и 2 республиканских конференциях.

Публикация результатов диссертации. По материалам диссертации опубликовано 14 научных работ, из них 7 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 111 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Данная диссертация посвящена исследованию размерного квантования в *n-GaP*, оптических и фотоэлектрических эффектов, зависящих от степени поляризации света с учетом горбообразности зоны полупроводника.

Во введении обоснованы актуальность и необходимость темы диссертации, соответствие проведенных научных исследований приоритетным направлениям развития науки и технологии в нашей стране, приведен обзор научных исследований по теме за рубежом и в Узбекистане, проанализирован уровень исследования проблемы, дана информация о целях, задачах, предмете и объекте исследования, научной новизне и практической ценности исследования, а также их применении, об опубликованных работах и структуре диссертации.

Первая глава «**Поляризационные и фотовольтаические эффекты в полупроводниках и их размерно-квантованных системах**» посвящена исследованию оптических и фотовольтаических эффектов, зависящих от степени поляризации света, в объёмном и размерно-квантованном полупроводнике.

В этой главе приведён обзор литературы по поглощению поляризованного света в размерно-квантованном полупроводнике со сложной зоной, по правилу выбора оптических переходов в двумерных полупроводниках, по поляризационным фотовольтаическим эффектам в полупроводниках и их размерно-квантованных структурах, по феноменологическим и поляризационным зависимостям фотовольтаических эффектов в двумерных полупроводниках. В этом случае проведён расчёт размерного квантования носителей тока, зонной структуре полупроводников, внутривозонных матричных элементов оператора импульса, проанализированы механизмы явлений, относящихся к теме диссертации, по методу эффективного гамильтониана.

В этой главе указано, что в проанализированной литературе не обращено внимания на горбообразность зоны проводимости *n-GaP* полупроводника при исследовании размерного квантования, поглощения поляризационного света и тока фотонного увлечения, а также не исследован вклад эффекта когерентного насыщения на однофотонное поглощение.

В ряде работ исследованы элементарные механизмы эффекта фотонного увлечения в газе двумерных размерно-квантованных электронов, однако в них не обращено внимания на зависимость размерного квантования энергетического спектра от размерного квантования импульса электронов,

поперечной эффективной массы лёгких и тяжёлых дырок от номера размерного квантования, матричного элемента оптического перехода от импульса фотона.

Во второй главе «Теория поглощения поляризованного света в фосфиде галлия электронной проводимости» приведены расчёты коэффициентов одно- и многофотонного поглощения поляризованного света не только в зависимости от своеобразности, например, горбообразности зонной структуры полупроводника, но и в зависимости от ориентации направления распространения света относительно главной оси симметрии. Также проведен теоретический анализ наблюдения своеобразности в спектральной зависимости коэффициента поглощения света от его направления распространения.

В дальнейшем считается, что в полупроводнике дырочной проводимости, например $p\text{-GaAs}$, промежуточные (виртуальные) состояния с номером n_1 , участвующие в двухфотонных оптических переходах между подзонами легких и тяжелых дырок, находятся в той же зоне Γ_8 . Тогда оптическим переходам $n \equiv (V_2, m) \rightarrow n' \equiv (V_1, m')$, соответствующим двухфотонному поглощению, дают вклад четыре процесса типа

$$(V_2; \pm 1/2) \rightarrow (V_2; \pm 1/2) \rightarrow (V_1; \pm 3/2), (V_2; \pm 1/2) \rightarrow (V_1; \pm 3/2) \rightarrow (V_1; \pm 3/2).$$

Если учтем указанные выше оптические переходы, тогда отношение коэффициентов одно- и двухфотонного поглощения света, частота которого удовлетворяет условию $\hbar\omega \gg k_B T$, определяется, как

$$\frac{K^{(2)}(\omega)}{K^{(1)}(\omega)} = \frac{2 \cdot W^{(2)}}{W^{(1)}} = 2 g_2 \frac{2\pi e^2 I}{m_0^2 \omega^2 c n_\omega} \frac{m_0^2}{\hbar^2} \frac{16 B^2}{(\hbar\omega)^2} \frac{k_2^4}{k_1^4} \frac{\overline{e_z^2 |e_+^2|}}{(1 - e_z^2)} \frac{k_2}{k_1} e^{(\mu - E^*)/k_B T}, \quad (1)$$

где g_2 – фактор когерентности, I – интенсивность света, B – зонный параметр полупроводника, $k_2(k_1)$ – волновой вектор при двух(одно) фотонном поглощении, E^* – энергия дырок при однофотонном поглощении, μ – энергия Ферми, линия над выражением означает угловое усреднение. Остальные величины общеизвестны. В этом случае обратим внимание на закон сохранения энергии для одно- и двухфотонного переходов и на то, что $\overline{(1 - e_z^2)} = \frac{2}{3}$, а также для линейно поляризованного света $\overline{(|e_z^2| |e_+^2|)}$ равно 2/15, а для циркулярно поляризованного света 1/5. Отсюда возникает линейно-циркулярный дихроизм при двухфотонном поглощении света.

Если учесть непараболичность в энергетическом спектре электронов при расчете коэффициента поглощения света, обусловленного оптическими переходами между зонами, то в полупроводниках кубической симметрии коэффициент однофотонного поглощения растет с ростом $x = E_g / \hbar\omega$ (рис. 1). Этот случай объясняется тем, что с ростом частоты света увеличение

концентрации и плотности состояния носителей тока превосходит уменьшение их функции распределения.

Если учтены оптические переходы между валентной зоной и зоной проводимости, а также между валентной и спин-отщепленной зоной, тогда при трехфотонном поглощении света, частота которого удовлетворяет условию $3 \cdot \hbar \omega - E_g \ll E_g$, отношение вероятностей оптических переходов при поглощении линейно и циркулярно поляризованного света $W_{\text{лин}}^{(3)} / W_{\text{цирк}}^{(3)}$ определяется величиной $E_g / (3\hbar \omega - E_g)$, т.е. выполняется условие $W_{\text{лин}}^{(3)} \gg W_{\text{цирк}}^{(3)}$.

Этот результат по существу соответствует закону сохранения моментов, поскольку проекция момента циркулярно-поляризованных трех фотонов на направление волнового вектора света $+3\hbar$, а при межзонных оптических переходах момент фотона не изменяется на две единицы потому, что сумма моментов тяжелой дырки и электрона может быть равна $+3\hbar / 2 + \hbar / 2 \equiv 2\hbar$.

С ростом значения величины $(3\hbar \omega - E_g)$

происходят оптические

переходы “разрешенный–запрещенный–запрещенный” типа $V \rightarrow V \rightarrow V \rightarrow c$, $V \rightarrow c \rightarrow c \rightarrow c$, $V \rightarrow V \rightarrow c \rightarrow c$. Такие типы трех фотон(этап)ных оптических переходов разрешены как для линейно-, так и для циркулярно-поляризованного света потому, что при таких оптических переходах часть моментов трех циркулярно-поляризованных фотонов передается электронам, движущимся в одной зоне. Например, для *InAs* коэффициент трехфотонного линейно-циркулярного дихроизма $\alpha^{(3)} = W_{\text{лин}}^{(3)} / W_{\text{цирк}}^{(3)} \gg 10$.

Если учесть горбообразность нижней ветви зоны проводимости *n-GaP*, то спектральная и температурная зависимость однофотонного поглощения света выражается как

$$K = \frac{4\pi^2}{3} \frac{e^2}{\hbar c} \frac{a}{n_\omega} \frac{P^2 N}{(\hbar \omega)^2} \frac{\Delta}{\sqrt{(\hbar \omega)^2 - \Delta^2}} e^{-\frac{Ak_\omega^2 - (\hbar \omega / 2)}{k_B T}}, \quad (2)$$

здесь учтены соотношения: $\sum_\alpha e_\alpha^2 = 1$, где 2Δ – энергетическая щель между подзонами в центре зоны Бриллюэна, A, P – зонные параметры перед

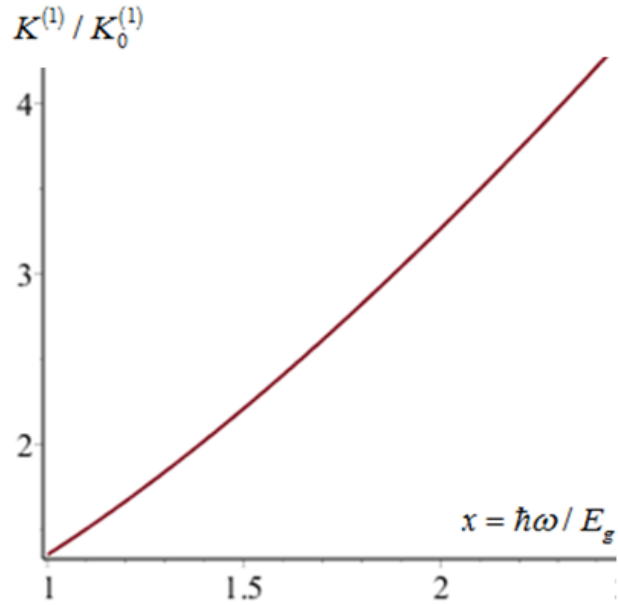


Рис.1. Зависимость $K^{(1)} / K_0$ от величины $x = \hbar \omega / E_g$.

$$K_0 = \frac{e^2}{\hbar c n_\omega} k_1^{(g)}, \quad k_1^{(g)} = \left[2 \mu_1 E_g / \hbar^2 \right]^{1/2}.$$

квадратичным и линейным по волновому вектору слагаемых в эффективном гамильтониане электронов, k_o – волновой вектор носителей тока, определяемый законом сохранения энергии.

На рис. 2 сопоставлена спектральная зависимость коэффициента поглощения света, рассчитанная по формуле (2) при $a = const$ с экспериментальными данными.

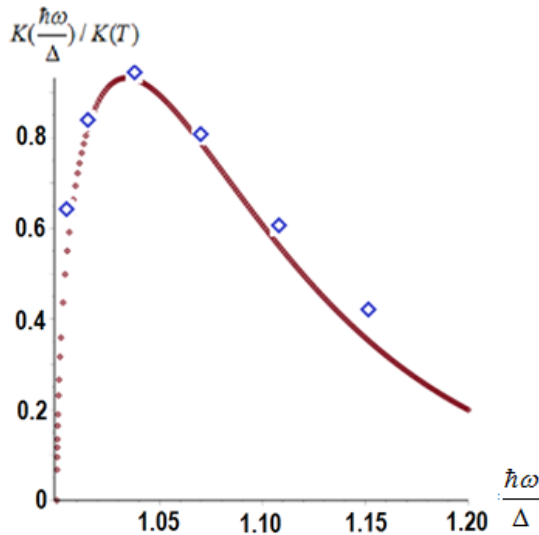


Рис.2. Теоретическая (точки) и экспериментальная (ромбики) спектральная зависимость величины $K(\frac{\hbar\omega}{\Delta}) / K(T)$ при комнатной температуре. Здесь

$$K(T) = \frac{5e^2}{3\hbar c n_\omega} \frac{P^2 e^{\frac{E_F}{k_B T}}}{(A_3 - A_1)^{3/2} \sqrt{\Delta}}.$$

Появление максимума в спектральной зависимости величины $K(\frac{\hbar\omega}{\Delta}) / K(T)$ связано с горбообразностью нижней подзоны зоны проводимости *n-GaP*. При этом в области энергии фотонов $\Delta \leq \hbar\omega \leq \Delta + \varepsilon_{min}$ увеличивается число электронов, участвующих в оптических переходах и находящихся в области горба, а в области $\hbar\omega > \Delta + \varepsilon_{min}$ – уменьшается, где ε_{min} – глубина горба энергетического спектра (например, $\varepsilon_{min} \cong 3.5 \text{ meV}$ для *n-GaP*). Расчеты показывают, что величина $K(\frac{\hbar\omega}{\Delta}) / K(T)$ имеет максимум при

$$\lambda_{max}^{(theor)} = 3.35 \cdot 10^{-6} \text{ m}, \text{ а в эксперименте } \lambda_{max}^{(exp)} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}.$$

В третьей главе «Теоретическое исследование электронных состояний в двумерном полупроводнике» анализируется явление электронного транспорта в полупроводниковой структуре, состоящей из потенциальной ямы и потенциального барьера: матричные элементы матрицы перехода (transfer matrices) в поле потенциала $U(x) = U_1$ в случае $x \leq x_1$, $U(x) = U_2$ в случае $x_1 \leq x \leq x_2$, $U(x) = U_3$ в случае $x \geq x_2$ удовлетворяют условию $T_{11}^{(3)} T_{22}^{(3)} - T_{12}^{(3)} T_{21}^{(3)} = \frac{\tilde{k}_3}{\tilde{k}_1}$ и эта матрица в общем случае не унитарная матрица, но в симметричной структуре и в структуре с химически одинаковыми слоями (эффективные массы электронов в них одинаковы) эта матрица является унитарной. Если выполняется условие размерного квантования для слоев с

номером $j, j+1, j+2, j+3$: $E_{j+1}(k_n) = \frac{\pi^2 n_{j+1}^2}{4m_{j+1}^2(x_{j+1} - x_j)^2}$, $E_{j+3}(k_n) = \frac{\pi^2 n_{j+3}^2}{4m_{j+3}^2(x_{j+3} - x_{j+2})^2}$,

тогда диагональный матричный элемент матрицы перехода

$$\begin{aligned} |T_{11}^{(j,j+4)}|^2 &= (4\tilde{k}_j\tilde{k}_{j+1}\tilde{k}_{j+2}\tilde{k}_{j+3})^{-2} \times \\ &\times \left\{ \cos^2[k_{j+2}(x_{j+2} - x_{j+1})] \cdot [\tilde{k}_{j+1}\tilde{k}_{j+3}(\tilde{k}_j + \tilde{k}_{j+2})(\tilde{k}_{j+2} + \tilde{k}_{j+4}) + \tilde{k}_{j+1}\tilde{k}_{j+3}(\tilde{k}_j - \tilde{k}_{j+2})(\tilde{k}_{j+2} - \tilde{k}_{j+4})] \right. \\ &+ \left. \sin^2[k_{j+2}(x_{j+2} - x_{j+1})] \cdot [\tilde{k}_{j+1}\tilde{k}_{j+3}(\tilde{k}_j - \tilde{k}_{j+2})(\tilde{k}_{j+2} - \tilde{k}_{j+4}) - \tilde{k}_{j+1}\tilde{k}_{j+3}(\tilde{k}_j + \tilde{k}_{j+2})(\tilde{k}_{j+2} + \tilde{k}_{j+4})] \right\}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

если выполняется условие $E_{j+1}(k_n) = \frac{\pi^2}{4m_{j+1}^2(x_{j+1} - x_j)^2}(2n_{j+1} + 1)^2$,

$$\begin{aligned} E_{j+3}(k_n) &= \frac{\pi^2}{4m_{j+3}^2(x_{j+3} - x_{j+2})^2}(2n_{j+3} + 1)^2, \text{ тогда} \\ |T_{11}^{(j,j+4)}|^2 &= (4\tilde{k}_j\tilde{k}_{j+1}\tilde{k}_{j+2}\tilde{k}_{j+3})^{-2} \times \\ &\times \left\{ \cos^2[k_{j+2}(x_{j+2} - x_{j+1})] \cdot [(\tilde{k}_{j+1}^2 + \tilde{k}_j\tilde{k}_{j+2})(\tilde{k}_{j+3}^2 + \tilde{k}_{j+2}\tilde{k}_{j+4}) + (\tilde{k}_{j+1}^2 - \tilde{k}_j\tilde{k}_{j+2})(\tilde{k}_{j+3}^2 - \tilde{k}_{j+2}\tilde{k}_{j+4})] \right. \\ &+ \left. \sin^2[k_{j+2}(x_{j+2} - x_{j+1})] \cdot [(\tilde{k}_{j+1}^2 - \tilde{k}_j\tilde{k}_{j+2})(\tilde{k}_{j+3}^2 - \tilde{k}_{j+2}\tilde{k}_{j+4}) - (\tilde{k}_{j+1}^2 + \tilde{k}_j\tilde{k}_{j+2})(\tilde{k}_{j+3}^2 + \tilde{k}_{j+2}\tilde{k}_{j+4})] \right\}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

В этих выражениях n_j – номер размерного квантования слоя с номером j , $k_j(x) = k_j = \sqrt{2m_j(E - U_j)/\hbar^2}$, $\tilde{k}_n = k_n / m_n$, m_n – эффективная масса электронов в слое с номером n . В результате наблюдаются интерференционные туннельные явления в размерно-квантованных наноструктурах и можно контролировать это явление величинами потенциального барьера. Эти случаи имеют большое значение в каскадных гетеролазерах.

На рис.3 представлена зависимость коэффициента надбарьерного

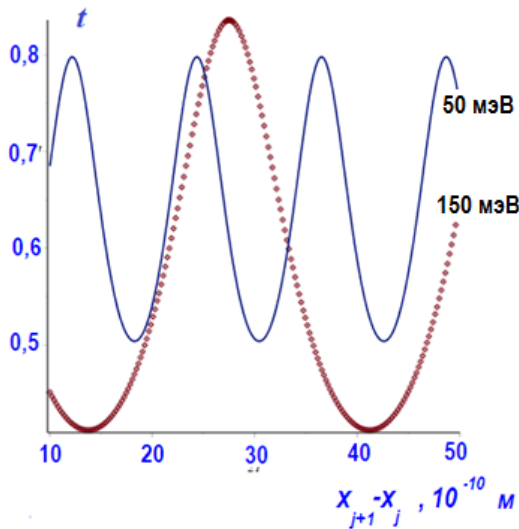


Рис.3. Зависимость коэффициента перехода над потенциальным барьером ($AlAs$) структуры $AlAs - In_{0.53}Ga_{0.47}As - InAs$ от толщины барьера.

перехода от толщины потенциального барьера ($AlAs$) в трехслойной структуре $AlAs - In_{0.53}Ga_{0.47}As - InAs$: сплошная линия соответствует электронам энергией 50 мэВ, точки для электронов энергией 150 мэВ. В численных расчетах принято, что $U_1 = 55 \text{ meV}$, $U_2 = 35 \text{ meV}$, $U_3 = 45 \text{ meV}$, $m_1 = 0.046 \cdot m_0$, $m_2 = 0.023 \cdot m_0$, $m_3 = 0.124 \cdot m_0$. В этом случае рост амплитуды коэффициента подбарьерного перехода с ростом энергии описывается прямо пропорциональной зависимостью амплитуды де Бройлевских волн электронов от их энергии, а рост периода пространственного колебания – различием фаз де Бройлевских волн электронов, находящихся в соседних слоях, и их разностью.

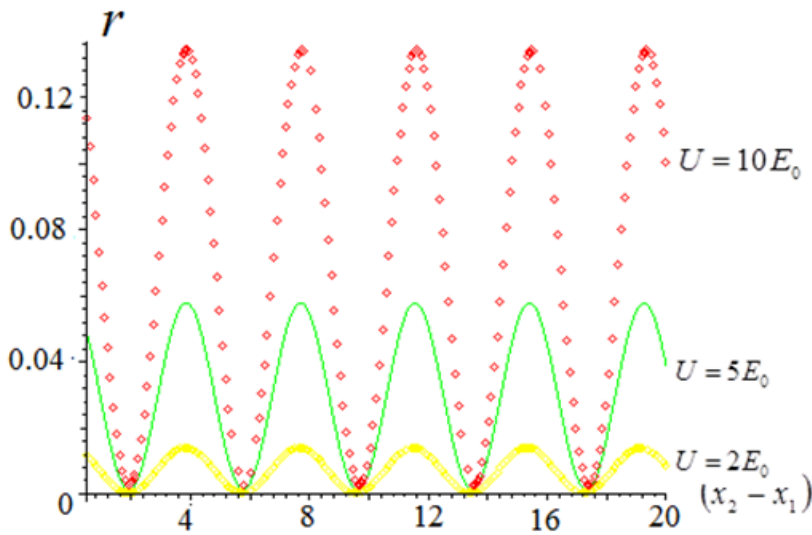


Рис.4. График зависимости коэффициента рассеяния над потенциальным барьером высотой $U = 2E_0$, $U = 5E_0$, $U = 10E_0$ от толщины потенциального барьера $(x_2 - x_1)$, здесь $E_0 = \hbar^2 / (2m_0(x_2 - x_1))$, m_0 - масса свободного электрона, $(x_2 - x_1)$ представлена в нанометрах.

Таким, образом можно получить осцилляцию коэффициента надбарьерного перехода симметричной структуры в зависимости от энергии электронов (рис. 3). Такая осцилляция описывается интерференцией де Бройлевских волн электронов, идущих к потенциальному барьеру и отраженных от него.

Расчеты показывают, что, если структура симметричная, то высота барьеров, геометрические размеры

потенциальных барьеров и ям одинаковы, тогда как амплитуда осцилляции коэффициента надбарьерного перехода будет больше амплитуды коэффициента подбарьерного перехода (рис. 4).

Такие рассуждения не теряют смысла для асимметричной структуры, однако амплитуда и частота коэффициентов перехода через потенциальный барьер и отражения от него будут зависеть от высоты левых и правых барьеров, расположенных относительно ямы, и от эффективных масс электронов, находящихся в соседних слоях. Локализованные состояния в таких структурах определяются соотношением

$$e^{i(k_3 x_2 - k_1 x_1)} \left[\left(1 + \frac{\tilde{k}_2}{\tilde{k}_1} \right) \left(1 + \frac{\tilde{k}_3}{\tilde{k}_2} \right) e^{-ik_2(x_2 - x_1)} + \left(1 - \frac{\tilde{k}_2}{\tilde{k}_1} \right) \left(1 - \frac{\tilde{k}_3}{\tilde{k}_2} \right) e^{ik_2(x_2 - x_1)} \right] = 0. \quad (5)$$

В следующих рассуждениях считается, что физические свойства крайних слоев, т.е. потенциальных барьеров, одинаковы. Тогда размерно-квантованная энергия локализованных состояний выражается как

$$E_{3,1}(k_{y,z} = 0; n_{3,1}) = \frac{\pi^2 \hbar^2 n_{3,1}^2}{8m_{3,1}(x_2 - x_{3,1})^2}, \quad \text{где } n_{3,1} = 0, 1, 2, \dots$$

Если такого размерного квантования не происходит, тогда энергия локализованных состояний

определяется решением трансцендентных уравнений: $\frac{(\tilde{k}_2 + \tilde{k}_1)^2}{\tilde{k}_2^2 - \tilde{k}_1^2} = \cos[k_2(x_2 - x_1)]$

при надбарьерном переходе электронов; а при подбарьерном переходе

электронов определяется уравнением $e^{k_2(x_2 - x_1)} = \frac{\tilde{k}_2^2 - \tilde{k}_1^2}{\tilde{k}_2^2 + \tilde{k}_1^2}$. Из последнего

трансцендентного уравнения видно, что в области потенциального барьера может быть одно локализованное состояние для электронов (рис. 5). Если эффективные массы электронов в соседних слоях одинаковы, тогда энергия локализованных состояний, проходящих через потенциальный барьер, определяется следующим выражением:

$$E_n^{(2)} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{8 m_2 (x_2 - x_1)^2} n^2 + U_2, \quad (6)$$

$x_2 - x_1$ – толщина ямы.

На рис. 3, 4 изображены зависимости коэффициентов перехода и отражения от параметра $k_2(x_2 - x_1)$. При количественных расчетах выбраны толщина барьера $x_2 - x_1 = x = 1 \cdot 10^{-9}$ м, высоты правой и левой сторон барьера $U_1 = 20$ meV, $U_2 = 10$ meV. Из-за асимметрии структуры некоторые области потенциального барьера становятся прозрачными для электронных волн. Причиной этого является наличие разрешенных и запрещенных областей значений волновых векторов электронов.

На рис. 6 представлена осциллирующая зависимость результирующего коэффициента надбарьерного перехода (ось z) от толщины барьера, измеряемая в нанометрах (ось x) и от энергии электронов, измеряемая в электрон-вольтах (ось y).

В работах, исследования которых проанализированы в диссертации, не проводились исследования явления размерного квантования в полупроводниках со сложной зоной, например, горбообразной зоной (*n-GaP* или *p-Te*). По этой причине для проведения исследования электронных состояний в размерно-квантованной яме, выращенной на основе *n-GaP*, выберем эффективный гамильтониан электронов с потенциалом $U(z)$ в виде

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{R}_2 k_{\perp}^2, \quad (7)$$

здесь

$$\hat{H}_0 = \frac{\Delta}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A_3 & 0 \\ 0 & A_1 \end{bmatrix} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + U(z), \quad \hat{R}_2 = \begin{bmatrix} B_3 & D \sin \varphi \cos \varphi \\ D \sin \varphi \cos \varphi & B_1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$A_{3,1}, B_{3,1}, D, P$ – зонные параметры *n-GaP*, $k_{\perp}^2 = k_x^2 + k_y^2$, $\vec{k}_{\perp} = (k_x, k_y)$ (или $k_x = k_{\perp} \cos \varphi$, $k_y = k_{\perp} \sin \varphi$) – двумерный волновой вектор электронов,

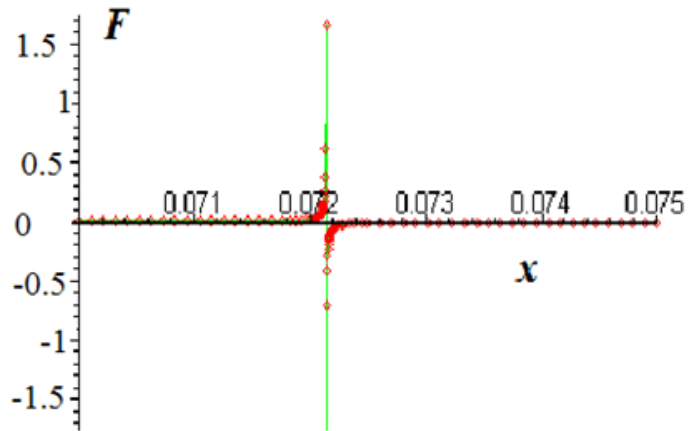


Рис.5. Зависимость функции

$$F(\tilde{k}_2, \tilde{k}_1; x) = \frac{(\tilde{k}_2 + \tilde{k}_1)^2}{\tilde{k}_2^2 - \tilde{k}_1^2} - \cos[k_2(x_2 - x_1)]$$

которая характеризует энергии локализации электронов (вертикальная ось) от величины $x = k_2(x_2 - x_1)$.

направленный по интерфейсу, $\vec{r}_\perp = (x, y)$, φ – угол между вектором \vec{k}_\perp и осью Ox декартовой системы координат, расположенной на интерфейсе.

Решив уравнение Шредингера с гамильтонианом (7), мы установили, что полупроводник с зоной проводимости, состоящей из двух ветвей, между которыми имеется энергетическая щель, размерно-квантованный энергетический спектр электронов, в приближении изотропной эффективной массы состоит из набора энергетических уровней, не пересекающихся в пространстве импульса, а в приближении анизотропной эффективной массы – из набора взаимно пересекающихся энергетических уровней.

В четвертой главе «Фотонно-кинетические явления в полупроводнике горбообразной зоны» рассчитана спектральная и температурная зависимость тока фотонного увлечения в зависимости от степени поляризации света. При этом сначала проведен феноменогический анализ тока фотонного увлечения, затем построена его микроскопическая теория в зависимости от степени поляризации света.

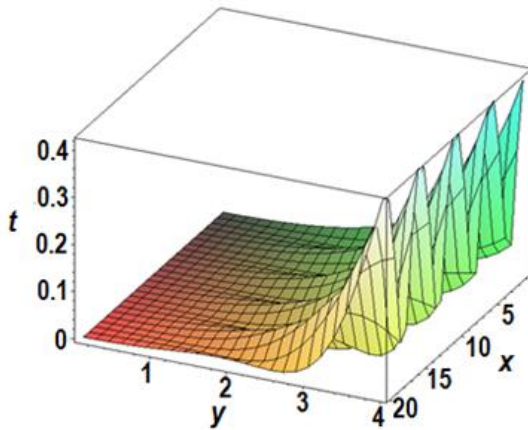


Рис.6. Зависимость коэффициента перехода электронов (ось z) над потенциальным барьером от толщины потенциального барьера (ось x), представленной в нанометрах, и от энергии электронов (ось y), представленной в электрон-вольтах.

При расчете тока фотонного увлечения основную роль играет природа энергетического спектра носителей тока (изотропен или анизотропен). Поэтому сначала рассчитана зонная структура теллура: энергетический спектр дырок в ветвях (подзонах) валентной зоны, а затем тензор тока фотонного увлечения.

В частности для энергетического спектра дырок

$$E_l(\vec{k}) = A_{\parallel} k_z^2 + A_{\perp} k_{\perp}^2 + (-1)^{l+1} \sqrt{\Delta_2^2 + \beta_v^2 k_z^2} \quad (9)$$

получено следующее выражение для тензора тока фотонного увлечения ($\vec{e} \parallel c_3$)

$$\sigma_{yyzx}^{(l)} = (-1)^l \frac{16\pi eI}{\hbar \omega} K' \frac{\delta k_B T \Delta_2 \hbar \omega g \tau_{lk_0} \hbar}{m_0 \beta_v^2 \left[(\hbar \omega)^2 - 4 \Delta_2^2 \right]}, \quad (10)$$

Здесь $A_{\parallel} = 0.363 \times 10^{-14} \text{ eV} \cdot \text{cm}^2$, $A_{\perp} = 0.326 \times 10^{-14} \text{ eV} \cdot \text{cm}^2$, $\beta_v^2 = 0.6 \times 10^{-15} \text{ eV}^2 \cdot \text{cm}^2$, $\Delta_2 = 63.15 \times 10^{-3} \text{ eV}$, δ – зонный параметр полупроводника. В этом случае в спектре ветви $l=1$ (M'_1) появляется “горб” и его глубина

$$\varepsilon_{\min} = \Delta_2 - \left(\frac{\beta_v^2}{4A} + \frac{\Delta_2^2 A_{\parallel}}{\beta_v^2} \right) = -2.37 \text{ meV}, \quad \text{соответствующий ей волновой вектор}$$

$$k_{z,\min} = \pm \frac{1}{\beta_v} \sqrt{\frac{\beta_v^4}{4A_{\parallel}^2} - \Delta_2^2} = \pm 2.16 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-1}.$$

Из (10) видно, что вклад в ток фотонного увлечения, возникающий за счет учета g -фактора дырок, увеличивается с ростом температуры. Расчеты показывают, что теоретическое максимальное значение в спектре тока фотонного увлечения в Te , освещенного CO_2 лазером с длиной волны $\lambda = 10,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ при комнатной температуре, в 1,2 раза меньше экспериментального, где для дырок выбран $g \approx 5$. Такая разность между теоретическим и экспериментальными результатами может уменьшаться при учете анизотропии эффективной массы и g -фактора дырок. С микроскопической точки зрения в области частот $\hbar\omega < \Theta < 2\Delta$ спектральная зависимость сдвигового циркулярного поперечного (относительно главной оси симметрии) тока фотонного увлечения определяется энергетической зависимостью функции распределения и времени релаксации дырок по импульсу. Такой фототок возникает из-за одноосной симметрии теллура, т.е. за счет наличия анизотропии, определяемой поперечной и продольной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_{\perp}, \varepsilon_{\parallel}$.

В спектральной зависимости сдвигового тока фотонного увлечения в области длины волн, удовлетворяющей условию $\lambda \ll \hbar c / (k_B T)$, наблюдается асимптотическая зависимость типа $j_y^{(PDE, circ)} \propto 1/\lambda$, а в области длины волн $\lambda \gg \hbar c / (k_B T)$ — $j_y^{(PDE, circ)} \propto \lambda^3$. Также определена степенная сингулярность (своеобразность): типа $(\hbar\omega - 2\Delta_2)^{-n}$ в спектральной зависимости тока увлечения, и она объясняется наличием горба в энергетическом спектре дырок, т.е. различием плотности состояний в направлении по главной оси симметрии и в перпендикулярном к ней направлении. Например, $n = 1/2$ для однофотонного тока увлечения, связанного с g -фактором дырок. В результате сингулярность, обусловленная оптическими переходами внутри одной ветви зоны, будет в $\sim \hbar / (|2\Delta - \hbar\omega| \tau)$ раза больше, чем сингулярность, обусловленная оптическими переходами между ветвями зоны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе теоретического исследования размерного квантования и поляризационных оптических и фотовольтаических эффектов в полупроводниках с горбообразной зоной сделаны следующие выводы.

1. Установлено, что условие наблюдения степенной своеобразности (сингулярности) в спектральной зависимости однофотонного поглощения зависит от зонной структуры полупроводника и от направления распространения света относительно главной симметрии кристалла.
2. Определено условие возникновения локализованного состояния электронов и рассчитана их энергия локализации, определяемая с помощью двух

различных трансцендентных уравнений, вид которых зависит от надбарьерного и подбарьерного перехода электронов.

3. Установлено, что амплитуда и частота пространственной осцилляции коэффициентов отражения и перехода в асимметричной трехслойной структуре зависит от левой и правой высоты потенциального барьера, а также от эффективных масс электронов, находящихся в соседних слоях.
4. Обнаружена зависимость поглощения света от направления его распространения относительно главной оси и классифицированы соответствующие оптические переходы, рассчитан корень квадратной сингулярности в спектральной зависимости коэффициента поглощения света, распространяющегося по главной оси симметрии.
5. Показано, что размерно-квантованный энергетический спектр электронов в *n-GaP* состоит из набора взаимно непересекающихся энергетических уровней в приближении анизотропной эффективной массы, а в приближении изотропной эффективной массы – из взаимно пересекающихся энергетических уровней.
6. Определены вклад в ток фотонного увлечения, зависящий от *g*-фактора дырок в *p-Te*, и степенная сингулярность в спектральной зависимости тока. Показано, что эта своеобразность в $\sim \hbar / (|2\Delta - \hbar\omega|\tau)$ раза больше в оптических переходах, происходящих в одной ветви, чем в межподзонных оптических переходах, где τ – время релаксации по импульсу дырок.

**SCIENTIFIC COUNCIL No.PhD.30.08.2018.FM/T. 01.12 ON
AWARD OF THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY AT THE
SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE OF SEMICONDUCTORS
PHYSICS AND MICROELECTRONICS UNDER
THE NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN**

KOKAND STATE PEDAGOGICAL INSTITUTE

MAMADALIEVA NARGIZAKHON ZOKIRJON KIZI

**THEORETICAL RESEARCH OF DIMENSIONAL QUANTIZATION AND
POLARIZATION-OPTICAL PHENOMENA IN SEMICONDUCTORS
WITH THE CAMEL'S BACK ZONE**

01.04.10 – Physics of semiconductors

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

Tashkent – 2019

The theme of the doctoral (PhD) dissertation was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under No.B2018.4.PhD/FM297.

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at Kokand State Pedagogical Institute.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at www.ispm.uz and on the website of “ZiyoNet” Information and Educational Portal at www.ziynet.uz.

Scientific supervisor:

Rasulov Rustam Yavkachovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Official opponents:

Dadamirzaev Mukhammadjon Gulomkodiurovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor

Ayukhanov Rashid Akhmetovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Leading organization:

Tashkent State Technical University

The defense of the doctoral dissertation will be held on “___” _____ 2019, at _____ at the meeting of the Scientific Council No. PhD.30.08.2018.FM/T.01.12 at the Scientific Research Institute of Physics of Semiconductors and Microelectronics under the National University of Uzbekistan (Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Tel. (+99871) 248-79-94, fax: (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz, Conference Hall of the SRIPSM under the NUU).

The doctoral dissertation can be looked through in the ICT Implementation Unit (registered under No.____). Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Tel.: (+99871) 248-79-59, e-mail: info@ispm.uz.

The abstract of the dissertation was distributed on “___” _____ 2019.
(Registry record No. _____ dated “___” _____ 2019)

Sh.B. Utamuradova

Chairman of the Scientific Council
on Award of Scientific Degrees,
Doctor of Physical and Mathematical
Sciences, Professor

S.S. Nasriddinov

Scientific Secretary of the Scientific Council
on Award of Scientific Degrees, Doctor of
Technical Sciences, Assistant Professor

A.T. Mamadalimov

Chairman of the Scientific Seminar of the
Scientific Council on Award of Scientific
Degrees, Doctor of Physical and Mathematical
Sciences, Academician

INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

The aim of research work is a quantum-mechanical identification of localized states for two-dimensional electrons and the mechanisms of the optical effect, as well as the photon drag effect characterized by optical transitions occurring between subbands in a semiconductor with a camel's back band structure.

The objects of research work are the semiconductors of tetrahedral symmetry with a camel's back zone and a system of two-dimensional current carriers.

Scientific novelty of the research consists in the following:

the localized state of electrons was calculated in an asymmetric structure consisting of periodically located potential barriers and wells; it was proved that the transfer matrices of current carriers in layers of such a structure are a non-unitary matrix;

the three-photon linear-circular dichroism characterized by interband optical transitions was calculated;

the presence of a square root singularity of the absorption coefficient of polarized light was determined in a semiconductor with a camel's back zone, associated with the dependence of the direction of propagation of light;

it was theoretically proved that the transition of the spectral dependence of the coefficient of absorption of light through an extremum, which was experimentally observed in n-GaP, is associated with a camel's back zone;

using the quantum-mechanical method, the contribution of the g factor to the photon drag current in a semiconductor with a camel's back zone was calculated.

Implementation of the research results. Based on the obtained research results on the determination of the mechanisms of polarization-optical and dimensional-quantized phenomena in semiconductors with a camel's back zone, the following were presented:

the results on the calculation of the spectra of single- and multiphoton absorption of polarized light in a semiconductor with a camel's back zone were introduced into JSC "Foton" and JSC "Uzeltekhsanoat" (Certificate No.02-35 Uzeltekhsanoat of 7 March 2019). The application of scientific results has led to the creation of ultra-low-inertia arsenides of gallium photosensors, as well as optimization of the optical characteristics of semiconductor optoelectronic devices;

the results on the spectral dependence of the photon drag current in semiconductors with camel's back zones were used in the grant AYP (F) -2015/6 "The investigation of photoelectrical properties of the Photodiodes for 1-4 μm infrared region" for theoretical researches of the optical properties of semiconductor length photodiodes of waves 1-4 μm (Certificate of the University of Uludag (Turkey) - AYP (F) -2015/6 05-12 / 1025 of 2 February 2019). The use of scientific results made it possible to increase the operability of semiconductor photoconverters in the high-frequency region;

the calculations on localized states of electrons in a structure consisting of alternating potential wells and barriers were used in grant F2-OT-O-15494

“Quantum point dissipations and nanostructures, excitons, poles, bipolarons and motions, photocells, and optimization of the efficiency of other types of optoelectronic devices” for the theoretical analysis of optical transitions in quantum dots and nanostructures (Certificate No.89-03-670 of the Ministry of Higher and Secondary Specialized Education of the Republic of Uzbekistan of 15 February 2019). The use of scientific results allowed investigating the photon-kinetic properties of structures with heterojunctions grown on the basis of semiconductors with a complex zone;

the photon drag current calculations in semiconductors of cubic symmetry with a zone, one branch of which is a camel’s back, were used in grant No.10/2000 “Exciton-polariton luminescence of semiconductor crystals and quantum-size structures during photoexcitation and ion channeling” for studying spectral analysis of semiconductor crystals (Certificate No.89-03-670 of the Ministry of Higher and Secondary Specialized Education of the Republic of Uzbekistan of 15 February 2019). The use of scientific results made it possible to expand the field of luminescence studies observed in a semiconductor and in dimensional-quantized structures.

Publication of the research results. On the theme of the dissertation a total of 14 scientific works were published. Of these, 7 articles were published in the scientific journals recommended by the Supreme Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publishing the main scientific results of doctoral dissertations.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation was presented on 111 pages consisting of an introduction, four chapters, conclusions and a list of used literature.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (Часть I; Part I)

1. Rasulov V.R. Rasulov R.Ya., Eshboltaev I.M., Mamadalieva N.Z. A single-quantum shift photocurrent in piezosemiconductors // European Science Review. -Vienna. Austria. -2018. № 7-8. (July–August). P.286-288. ISSN 2310-5577 (№3, GIF =1.26).
2. Rasulov V.R. Rasulov R.Ya., Eshboltaev I.M., Ahmedov B., Mamadalieva N.Z. Investigation of dimensional quantization in a semiconductor with a complex zone by the perturbation theory method // European Science Review. -Vienna. Austria. -2018. № 9-10. (January–February). Pp.253-255. ISSN 2310-5577 (№3, GIF =1.26).
3. Расулов Р.Я., Расулов В.Р., Эшболтаев И., Мамадалиева Н. Поглощение линейно поляризованного излучения в размерно-квантованной яме. Узбекский физический журнал. 2018, Vol. 20, №3, С. 147–152 (01.00 00, №5).
4. Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Эшболтаев И., Мамадалиева М.З. Ток увлечения фотонами в теллуре дырочной проводимости. Узбекский физический журнал. 2018, Vol. 20, №6. С. 350–354 (01.00 00, №5).
5. Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Эшболтаев И., Носиров М., Мамадалиева М.З. Размерное квантование в *n-GaP*. Научно-технический журнал ФерПИ, 2018, Т. 22, №3, Фергана. С. 15–20 (05.00 00, №20).
6. Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Эшболтаев И., Ахмедов Б., Мамадалиева Н.З. Эффект размерного квантования в полупроводнике с горбообразной зоной. Научный вестник АндГУ, 2018, №3, Андижан, С. 19–22 (01.00.00 №13).
7. Расулов Р.Я., Мамадалиева Н., Ахмедов Б., Разиков Ж. К теории зонной структуры халькогенидов свинца. Научный вестник АндГУ, 2018, №4, Андижан, С. 18–21 (01.00.00 №13).

II бўлим (Часть II; Part II)

8. Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Эшболтаев И., Мамадалиева Н.З. Одноквантовый сдвиговый фототок в *n-GaP* / «Яримўтказгичлар физикасининг ва қайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантиришинг замонавий муаммолари» мавзули республика илмий-амалий анжумани материаллари. - Андижон. Ўзбекистон. 2018. 144-146 б.
9. Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Эшболтаев И., Мамадалиева Н.З. Ток увлечения фотонами в теллуре дырочной проводимости / «Яримўтказгичлар физикасининг ва қайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантиришинг замонавий муаммолари» мавзули

республика илмий-амалий анжумани материаллари. - Андижон. Ўзбекистон. 2018. 137-140 б.

10. Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Эшболтаев И., Мамадалиева Н.З. Однокантовый сдвиговый фототок в пьезополупроводниках / Наука России: Цели и задачи. // Сборник научных трудов, по материалам VIII международной научно-практической конференции 10 апреля 2018 г. – Екатеринбург. Россия. Изд. НИЦ «Л-Журнал». 2018, С. 25–27.
11. Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Эшболтаев И., Мамадалиева Н.З. Сдвиговый фототок в пьезополупроводниках / Общие вопросы мировой науки. Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. Часть 1. Амстердам. Изд. Л-Журнал. 2018, С. 10–12.
12. Rasulov V.R. Rasulov R.Ya., Eshboltaev I.M., Mamadalieva N.Z., Karimov I.N. Surface photoconductivity in a multivalley semiconductor. Материалы международной конференции «Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниковых микро - и наноструктурах». Фергана. Узбекистан. -2018. С.44-48.
13. Rasulov V.R. Rasulov R.Ya. Eshboltaev I.M., Ahmedov B., Mamadaliyeva N.Z. The dimensional quantization in a semiconductor with a complex zone. Collection of scientific papers on materials VIII International Scientific Conference. Montpellier -2018. С.4-7. doi: 10.18411/gdsn-25-12-2018-01. idsp: scienceconf-25-12-2018-01. Information about the published articles will be transferred in the Russian Science Citation Index (RISC).
14. Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Эшболтаев И., Мамадалиева Н.З. О сдвиговом фототоке в n-GaP. Сборник статей XXIII Международной научной конференции «Техноконгресс». Кемерово. 2018 г. С. 25–28. www.t-nauka.ru.