

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

ҚЎҚОН ДАВЛАТ ПЕДАГОГИКА ИНСТИТУТИ

ЭШБОЛТАЕВ ИҚБОЛ МАМИРЖОНОВИЧ

**УЧ ВА ИККИ ЎЛЧАМЛИ ЭЛЕКТРОНЛАР СИСТЕМАЛАРИДА КЎП
ФОТОНЛИ ЮТИЛИШ ВА СИЛЖИШЛИ ФОТОГАЛЬВАНИК
ЭФФЕКТЛАРНИНГ НАЗАРИЙ ТАДҚИҚИ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси автореферати мундарижаси

Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)

Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)

Эшболтаев Иқбол Мамиржонович

Уч ва икки ўлчамли электронлар системаларида кўп фотонли ютилиш ва
силжишли фотогальваник эффектларнинг назарий тадқиқи 3

Эшболтаев Иқбол Мамиржонович

Теоретические исследования многофотонного поглощения и сдвигового
фотогальванического эффекта в трех и двумерных электронных
системах 21

Eshboltaev Iqbol Mamirjonovich

Theoretical researches of multiphoton absorption and shift photovoltaic effect
in three and two-dimensional electron systems 39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works..... 43

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

ҚЎҚОН ДАВЛАТ ПЕДАГОГИКА ИНСТИТУТИ

ЭШБОЛТАЕВ ИҚБОЛ МАМИРЖОНОВИЧ

**УЧ ВА ИККИ ЎЛЧАМЛИ ЭЛЕКТРОНЛАР СИСТЕМАЛАРИДА КЎП
ФОТОНЛИ ЮТИЛИШ ВА СИЛЖИШЛИ ФОТОГАЛЬВАНИК
ЭФФЕКТЛАРНИНГ НАЗАРИЙ ТАДҚИҚИ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Докторлик диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2018.2.PhD/FM202 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Муқимий номидаги Қўқон Давлат педагогика институтида бажарилган.

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

Илмий раҳбар	Расулов Рустам Явқачович физика-математика фанлари доктори, профессор
Расмий оппонентлар:	Мамадалимов Абдугафур Тешабаевич физика-математика фанлари доктори, академик Дадамирзаев Муҳаммаджон Гуломқодирович физика-математика фанлари доктори
Етакчи ташкилот:	Тошкент ахборот технологиялар университети

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

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

Диссертация автореферати 2018 йил «__» _____ да тарқатилди.
(2018 йил «__» _____ даги ____ рақамли реестр баённомаси.)

С.З. Зайнабидинов

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

А.О. Курбанов

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

И.Н. Каримов

Илмий даража берувчи Илмий кенгаш ҳузуридаги илмий семинар раиси, ф.-м.ф.д.

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда жадал суратда ривожланиб бораётган оптоэлектроника, нанофизика ва фотоника соҳаларида уч ва икки ўлчамли электронли яримўтказгичли структуралар катта ўринга эга бўлиб бормоқда. Бундай структураларда кўп фотонли оптик ва фотогальваник эффектларни ўрганиш соҳасида паст инерцияли фотокучайтиргичлар, нано- ва оптоэлектрон қурилмалар яратилишига олиб келмоқда. Шу сабабдан кўп фотонли оптик ва фотогальваник эффектларда бир вақтнинг ўзида икки фотоннинг ютилиши масалаларини ўрганиш яримўтказгичлар физикаси соҳасида бугунги куннинг муҳим вазифаларидан бири бўлиб келмоқда.

Бугунги кунда жаҳонда ўлчамли квантлашган ва ҳажмий яримўтказгичларда содир бўлувчи физик жараёнларни чуқур тадқиқ қилиш борасида, жумладан, қуйидаги йўналишлардаги илмий изланишларни амалга ошириш муҳим вазифалардан ҳисобланади: ёруғликнинг қутбланиш ҳолатига боғлиқ бўлган оптик ва фотогальваник эффектларнинг механизмларини аниқлаш; қутбий фотогальваник эффектига тегишли силжишли ва баллистик механизмларни бир ва икки фотонли ютилишларга нисбатан таққослаш; ёруғликнинг бир ва кўп фотонли ютилиш самараларини яримўтказгичнинг ҳақиқий зонавий тузилишини эътиборга олган ҳолда аниқлаш; мураккаб зонали яримўтказгичларда кўп фотонли ютилиш чизиқли циркуляр дихроизмнинг хоссаларини аниқлаш.

Мамлакатимизда илм-фан соҳасидаги устувор йўналишларда, жумладан, «Қайта тикланувчи энергия манбаларидан фойдаланишни ривожлантириш»да ҳажмий ва паст ўлчамли яримўтказгичларда кечадиган оптик ва фотонли кинетик ҳодисаларни ўрганиш бўйича муҳим натижалар олинди. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясига кўра, илмий тадқиқот ва инновацион фаолиятини ривожлантириш, илмий ва инновацион ютуқларни амалиётга жорий этишнинг самарали механизмларини яратиш масалаларига, жумладан, микро-, нано- ва оптоэлектроника, фотоника каби соҳаларда қўлланиладиган кўп фотонли қутбий оптик ва фотогальваник эффектларни тадқиқ қилишга алоҳида эътибор қаратилган.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг фармонлари ва қарорлари, жумладан 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2017 йил 13 февралдаги ПҚ-2772-сон «2017-2021 йилларда электротехника саноатини бошқаришни янада такомиллаштириш, жадал ривожлантириш ва диверсификация қилиш чора-тадбирлари 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 илмий тадқиқотларга тегишли меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга

оширишга мазкур диссертациядаги илмий натижалар муайян даражада хизмат қилади.

Шундай қилиб, уч ва икки ўлчамли ток ташувчилар тизимида кечадиган кутбий фотогальваник эффект ҳамда кўп фотонли ютилишни ҳажмий ва паст ўлчамли яримўтказгичларда тадқиқ қилиш долзарбдир ҳамда **илмий-амалий истиқболга** эгадир.

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

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Фотонлар иштирок этадиган ходисаларнинг уч ўлчамли ток ташувчилар тизимларидаги, яъни ҳажмий яримўтказгичлардаги тадқиқоти қатор ривожланган мамлакатларнинг илмий тадқиқот институтларида 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 Россия ФАга қаршли Физика институти (Москва), яримўтказгичлар физикаси институтлари (Новосибирск, Россия; Киев, Украина)да бундай тур илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда.

А.М.Гласс (АҚШ), фон Балтц (Германия) ва В.М.Фридкин (Москва, Россия)лар томонидан бир жинсли сегнетоэлектрикларда аномал фотоэюк тажрибада бир неча минутдан бир соатгача кузатилган. Шунингдек, К.Н.Herman (Германия) ва А.F.Gibson (АҚШ) *GaP*да, G.Ribakovs, A.A.Gudjian (Канада) ва А.А.Рогачев (Санкт-Петербург, Россия) теллурда, J.M.Doviak, S.Kothari (АҚШ) ва И.Д.Ярошецкий (Санкт-Петербург, Россия), С.Д.Ганичев (Дортмунд, Германия) *p-GaAs*да кутбий фотогальваник эффект ҳажмий яримўтказгичларда, С.Д.Ганичев (Дортмунд, Германия), В.А.Шалыгин (Санкт-Петербург, Россия) томонидан спингальваник эффект деб номланувчи янги ҳодиса яримўтказгичли наноструктураларда кузатилган.

Россия ФА академиги Ю.В.Копаев (Москва, ФИ РФА), профессорлар Г.Е.Пикус, Н.С.Аверкиев, Л.Е.Голуб, С.А.Тарасенко, Россия ФА мухбир аъзолари Е.Л.Ивченко ва М.М.Глазов (Санкт-Петербург, Россия), профессорлар В.И.Белиничер, И.Д.Стурман (Новосибирск, Россия) раҳбарлигидаги бир гуруҳ россиялик олимлар томонидан уч, икки, бир ўлчамли яримўтказгичларда, топологик изоляторларда ҳамда графенда чизикли ва циркуляр фотогальваник эффектларнинг қатор механизмлари назарий ишлаб чиқилган.

Мамлакатимиз олимларидан Э.З.Имамов ва Р.Я.Расулов томонидан фотонли эргаштириш, айрим кутбий оптик ва фотогальваник эффектларнинг механизмлари яримўтказгичларда назарий ўрганилган.

Бу ҳолда қуйидагилар: а) *n-GaP* яримўтказгич ўтказувчанлик зонасининг ўзига хослиги, хусусан, зонага тегишли битта тармоқнинг ўрқачсимон тузилишининг бир ва икки фотонли силжишли фотогальваник эффект токига таъсири; б) мураккаб зонали яримўтказгичларда тўрт фотонли чизикли

циркуляр дихроизми; в) коваклар бир фотонли ўтишидаги когерентли тўйиниш эффектининг мураккаб валент зонали яримўтказгичларда тўрт фотонли ёруғлик ютилишининг чизиқли циркуляр дихроизмга таъсири; г) *n-GaP*даги силжишли фотогальваник эффект токига бир вақтда икки фотон ютилишининг улуши тадқиқ қилинмаган. Бундай илмий тадқиқотлар ушбу диссертацияда олиб борилган.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган олий таълим муассасасидаги илмий тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация иши Қўқон давлат педагогика институти илмий тадқиқотлар режаси доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади уч ўлчамли (ҳажмий яримўтказгич) ва икки ўлчамли электронлар тизими (потенциал ўрали структура)да оптик ҳодисаларнинг ва симметрия маркази бўлмаган яримўтказгичларда силжишли фотогальваник эффектнинг микроскопик механизмларини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

мураккаб зонали яримўтказгичларда тўрт фотонли ёруғлик ютилишининг чизиқли циркуляр дихроизм назариясини яратиш;

мураккаб зонали симметрия маркази бўлмаган яримўтказгичда кузатиладиган бир ва икки фотонли силжишли фотогальваник эффектнинг квант механикавий назариясини ишлаб чиқиш;

яримўтказгичларда бир ва икки фотонли ютилишда электронларнинг силжишига боғлиқ фототокнинг спектрал ва температуравий боғланишларининг математик ифодаларини аниқлаш;

яримўтказгичли ўлчамли квантлашган ўрадаги электронларнинг акустик фононларда сочилиши билан боғлиқ импульс релаксация вақтини ҳисоблаш;

олинган назарий ҳисоблашларни *n-GaP*га нисбатан кузатилган экспериментал натижалар билан солиштиришдан иборат.

Тадқиқотнинг объектлари мураккаб зонали тетраэдрик симметрияли *n-GaP* тур яримўтказгичлар ва икки ўлчамли электронли тизимлардан иборат.

Тадқиқотнинг предмети мураккаб зонали яримўтказгичда кечадиган тўрт фотонли чизиқли циркуляр дихроизм ҳодисаси ҳамда бир ва икки фотонли силжишли чизиқли фотогальваник эффектдан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқ қилинган масалаларни ечишда Шреденгер тенгламаси, қаттиқ жисмлар физикаси назариясида қўлланиладиган Фейнман-Келдиш графиклар техникаси, инвариантлар методи ва зичлик матрицаси учун қайд қилинган Нейман тенгламаси қўлланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

яримўтказгичли ўлчамли квантлашган ўрадаги электрон импульсининг релаксация вақти ҳажмий яримўтказгичлардаги электронлар импульсининг релаксация вақтидан миқдоран катта бўлиши аниқланган, паст ўлчамли электронлар тақсимот функциясини аниқлаш имконини берувчи кинетик тенглама ҳисобланган;

мураккаб зонали яримўтказгичларда фотогальваник эффектнинг икки фотон бир вақтда ютилишидаги силжишли механизми квант механикаси қонунларига кўра аниқланган;

*n-GaP*да бир фотонли силжишли фототокнинг частотага боғлиқлиги аниқланган ва фототокнинг назарий ҳисобланган спектрал боғланиши тажриба натижалари билан таққосланган;

*p-GaAs*да тўрт фотонли ютилиш чизиқли циркуляр дихроизмининг микроскопик назария асосида аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

силжишли фототокни ҳисоблаш усуллари қаттиқ жисмлар физикасидаги паст ўлчамли ток ташувчилар системасига тадбиқ этилган;

кутбий фотогальваник эффект бўйича олинган натижаларни қўллаш ҳисобига маълумотларни голографик ёзиш, сақлаш ва қайта ишлаш тизимлари, паст инерцияли фотоқабулқилгич ва оптоэлектрон қурилмаларнинг оптик хусусиятлари оптималлаштирилган;

ҳажмий ва паст ўлчамли яримўтказгичда кўп фотонли оптик ва фотогальваник эффектлар бўйича келгуси илмий тадқиқотлар стимуллаштирилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги олинган назарий натижалар экспериментал тасдиқларининг мавжудлиги, ҳисоблашларда қаттиқ жисмлар назарияси ва квант статистик физикасида қўлланиладиган ҳозирги замон ҳисоблаш методларидан фойдаланилганлиги билан таъминланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Диссертация натижаларининг илмий аҳамияти *n-GaP*да силжишли фотогальваник эффекти ҳамда мураккаб валент зонали яримўтказгичда тўрт фотонли чизиқли циркуляр дихроизми бўйича олинган натижалар тўғрисида янги маълумотлар беришда ўз ифодасини топган.

Ишнинг амалий аҳамияти яримўтказгич ва унинг ўлчамли квантлашган структураларида кечадиган фотонли кинетик ҳодисалар оптоэлектроника, фотоника ва наноэлектроникада қўллаш имконияти мавжудлигида, уч ва икки ўлчамли яримўтказгичларда ёруғлик кутбланишига боғлиқ кўп фотонли оптик ва фотогальваник эффектлар бўйича олиб бориладиган келгуси назарий ва экспериментал тадқиқотларга жорий этишда ўз ифодасини топган.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Уч ва икки ўлчамли электронлар системаларида кўп фотонли ютилиш ва силжишли фотогальваник эффектлар механизмларини аниқлаш асосида:

икки фотонли силжишли фототокнинг спектрал ва температуравий боғланиши «Кучли спин орбитал ўзаро таъсирли паст ўлчамли яримўтказгичларнинг электронли хоссалари» лойиҳасида яримўтказгичлардаги спин орбитал ўзаро таъсирли оптик ўтишларда фойдаланилган (Россия ФА А.Ф.Иоффе номидаги Физика-техника институтининг 2018 йил 15 мартдаги 11217-279х/211.5-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш мураккаб валент зонали яримўтказгичларда ясси ва циркуляр

кутбланган ёруғлик таъсирида оптик ўтишларни ҳамда спин орбитал кенгайишни ўрганишга имкон берган;

мураккаб валент зонали яримўтказгичларда тўрт фотонли ютилишнинг чизиқли циркуляр дихроизми натижалари 2014/1-рақамли «Investigation of the properties of photodiodes fabricated by coating a conductive polymer on silicon» лойиҳасида яримўтказгичли фотодиодларнинг паст инерцион хоссаларини ўрганишда фойдаланилган (Улудағ университети (Туркия) HDF(F) 2014/1-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш яримўтказгичли фотоўзгартиргичларнинг ишлаш тезлигини орттиришга имкон берган;

яримўтказгичли ўлчамли квантлашган потенциал ўрадаги электронларнинг акустик фононларда сочилиши натижалари Ф2-ОТ-О-15494 рақамли «Квант нуқтали гетеро- ва нанотузилмалардаги экситонларни, поляронларни, биполяронларни ва кўчиш ҳодисаларини тадқиқ этиш асосида нурлагичлар, фотоэлементлар ва бошқа турдаги оптоэлектрон асбобларнинг самарадорлигини яхшилаш» лойиҳасида квант нуқтали гетеро- ва нанотузилмалардаги оптик ҳодисаларда фойдаланилган (Фан ва технологиялар агентлигининг 2017 йил 21 ноябрдаги ФТА-02-11/1149-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш яримўтказгичли гетероўтишларда экситонли, поляронли ва кинетик ҳодисалар улушларини таққослаш имконини берган;

мураккаб ўтказувчанлик зонали тетраэдр симметрияли яримўтказгичларда бир фотонли силжишли фототокнинг тадқиқотлари натижалари Ф2 -21-рақамли «Яримўтказгич-диэлектрик чегарасидаги сирт ҳолатлар зичлигини аниқлашнинг математик моделлаштириш» лойиҳасида икки ўлчамли электронларнинг сирт олди соҳаларидаги ҳолатларини ўрганишда фойдаланилган (Фан ва технологиялар агентлигининг 2017 йил 21 ноябрдаги ФТА-02-11/1149-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш яримўтказгич-диэлектрик контактлар соҳасидаги сирт ҳолатларини аниқлашга имкон 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 16та илмий ишда нашр этилган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 5та мақола чоп этилган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертация матни 118 бетда келтирилган.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Мазкур диссертация *n-GaP*да ёруғликнинг интенсивлигига чизиқли ёки квадратик боғланган фотогальваник эффектнинг электрон-фотон ўзаро таъсир ҳар бир актида электронларнинг реал фазодаги силжишига боғлиқ

бўлган микроскопик механизмларни тадқиқ қилишга бағишланган. Шунингдек, мураккаб валент зонали яримўтказгичда тўрт фотонли ёруғлик ютилишининг чизиқли циркуляр дихроизми тадқиқ этилган.

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

«Яримўтказгичли гетероструктуралар ва уларда кутбий фотогальваник эффектлар» номли биринчи бобда фотогальваник самаралар тадқиқи, сўнгра ассимметриявий яримўтказгичли структураларда электронларнинг тўлқин функциялари бўйича адабиётларнинг шарҳлари келтирилган. Кўп қатламли яримўтказгичли структураларда электронлар тўлқин функцияларининг координата инверсиясига нисбатан симметриявий ва носимметриявий ташкил этувчилари, Шунингдек, спин-орбитал ўзаро таъсир эътиборга олинган ҳолда содир бўлувчи циркуляр фотогальваник эффект назарияси бўйича ҳам шарҳлар олиб борилган. Бу ҳолда электрон ва ковакларнинг ўлчамли квантлашган зоналариаро оптикавий ўтишлари эътиборга олинган, бундай ҳолда фототок миқдори ва йўналиши спин-орбитал ўзаро таъсирнинг ҳажмий, структуравий ва интерфейс инверсияли ассимметрияларга боғлиқлиги таҳлил қилинган. Бироқ бу бобда таҳлил қилинган ишларда *n-GaP*даги бир ва икки фотонли силжишли фототокка яримўтказгич зонаси ўзига хослигининг таъсири, ҳамда мураккаб зонали яримўтказгичларда ёруғликнинг тўрт фотонли ютилишига чизиқли циркуляр дихроизмига ковакларнинг бир фотонли ўтишидаги когерентли тўйиниш эффектининг таъсири назарий тадқиқ этилмаган.

«Икки ўлчамли электронли системаларда айрим фотонли кинетик ҳодисалар» номли иккинчи бобда потенциал тўсиқ ва потенциал ўралардан ташкил топган ва симметрия маркази бўлмаган яримўтказгичлардан ўстирилган структураларда электронлар импульсининг релаксация вақти ҳисобланган. Икки ўлчамли ($2D$) электрон импульсининг релаксация вақти учун

$$\frac{1}{\tau_{2D}^{(n'n)}} = \frac{2\pi}{\hbar} |M_D|^2 g^{(2D)} \Phi_{\vec{k}'_\perp, \vec{k}_\perp}^{(n',n)}(+, q_z)$$
 муносабат аниқланган. Бу ерда $g^{(2D)} = m^*/(2\pi\hbar^2)$ -икки ўлчамли электронларнинг ҳолатлар зичлиги, m^* -

уларнинг эффектив массаси, $\Phi_{\vec{k}'_\perp, \vec{k}_\perp}^{(n',n)}(\pm) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left| \gamma_{\vec{k}'_\perp, \vec{k}_\perp}^{(n',n)}(\pm) \right|^2 \frac{dq_z}{2\pi}$, q_z -фонон тўлқин векторининг z ташкил этувчиси, $n, n' = 1, 2, 3, \dots$ -ўлчамли квантлашган ҳолатларнинг тартиб рақами. Охирги функциянинг қатор ҳоллар учун графиги

1-расмда келтирилган. 1-расмдан кўриняптики, акустик фононлар иштирокидаги электронлар ўтишларининг матрицавий элементлари q_z фазода осцилляциланади. Бу ерда $n' = n = 1$ ва $n' = n = 2$ ҳолларда натижалар бир хил бўлади:

$$\Phi_{\vec{k}'_1, \vec{k}_1}^{(n', n)}(\pm) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left| Y_{\vec{k}'_1, \vec{k}_1}^{(n', n)}(\pm) \right|^2 \frac{dq_z}{2\pi} = \frac{3}{2 \cdot a}. \quad (1)$$

Бу ҳолда бир хил жуфтликли ўлчамли квантлашган ҳолатлараро ўтишларда икки ўлчамли ($2D$) электронлар импульсининг релаксация вақти ўра қалинлигининг камайиши билан орта боради.

Икки ($2D$) ва уч ($3D$) ўлчамли электронлар импульслари релаксация вақтларининг нисбати қуйидаги муносабат билан аниқланган

$$\frac{\tau_{2D}^{(2,2)}}{\tau_{3D}} = \frac{\tau_{2D}^{(1,1)}}{\tau_{3D}} = \frac{g_{2D}^{(1,1)}}{g_{3D}} = \frac{2ka}{3\pi}. \quad (2)$$

бу ерда g_{3D} – кристаллдаги электронларнинг ҳолатлар зичлиги, k – электронларнинг энергия сақланиш қонунидан аниқланган ва \vec{q} векторнинг йўналишига нисбатан ўрталаштирилган тўлқин вектори¹.

(2)дан структуранинг тавсифий катталикларини, масалан, потенциал тўсиқ ва потенциал ўра қалинлигини, улардаги электронлар эффектив массаларини танлаш билан электронлар импульсининг релаксация вақтини назорат қилиш мумкинлиги келиб чиқади. Таъкидлаймизки, g_{2D} ва k катталикларнинг ўлчамли квантлашиш ҳолатлари тартиб рақамига боғлиқлигига эътибор қаратмадик. Агар бу ҳол эътиборга олинса, у ҳолда $\tau_{2D}^{(n', n)}$ га қўшимча улуш ҳосил бўлади ва у алоҳида тадқиқот олиб боришни талаб қилади. Ҳисоблашларда электронлар тўлқин функцияларининг координата инверсиясига нисбатан симметриявий ва носимметриявий ташкил этувчиларига эътибор қаратилган.

Шунингдек, мураккаб валент зонали яримўтказгичли кўп қатламли структураларда кечадиган кинетик ҳодисалар катталикларини ҳисоблашда зарур бўладиган номувозанатдаги $F_{\vec{l}\vec{k}}^{(n)}$ тақсимот функцияси учун кинетик тенглама

$$\begin{aligned} \vec{v}_l \frac{\ddot{a}F_{\vec{l}\vec{k}}^{(n)}}{\ddot{a}\vec{r}} + \left(e\vec{\varepsilon} + \frac{e}{c} \left(\vec{v}_l^{(n)} \times \vec{H} \right) \right) \frac{\ddot{a}F_{\vec{l}\vec{k}}^{(n)}}{\ddot{a}\vec{p}} = \\ = -\frac{1}{(2\pi)^2} \sum_{\substack{l'=1,2 \\ n'}} \left[W_{n'l'\vec{k}', \vec{l}\vec{k}} F_{\vec{l}\vec{k}}^{(n)} \left(1 - F_{l'\vec{k}'}^{(n')} \right) - W'_{nl\vec{k}, n'l'\vec{k}'} F_{l'\vec{k}'}^{(n')} \left(1 - F_{\vec{l}\vec{k}}^{(n)} \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

Тақсимот функциясини икки ташкил этувчидан иборат деб қаралса, яъни

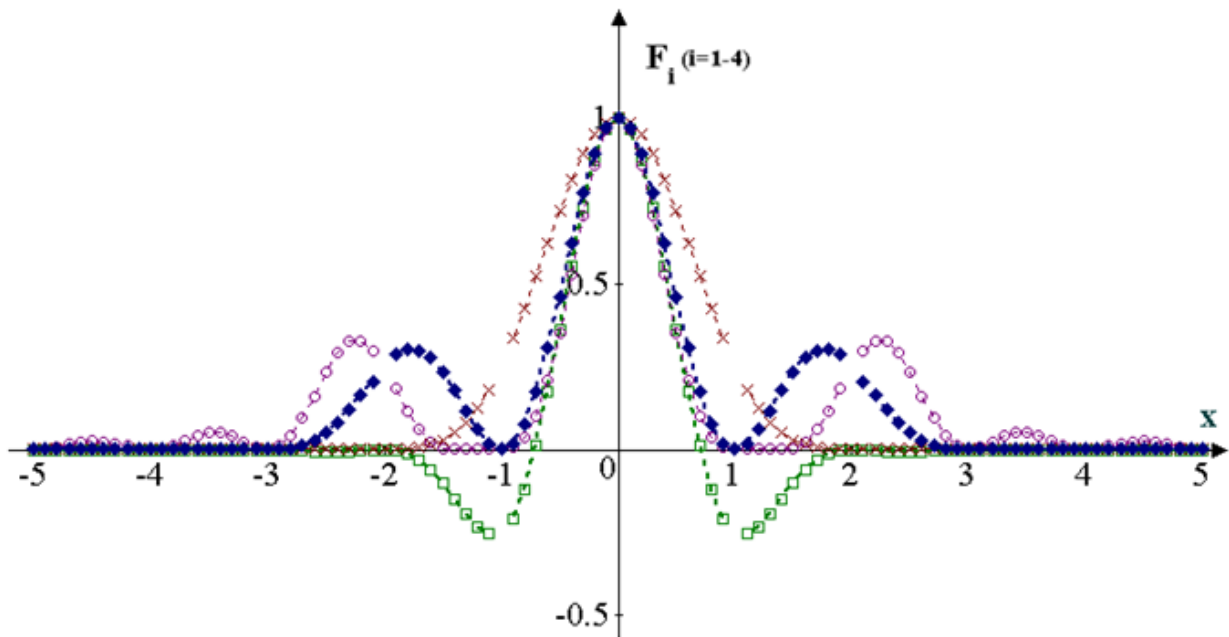
$$F_{\vec{l}\vec{k}}^{(n)} = f_{\vec{l}\vec{k}}^{(n)} + \Delta f_{\vec{l}\vec{k}}^{(n)} \quad (4)$$

¹ Умуман олганда, бу векторнинг қиймати ток ташувчилар охириги ва бошланғич ҳолатларининг тартиб рақамига боғлиқ бўлиши керак.

у ҳолда $f_{lk}^{(n)}$ ни тусланмаган яримўтказгич учун Больцман тақсимои каби танлаш мумкин, яъни $f_{lk}^{(n)} = \exp\left[\frac{E_p^{(n)} - E_{nk}^{(n)}}{k_B T}\right] \Delta f_{lk}^{(n)}$ – номувозанатдаги тақсимои функциясига улуш бўлади. Бу ерда $f_{lk}^{(n)}$ -ковакларнинг $E_{lk}^{(n)}$ энергиясига боғлиқ бўлган мувозанатдаги тақсимои функцияси. Натижада (4) ва (3) муносабатлар эътиборга олинса ва биринчи ҳад билан чегараланилса, у ҳолда

$$-\frac{ef_{lk'}^{(n)}}{k_B T} \left(\vec{\varepsilon} \vec{v}_{ek_{\perp}}^{(n)} \right) + \frac{e}{c} \left(\left[\vec{v}_{lk_{\perp}}^{(n)} \times \vec{H} \right], \right) \ddot{a} \left(\Delta f_{lk_{\perp}}^{(n)} \right) =$$

$$-\frac{1}{(2\pi)^3} \sum_{n', l'=1,2} \left[f_{lk_{\perp}}^{(n)} \int W_{n'l'k_{\perp}} \left(1 - f_{l'k_{\perp}}^{(n')} \right) d^3 \vec{k}'_{\perp} - \left(1 - f_{lk_{\perp}}^{(n)} \right) \int W_{nlk'_{\perp}, n'l'k'_{\perp}} f_{l'k'_{\perp}}^{(n')} d^3 \vec{k}'_{\perp} \right]. \quad (5)$$



1-расм. F_i ($i=1 \div 4$) функциянинг x га боғланиш графиклари, бу ерда \times - $F_1(x; n' = n = 1)$, \blacksquare - $F_2(x; n' = n = 1)$, \blacksquare - $F_3(x; n' = n = 1)$, \bullet - $F_4(x; n' = n = 1)$

(5)дан кўриняптики, кристалл бир жинслигини бузувчи (масалан, фонон, киришма)ларда сочилаётган коваклар тақсимои функциясининг ўзгариши иккита ҳад орқали аниқланади. Уларнинг бири ковакларнинг (n, l, \vec{k}_{\perp}) ҳолатдан чиқиб кетишини, иккинчиси эса дастлабки ҳолатга келишини тавсифлайди. Бу ҳолда l ва l' ларнинг бир хил қийматли ҳолатларга ўтишлар бир зона ичидаги ўтишларни, l ва l' ларнинг ҳар хил қийматларига мос келган ўтишлар зона(зона тармоқ)лараро ўтишларни англатади. Табиийки, бир зона ичидаги тўғри ўтишлар ($l = l'$) ҳар хил тартиб рақамли ($n \neq n'$) ўлчамли квантлашган ҳолатлараро ўтишларга олиб келади.

Шунингдек, яримўтказгич валент зонасидаги ўлчамли квантлашиш ҳолатлар ва ўлчамли квантлашиш туфайли индуцирланган ҳолатлар ўртасидаги кечадиган оптик ўтишларнинг танлаш қоидаи таҳлил қилинган.

Бобнинг охирида натижаларнинг асосий хулосалари келтирилган.

«n-GaPда бир ва икки фотонли силжишли чизикли фотогальваник эффект» мавзули учинчи бобда ёруғликнинг кутбланиш даражасига боғлиқ бўлган оптик ва фотогальваник эффектлар ҳам назарий, ҳам амалий аспектда бугунги кунда ҳам ўз долзарблигини йўқотмаган ва айти пайтда интенсив тадқиқ олиб борилаётган фотоэлектрик ҳодисалар туркумига кириши қайд қилинган. Бир жинсли намуна бир жинсли стационар ёритилганида фототокнинг содир бўлиши фотонлар импульсининг электронларга узатилиши билан боғлиқ бўлган ҳодиса фотонли эргаштириш эффекти деб номланади. Бу эффект нафақат зоналараро, балки бир зона ичида кечадиган оптик ўтишлар билан боғлиқ ҳолда кузатилиши мумкин. Бу эффектдан фарқли ўларок, бир жинсли намуна бир жинсли стационар ёритилганида фотоннинг импульсига боғлиқ бўлмаган, бироқ ёруғликнинг кутбланиш даражасига боғлиқ бўлган эффектлар ҳам экспериментда кузатилган. Улар чизикли ва циркуляр фотогальваник эффект деб номланади. Бу эффектларнинг икки хил тури мавжуд бўлиб, уларнинг бири баллистик, иккинчиси эса силжишли механизмидир. Бу бобда силжишли чизикли фотогальваник эффекти хусусида олган тадқиқот натижалари қайд қилинган.

Шунингдек, ўркачсимон яримўтказгичларнинг зонавий тузилиш таҳлиллари бажарилган ҳамда *n-GaP*да чизикли бир фотонли кутбланган ёруғлик ютилиши спектрал ва температуравий боғланиши

$$K(\omega, T) = K_{\parallel}(\omega, T) + 2K_{\perp}(\omega, T) \quad (6)$$

кўринишда ҳисобланган. Бу ерда

$$K_{\perp}(\omega, T) = \frac{1}{8} \frac{e^2}{c\hbar} \frac{1}{n_{\omega}} \left(\frac{k_B T}{B} \right)^2 \frac{D^2}{P^2} \frac{\Delta}{\hbar\omega} \exp\left(\frac{E_F}{k_B T}\right) \exp\left(\frac{\hbar\omega - 2Ak_{z0}^2}{k_B T}\right) \quad (7)$$

$$K_{\parallel}(\omega, T) = \frac{1}{2} \frac{e^2}{c\hbar} \frac{1}{n_{\omega}} \frac{k_B T}{B} \exp\left(\frac{E_F}{k_B T}\right) \frac{1}{k_{z0}} \exp\left(\frac{\hbar\omega - 2Ak_{z0}^2}{k_B T}\right), \quad (8)$$

$k_{z0} = \frac{\Delta}{2P} \left[(\hbar\omega / \Delta)^2 - 1 \right]^{1/2}$, Δ - X_I ва X_3 тармоқларнинг X нуқтага тегишли орасидаги энергетик оралик, n_{ω} - ёруғликнинг синдириш коэффициенти, D , B , P - *n-GaP*нинг зонавий параметрлари. Бундан кўриняптики, $K_{\parallel}(\omega, T)$ нинг спектрал боғланиши k_{z0} га пропорционал бўлиб, $\hbar\omega \rightarrow \Delta$ шартда чексизликка интилувчи $\left[(\hbar\omega / \Delta)^2 - 1 \right]^{-1/2}$ муносабат орқали аниқланади. Бундай тур ўзига хослик ўтказувчанлик зонасидаги X_I пастки тармоқнинг «ўркачсимон» тузилиши билан изоҳланади.

Фотогальваник эффектни кристаллнинг симметриясига боғлиқ ҳолда кузатиш мумкин бўлган ҳолларни таҳлил қилиш имконини берувчи феноменологиявий назария қайд қилинган. Сўнгра *n-GaP*да кузатиладиган силжишли чизикли фотогальваник эффект бир фотонли механизмининг микдорий назарияси қурилган.

Барча энергетик воҳалар бўйича улушлари йиғиб олинган натижавий фототок қуйидагича ифодаланган

$$j_{\alpha}^{phot} = \dot{a} \frac{I}{\hbar \omega} K_{\omega} L_{shift} e_z (e_x \delta_{\alpha y} + e_y \delta_{\alpha x}) \quad (9)$$

бу ерда

$$L_{силье} = 3\eta_{\omega} DP^{-1}, \quad \eta_{\omega} = \Delta/\hbar\omega, \quad k_{\omega}^2 = [(\hbar\omega)^2 - \Delta^2](2P)^{-2},$$

N' -электронлар концентрацияси, K_{ω} -(6-8) ифодалар билан аниқланувчи ва ёруғликнинг ўтказувчанлик зонасига тегишли X_l^C ва X_3^C тармоқлариаро оптик ўтишга асосланиб ҳисобланган бир фотонли ютилиш коэффициенти.

Микдорий ҳисоблашлар шуни кўрсатадики, агар $A_3 - A_1 = \hbar^2(2m^*)^{-1}$, $m^* = m_1 m_2 (m_1 - m_2)^{-1}$, $m^* = 0,36m_0$, $\hbar\Omega = 51 \text{ мЭВ}$, $\Delta = 335 \text{ и } \hat{y}\hat{A}$, $Pa_0 = D$, $a_0 = 5,4 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ (a_0 – панжара доимийси), $T = 200 \text{ К}$, $\hbar\omega = 550 \text{ мЭВ}$ каби танланганида силжишли фототокдан

$$J_{ball}^{(z)} = -4e \frac{I}{\hbar\omega} K(\omega) (2e_x e_y) \frac{Q}{P} \alpha_{\phi} \Omega \frac{m_1 m_2}{(m_1 - m_2)} = \frac{m_2}{(m_1 - m_2)} \tau_{1p} \left[(\eta - 1)^{1/2} (N_q + 1) - \right. \\ \left. - (\eta - 1)^{1/2} \right] - \frac{m_1}{(m_1 - m_2)} \tau_{2p} \left[\left(\eta - \frac{m_1}{m_2} \right)^{1/2} (N_q + 1) - \left(\eta + \frac{m_2}{m_1} \right)^{1/2} N_q \right] \quad \text{баллистик}$$

фототок микдоран беш марта катта бўлади. Бу ерда $m_i^{-1} = 2A_i \hbar^{-2}$,

$$\eta = \frac{m_1 m_2}{(m_1 - m_2) m_0} (\hbar\omega - \Delta) / (\hbar\Omega), \quad \alpha_{\phi} = \frac{e^2}{\hbar \varepsilon^*} \left(\frac{m_1}{2\hbar\Omega} \right)^{1/2}, \quad \text{фрелих электрон-фонон}$$

ўзаро таъсир домийлиги, τ_{ik} – зонанинг l ($l = X_3, X_1$) тармоғидаги электрон импульсининг релаксация вақти.

2-расмда $n\text{-GaP}$ учун чизикли ФГЭ параметри $\tilde{D} = \chi/\sigma$, нинг спектрал боғланишига нисбатан назарий ҳисоблаш тажриба натижалари билан солиштирилган (σ' -намунанинг фотоўтказувчанлиги). Ҳисоблашларда $T=300 \text{ К}$, $\varepsilon_{\omega} = 9.09$, $n = 2.41 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $m^{*-1} = (m_{\parallel}^{-1} + 2 \cdot m_{\perp}^{-1})/3$, $\varepsilon_0 = 11.1$, $\rho = 4.12 / \text{см}^3$, $m_{\perp} = 0.25m_0$, $m_{\parallel} = 4.85 \cdot m_0$ катталиклар танланган, бу ерда m_{\perp} ва m_{\parallel} – электронларнинг (кристалл асосий симметрия ўқиға нисбатан танланган) кўндаланг ва бўйлама эффектив массалари. Адабиётлар таҳлилидан шу маълум бўлдики, $\tilde{\varepsilon} = 2m_{\parallel} P^2 \hbar^{-2} \Delta^{-1}$ катталик қатор қийматларга эга бўлиши мумкин. Хусусан, микдорий таҳлилда чизикли ФГЭ параметри $\tilde{D} = \chi/\sigma$, назарий спектрал боғланишининг тажрибага мос келадиган $\tilde{\varepsilon}$ нинг ($\tilde{\varepsilon} = 1, 2$) қиймати танланди. Шуни таъкидлаш ўринлики, $\tilde{\varepsilon}$ катталик 1,2дан катта қийматлар соҳасида $\tilde{D} = \chi/\sigma$, нинг спектрал боғланиши экспериментал графикка нисбатан ўнг томонга, аксинча эса чап тарафга силжийди.

Электрон-фонон ўзаро таъсирда асосий ролни узун тўлқин узунликли оптик фононлар ўйнаганлиги боис, баллистик фототок ифодасидаги электронлар импульсининг релаксация вақти фрелих ўзаро таъсирга

нисбатан ҳисобланди. Шунингдек, таъкидлаш жоизки, $m_{||}=2m_0$, $T=300$ К, $n=2.4 \cdot 10^{17}$ см⁻³ миқдорларда баллистик чизикли ФГЭнинг фотонли механизмидаги \tilde{D} катталиқ экспериментал натижадан 1.2 марта ортиқ, силжишли улуш эса 1.5 марта ортиқ бўлади.

Назарий ва экспериментал натижаларнинг бир-биридан бундай четлашишларини қуйидаги фактларга асосланиб тушунтириш мумкин: а) n - GaP зонасининг X_1 ва X_3 тармоғидаги электронлар кўндаланг ва бўйлама эффектив массаларининг миқдоран бир-биридан фарқли эканига эътибор қаратилмаган; б) фотоуйғотилган электронларнинг ҳар битта фонон билан таъсиридаги силжиши ва ассимметриявий сочилишига ҳам эътибор берилмаган. Охириги мулоҳазалардан кўриниб турибдики, бу борада тадқиқотни давом эттиришга ҳам асослар бор.

Шунингдек, n - GaP да силжишли фотогальваник эффект икки фотонли механизмининг назарияси қурилган. Ҳосил бўладиган фототок фотоуйғотилган ток ташувчиларнинг фотонлар таъсирида ҳар бир квантли актларда реал фазода нолдан фарқли масофага силжиши билан аниқланади. Бу ҳол эса қаралаётган намунада, хусусан, яримўтказгичли кристалларда симметрия марказининг бўлмаслигини талаб қилади.

Фотонларнинг якка-якка ютилишидан ташқари бир вақтда иккитадан ютилиши ҳам содир бўлади. Бундай ютилиш ҳам фототокка алоҳида улуш беради ва у n - GaP га нисбатан олиб борилган ҳисоблашлар шунини кўрсатадики, унинг улуши эътиборга оладиган даражада бўлади.

n - GaP да электронларнинг энергиявий воҳалар атрофида кечадиган икки фотонли тўғри оптик ўтишларига нисбатан силжишли ФГЭ токи учун энергетик спектрнинг сферик яқинлашишида

$$J_{shift,\alpha}^{(z)} = -e \frac{IK(\omega)}{\hbar\omega} R_\alpha \Im(\omega, T) \quad (10)$$

ёки

$$\chi_{shift} = -eQK(\omega)/(P\Delta) \Im(\omega, T) \quad (11)$$

ифодага эга бўламиз, бу ерда $\mu_- = m_{X_1} \cdot m_{X_3} / (m_{X_1} - m_{X_3})$ - электронларнинг келтирилган массаси, α -нозик структура параметри, $A_3 = 2A_1$ $I_0 = \frac{2n_0}{\pi\alpha} \mu_- \omega^3$,

$$\Im(\omega, T) = \frac{3}{5} \frac{I}{I_0} \frac{2\hbar\omega - \Delta}{\hbar\omega} \left(\frac{2\hbar\omega - \Delta}{\hbar\omega - \Delta} \right)^{3/2} e^{-\frac{2\hbar\omega}{k_B T}} \left(1 + e^{-\frac{\hbar\omega}{k_B T}} \right), \quad m_{X_1}(m_{X_3}) - X_1(X_3) \quad \text{тармоқдаги}$$

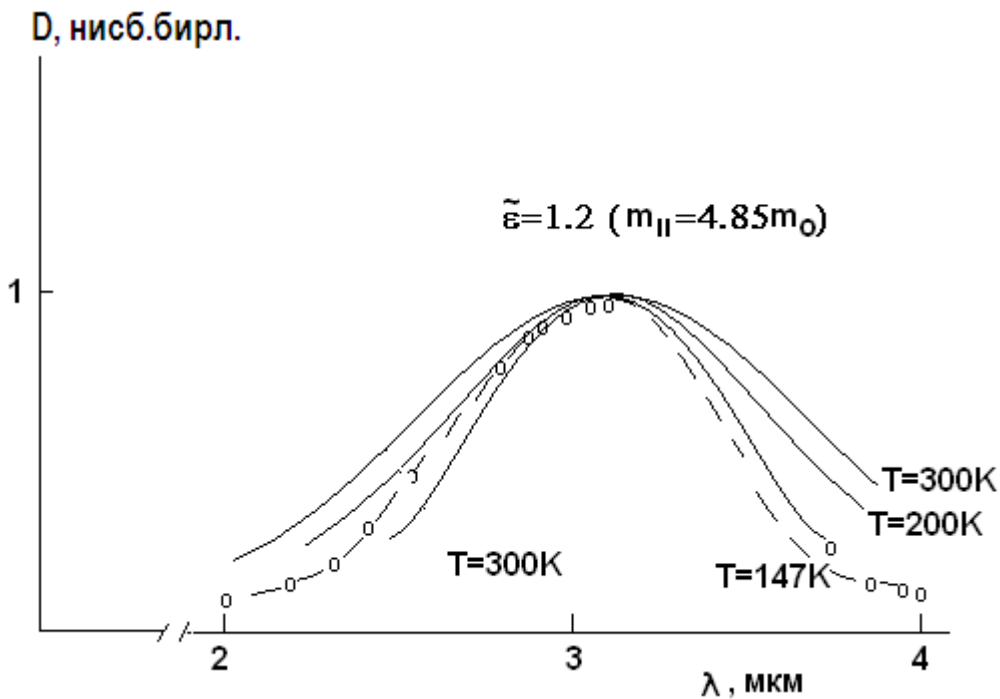
электронларнинг эффектив массаси, P, Q -зонавий параметрлар, χ_{shift} - чизикли

ФГЭ тензори, $R_\alpha = \frac{P}{Q} \frac{\hbar\omega}{\Delta} 2e_\beta e_\gamma \varepsilon_{\alpha\beta\gamma}$, $\varepsilon_{\alpha\beta\gamma}$ - Ливи-Чивит тензори ($\alpha, \beta, \gamma = x, y, z$).

Бобнинг охирида унга тегишли хулосалар қайд қилинган.

«Яримўтказгичда кўп фотонли ёруғлик ютилишининг чизикли циркуляр дихроизми» номли тўртинчи бобда ёруғлик тўрт фотонли ютилишининг чизикли циркуляр дихроизми, яъни ясси (чизикли) қутбланган

ёруғлик ютилганида фотоуйғотилган ток ташувчилар импульсига кўра тизгинлашиши, циркуляр (эллиптик) кутбланган ёруғлик ютилганида эса улар момент(спин)ларининг ориентацияланишига боғлиқ оптик ҳодисалар назарий тадқиқ қилинган. Хусусан, ясси кутбланган ёруғлик ютилиш эҳтимоллигининг циркуляр кутбланган ёруғлик ютилиш эҳтимоллигига нисбати билан аниқланадиган коэффициент, чизикли циркуляр дихроизм коэффициенти ҳисобланади; уларнинг феноменологиявий таҳлиллари бажарилган. Шунингдек, ёруғликнинг кўп (N) фотонли зоналараро ютилишида



2-расм. n -GaP учун чизикли ФГЭ параметри $\tilde{D} = \chi / \sigma'$ нинг матнда қайд қилинган катталикларга нисбатан назарий ва тажрибавий спектрал боғланишлари, бу ерда χ чизикли ФГЭ тензори ((11) формулага қ.), σ' -намунанинг фотоўтказувчанлиги; бутун чизиклар назарий, доирачалар тажриба натижалари.

чизикли циркуляр дихроизми қуйидагича сифатли таҳлил қилинган. Циркуляр кутбланган ёруғликда фотонлар $\hbar\vec{q}$ импульси йўналишига нисбатан аниқ бир бурчакли моментга (масалан, спинга) эга бўлади. Агар бурчакли моментнинг сақланиш қонуни циркуляр кутбланган ёруғлик учун эътиборга олинса, у ҳолда σ_+ кутбланишда у (+1) ва σ_- кутбланишда (−1) қиймат қабул қилади. Чизикли (ёки ясси) кутбланган ёруғликда фотон бурчакли моментининг \vec{q} тўлқин векторига нисбатан проекцияси мавжуд бўлмайди. Таъкидлаймизки, чизикли ва циркуляр кутбланган ёруғликнинг кўп квантли ютилишида системанинг (атом ёки кристаллдаги электронларнинг) оралик (виртуал) ҳолатлари ҳар хил бўлади. Хусусан, циркуляр кутбланган ёруғлик таъсирида m сонли фотонларнинг ютилишида ($m \langle N$) система нолдан фарқли ҳаракат миқдори моментига эга бўлади. Бу оптик ориентирланган система билан навбатдаги ($m+1$)-фотон ўзаро таъсирлашишини англатади. Шунингдек, ток ташувчилар ҳаракат миқдори

моменти проекцияларига нисбатан олинган танлаш қондасига кўра икки ёки кўп фотонли ютилиш ёруғликнинг кутбланиш ҳолатига боғлиқ бўлади. Таъкидлаймизки, юқорида қайд қилинган ҳолда яримўтказгич кристаллида ёруғлик ютилишининг муҳит анизотропиясига боғлиқлигини эътиборга олмадик. Демак, куб симметрияли кристалларда бош симметрия ўқи йўналиши бўйлаб тарқалаётган ёруғлик N фотонли ютилиш ($N \geq 2$)нинг чизикли циркуляр дихроизми ҳатто изотроп энергетик спектр яқинлашишида ҳам кузатилиши керак. Бироқ ёруғликнинг бир фотонли ютилиш коэффициенти унинг кутбланиш табиатига боғлиқ бўлмайди.

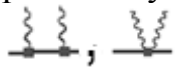

Ёруғликнинг ω_1 , ω_2 частотали ва \vec{e}_1 , \vec{e}_2 кутбланишли манбалари мавжуд ҳолда оптик ўтиш эҳтимоллиги учун

$$W_{cv}^{(N=2)}(\vec{e}_1, \vec{e}_2; \omega_1, \omega_2) \propto \left(\omega_1^{-2} + \omega_2^{-2} + \omega_1^{-1} \omega_2^{-1} |\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2^*|^2 \right)$$


муносабат келиб чиқади.

Бундан кўриняптики, оддий зонали яримўтказгичларда чизикли циркуляр дихроизми кузатилмайди, чунки бу ҳолда чизикли ва циркуляр кутбланишган икки ($\vec{e}_1 = \vec{e}_2$) электромагнит тўлқин дастасининг ютилиш эҳтимоллиги бир хил бўлади. Агар яримўтказгич зонавий тузилишидаги ўзига хосликларга, хусусан, зона тармоқлари бирортасининг «ўрқачсимон» бўлиши ёки коваклар эффектив массаси анизотропиясига эътибор қаратилса, у ҳолда ёруғлик ютилишининг чизикли циркуляр дихроизм параметри $\alpha_{cv}^{(N=2)} = \frac{W_{cv}^{(N=2, lin)}}{W_{cv}^{(N=2, circ)}}$

нолдан фарқли қиймат қабул қилиши мумкин.

Бизни p -GaAs яримўтказгич валент зоналариаро, яъни $|\pm 3/2\rangle \mapsto |\pm 1/2\rangle$ тур оптик ўтишлар қизиқтирганлиги боис келгусида N фотонли матрицавий элементнинг кўринишини қайд қиламиз. $\|M_{m,m'}^{(N)}\|$ ни ҳисоблашда кўп фотонли оптик ўтишларни тасвирловчи қуйидаги фейнман диаграммаларига эътибор қаратилган; $N=2$ учун , $N=3$ учун: , $N=4$

учун: , бу ерда 

диаграмма бир фотонли,  диаграмма эса бир вақтда икки фотон ютилишини тасвирлайди. Хусусан, икки фотонли матрицавий элементга $(\pm 3/2) \Rightarrow (\pm 1/2)$ тур оптик ўтишларнинг улуши $\sqrt{3} B m_0^2 e_z e'_\mp / \hbar^2$,

$(\pm 3/2) \Rightarrow (\mp 1/2)$ тур ўтишларнинг улуши эса $\frac{\sqrt{3}}{2} B m_0^2 (e'_\mp)^2 / \hbar^2$ муносабатлар

билан ифодаланади.

Ёруғликнинг кўп фотонли ютилиш коэффицентларининг температуравий боғланишларини солиштириш имконини берувчи N' ва N фотонли ютилишларга тегишли ютилиш коэффицентлари нисбати қуйидаги муносабат билан аниқланади:

$$\frac{K^{(N')}}{K^{(N)}} = \sqrt{\frac{N'^3}{N^3}} \Xi_{m'm}^{(N',N)} \exp \left[- (E_1^{(N')} - E_1^{(N)}) / k_B T \right], \quad (13)$$

бу ерда

$$\left(\Xi_{m'm}^{(N',N)} = \frac{\sum_{m'=\pm 1/2, m=\pm 3/2} \langle |M_{m'm}^{(N')}(\vec{k})|^2 \rangle}{\sum_{m'=\pm 1/2, m=\pm 3/2} \langle |M_{m'm}^{(N)}(\vec{k})|^2 \rangle} \right). \quad (14)$$

Хусусан, $\hbar\omega \gg k_B T$ яқинлашишда

$$\frac{K^{(4)}}{K^{(1)}} = 4 \times \exp(-3E_1^{(1)} / k_B T) \times \Xi_{m'm}^{(4,1)}, \quad (15)$$

бу ерда

$$\Xi_{m'm}^{(4,1)} = \frac{\sum_{m'=\pm 1/2, m=\pm 3/2} \langle |M_{m'm}^{(4)}(\vec{k})|^2 \rangle}{\sum_{m'=\pm 1/2, m=\pm 3/2} \langle |M_{m'm}^{(1)}(\vec{k})|^2 \rangle} = \frac{\varepsilon^3}{315} \left\{ \begin{array}{l} 12298 \text{ яссикутбланиш учун,} \\ 11008 \text{ циркуляркутбланиш учун,} \end{array} \right.$$

$K^{(1)}$ - ёруғликнинг тўйиниши эътиборга олинмаган ҳолда ҳисобланган бир фотонли ютилиш коэффиценти бўлиб, унинг температуравий боғланишидаги экстремал қиймати қуйидаги муносабатни қаноатлантиради:

$$T_{extr}^{(N=1)} = \frac{2}{3} \frac{m_{lh}}{m_{hh} - m_{lh}} \frac{\hbar\omega}{k_B}.$$

Масалан, $p\text{-GaAs}$ учун $\lambda = 10,6 \text{ } \mu\text{m}$ ёритилишда $T_{extr}^{(N=1)} = 194 \text{ K}$.

Эффектив гамильтонианнинг сферик яқинлашишида (ютилишда когерентли тўйинишини эътиборга олган ҳолда) ёруғликнинг кўп фотонли $K^{(N)}$ ($N = 2, 3, 4$) ютилиш коэффиценти қуйидаги ифода ёрдамида аниқланади

$$\delta K^{(N)} \propto \sum_{m'=\pm 1/2, m=\pm 3/2} \delta |M_{m'm}^{(N)}(\vec{k})|^2 = \sum_{m'=\pm 1/2, m=\pm 3/2} \frac{|M_{m'm}^{(N)}(\vec{k})|^2}{\sqrt{1 + 4 \frac{\alpha_\omega}{\hbar^2 \omega^2} |M_{m'm}^{(N)}(\vec{k})|^2}} - |M_{m'm}^{(N)}(\vec{k})|^2 \quad (16)$$

Келгуси ҳисоблашларни интенсивликнинг кўзғалишлар назариясини қаноатлантирадиган соҳаларига нисбатан олиб борамиз. У ҳолда (16) ифодадаги радикални $4 \frac{\alpha_\omega}{\hbar^2 \omega^2} |M_{m'm}^{(N)}(\vec{k})|^2$ катталиқка нисбатан қаторга ёйиб қуйидаги натижаларни оламиз:

$N=1$ ҳол учун қуйидаги муносабат ўринли бўлади

$$\begin{aligned} \delta |M_{m'm}^{(N=1)}(\vec{k})|^2 &= -2 \frac{\alpha_\omega}{\hbar^2 \omega^2} |M_{m'm}^{(1)}(\vec{k})|^4 + 6 \left(\frac{\alpha_\omega}{\hbar^2 \omega^2} \right)^2 |M_{m'm}^{(1)}(\vec{k})|^6 - \\ &- 20 \left(\frac{\alpha_\omega}{\hbar^2 \omega^2} \right)^3 |M_{m'm}^{(1)}(\vec{k})|^8 + \dots \end{aligned} \quad (17)$$

бу ерда ютилиш коэффиценти (ёки унинг чизиқли циркуляр дихроизмига) биринчи ҳад интенсивликка нисбатан чизиқли, иккинчи ҳад эса квадрат, учинчи ҳад куб даражали улушларни беради, яъни улар мос ҳолда икки, уч ва тўрт фотонли жараёнларга ўз улушларини беради. Оралиқ ҳисоблашларда фотоуйғотилган ковак тўлқин векторининг фазавий бурчакларига нисбатан ўрталаштириш олиб борилса, ҳамда $\beta_\omega = \alpha_\omega \left(\frac{eA_0}{\hbar\omega} \right)^2 \frac{B}{\hbar\omega}$ белгилашлар киритилса,

у ҳолда ютилиш коэффициентларга улуш берадиган катталиклар учун қуйидаги натижаларни оламиз

$$-\left\langle \frac{\alpha_{\omega}}{\hbar^2 \omega^2} \left(|M_{m'm}^{(1)}(\vec{k})|^2 \right)^2 \right\rangle = -\frac{1}{315} \alpha_{\omega} \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^4 B^2 \begin{cases} 1512 & \text{ясси кутбланиш учун,} \\ 1323 & \text{циркуляр кутбланиш учун,} \end{cases}$$

$$\left\langle 6 \left(\frac{\alpha_{\omega}}{\hbar^2 \omega^2} \right)^2 \left(|M_{m'm}^{(1)}(\vec{k})|^2 \right)^3 \right\rangle = \frac{1}{315} \alpha_{\omega} \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^4 B^2 \beta_{\omega} \begin{cases} 23328 & \text{ясси кутбланиш учун,} \\ 17496 & \text{циркуляр кутбланиш учун,} \end{cases}$$

$$-\left\langle 20 \left(\frac{\alpha_{\omega}}{\hbar^2 \omega^2} \right)^3 \left(|M_{m'm}^{(1)}(\vec{k})|^2 \right)^4 \right\rangle =$$

$$= -\frac{1}{315} \alpha_{\omega} \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^4 B^2 \beta_{\omega}^2 \begin{cases} 207360 & \text{ясси кутбланиш учун,} \\ 134460 & \text{циркуляр кутбланиш учун.} \end{cases}$$

Охирги муносабатлардан кўриняптики, (17) ифода ҳар бир натижавий ютилиш коэффициентига, яъни чизикли циркуляр дихроизмга ўз улушини беради. Хусусан, икки фотонли тўйиниш эффектининг натижавий ютилиш коэффициентига берган улуши

$$\sum_{m'=\pm 1/2, m=\pm 3/2} \left\langle \delta |M_{m'm}^{(N=2)}(\vec{k})|^2 \right\rangle = -\frac{9}{4} \frac{\alpha_{\omega}}{\hbar^2 \omega^2} \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^8 B^4 \left\langle \left(|e'_{\pm}|^4 + 1296 |e'_{+} e'_{-}|^4 \right) \right\rangle =$$

$$= -\frac{1}{315} \frac{\alpha_{\omega}}{\hbar^2 \omega^2} \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^8 B^4 \begin{cases} 23616 & \text{ясси кутбланиш учун,} \\ 36011 & \text{циркуляр кутбланиш учун.} \end{cases}$$

Бу ҳол учун чизикли циркуляр дихроизм коэффициенти $\delta\eta^{(N=2)} = 0,66$.

Шундай қилиб, бир вақтда икки фотонли ютилишни эътиборга олмаслик ютилиш коэффициентини, Шунингдек, бошқа оптик катталикларни, масалан, фототокни ҳисоблашда сезиларли хатоликка олиб келиши мумкин.

Таъкидлаймизки, ўлчамли квантлашган структураларда кўп фотонли чизикли циркуляр дихроизмини шу тариқа тадқиқ қилиш мумкин, бу ҳолда оптик ўтишлар икки босқичда кечади. Биринчи босқичда ўтишлар икки ўлчамли импульслар фазосида, худди ҳажмий яримўтказгичлардаги каби боради; иккинчи босқичда эса ўлчамли квантлашган ҳолатлар орасида содир бўлади. Табиийки, ҳар бир босқичда оптик ўтишларнинг ўзига хос танлаш қоидалари мавжуд бўлади. Масалан, бир вақтда икки фотонли ютилишда бир хил тартиб рақамли ўлчамли квантлашган ҳолатлараро ўтиш бир хил жуфтликли ҳолатлар ўртасида, ҳар хил тартиб рақамли ўлчамли квантлашган ҳолатлараро ўтиш ҳар хил жуфтликли ҳолатлар ўртасида кечиши рухсат этилган. Бундай структураларда алоҳида-алоҳида икки ёки ундан ортиқ фотонларнинг ютилиши масаланинг танланган моделига, масалан, яримўтказгич зонасига ёки структуранинг ўстирилган йўналишига боғлиқдир. Чунки (001) кристаллографик йўналишда ўстирилган яримўтказгичли структурадаги электронлар энергетик спектри (111) йўналишда ўстирилган структурадаги электронларнинг энергетик спектридан фарқ қилади. Бу ҳол алоҳида тадқиқ қилишни талаб қилади.

ХУЛОСА

Уч ва икки ўлчамли электронлар системаларида кўп фотонли ютилиш ва силжишли фотогальваник эффектларнинг тадқиқи бўйича қуйидаги хулосалар қилинди:

1. Мураккаб зонали яримўтказгичлардан олинган ўлчамли квантлашган структурадаги номувозантдаги ток ташувчилар учун ва унинг қатор кинетик параметрларини ҳисоблаш имконини берувчи кинетик тенгламаси ҳисобланган.

2. Зичлик матрицасининг нодиагонал матрицавий элементи билан аниқланувчи силжишли фототок ёруғликнинг бир фотонли ютилишида ҳам, икки фотонли ютилишида ҳам эркин ток ташувчиларнинг ҳар бир квант ўтишида реал фазодаги силжиши аниқланган.

3. Мураккаб зонали яримўтказгичда бир ва икки фотонли силжишли фотогальваник эффект токи спектрал ва температуравий боғланишларнинг математик ифодалари аниқланган. Фототокнинг температуравий боғланиши мос ҳолда ёруғликнинг бир ва икки фотонли ютилиш коэффицентининг температуравий боғланиши билан ифодаланиши кўрсатилган.

4. Мураккаб зонали яримўтказгичда икки фотонли силжишли фототокка бир вақтда икки фотоннинг ютилиши билан боғланган оптик ўтишларнинг ҳиссалари ҳисобланган.

5. *n-GaP* учун электронларнинг энергетик спектрида анизотропия эътиборга олинган ҳолда бир фотонли умумий ютилиш коэффиценти ва силжишли фототокнинг спектрал ва температуравий боғланишлари математик ифодалари ҳисобланган.

6. *p-GaAs*да N -фотонли қутбланган ёруғлик ютилиш коэффицентининг $\hbar\omega \gg k_B T$ частоталар соҳасидаги температуравий боғланиши $\exp\left[-(N-1)\frac{m_{lh}}{m_{hh}-m_{lh}}\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right]$ катталиқка кўпайтирилган бир фотонли ютилиш коэффицентининг температуравий боғланиши билан аниқланган.

7. Яримўтказгичда тўрт фотонли ютилишнинг чизикли циркуляр дихроизми оптик ўтишлар турига боғлиқ ҳолда ҳисобланган. Мураккаб валент зонали яримўтказгичда ёруғликнинг икки фотонли ютилиши ҳисобланган бўлиб, когерентли тўйиниш эффектида $(+3/2, \vec{k}) \Rightarrow (+1/2, \vec{k})$ тур оптик ўтишдаги коваклар импульсининг тизгинлашиши $(-3/2, \vec{k}) \Rightarrow (-1/2, \vec{k})$ оптик ўтишдаги моментларнинг ориентацияланишига нисбатан 23 марта жадал кечиши кўрсатилган.

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

**КОКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ**

ЭШБОЛТАЕВ ИКБОЛ МАМИРЖОНОВИЧ

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОФОТОННОГО
ПОГЛОЩЕНИЯ И СДВИГОВОГО ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКОГО
ЭФФЕКТА В ТРЕХ И ДВУМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ**

01.04.10 – Физика полупроводников

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

Андижан – 2018

Тема докторской диссертации зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан, за № B2018.2.PhD/FM202.

Докторская диссертация выполнена в Кокандском государственном педагогическом институте им. Муками.

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

Научный руководитель: **Расулов Рустам Явкачович**
доктор физико-математических наук, профессор

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

Дадамирзаев Мухаммаджон Гуломкодилович
доктор физико-математических наук

Ведущая организация: **Ташкентский университет информационных технологий**

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

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

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

С.З. Зайнабидинов

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

А.О. Курбанов

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

И.Н.Каримов

Председатель Научного семинара при Научном
совете по присуждению ученой степени, д.ф.-м.н.

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В последние годы одно- и двумерные электронные полупроводниковые системы имеют особые места в сильно развивающейся области оптоэлектроники, нанофизики и фотоники. Исследование в области оптических и фотогальванических эффектов в таких структурах приводит к созданию малоинерционных фотоусилителей, нано- и оптоэлектронных устройств. По этой причине исследование одновременного поглощения двух фотонов в многофотонных оптических и фотогальванических эффектах является одной из важнейших задач сегодняшнего дня.

На сегодняшний день в мире большое внимание обращается на физические процессы в размерно-квантованных и объемных полупроводниках, в том числе важнейшей задачей является реализация целевых научных исследований по: определению механизмов оптических и фотогальванических эффектов, зависящих от состояния поляризации света; сопоставлению сдвигового и баллистического поляризационного фотогальванических эффектов относительно одно- и двухфотонного поглощений; определению эффектов одно-и двухфотонного поглощения света в зависимости от реальной зонной структуры полупроводника; определению свойств линейно-циркулярного дихроизма многофотонного поглощения в полупроводниках со сложной зоной.

В нашей стране получены заметные результаты в приоритетных направлениях науки, в том числе по «Развитию использования источников возобновляемой энергии», в исследованиях по оптическим и фотонно-кинетическим явлениям, протекающих в объемных и низкоразмерных полупроводниках. В стратегии действий дальнейшего развития Республики Узбекистан уделено особое внимание развитию научных исследований и инновационной деятельности, задачам создания эффективных механизмов внедрения в практику научных и инновационных достижений, в том числе исследований многофотонных оптических и фотогальванических эффектов, используемых в области микро-, нано- и оптоэлектронике, фотонике.

В связи с этим настоящее диссертационное научное исследование в определенной степени служит ответственному выполнению задачи, предусмотренному в ряде указов и постановлений Президента страны, в том числе в Указе Президента № УП-4947 «О мерах по дальнейшей реализации Стратегии действий по развитию Республики Узбекистан в 2017-2021 годах» от 7 февраля 2017 года, в Постановлениях Президента № ПП-2772 «О мерах по дальнейшему совершенствованию управления, ускоренному развитию и диверсификации электротехнической промышленности на 2017-2021 гг.» от 13 февраля 2017 года и № ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере и изложенных в соответствующих законодательных актах.

В исследованиях, проанализированных в диссертации, на специфичность полупроводниковой зоны, например, «горбообразность» нижней подзоны зоны проводимости *n-GaP*, не обращено должного внимания. Такие случаи требуют особо обратить внимание на реальную зонную структуру образца в теоретическом исследовании поляризационных оптических и фотогальванических эффектов. В связи с этим ряд актуальных вопросов поляризационного фотовольтаического эффекта и многофотонного поглощения в объемных и полупроводниковых полупроводниках в системе трех- и двумерных носителей тока является актуальной задачей.

Связь исследования с приоритетными направлениями развития науки и технологий в Республике. Данная исследовательская работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики: «III. Развитие использования источников возобновляемой энергии».

Степень изученности проблемы. Исследования многофотонных оптических и фотогальванических эффектов в объемных полупроводниках проводятся в научно-исследовательских центрах, институтах и университетах ведущих стран мира. В частности, The American Institute of Physics (США), University of New Hampshire (США), Universität Regensburg (Regensburg, Germany), Institute of Physics (Polish Academy of Sciences, Warsaw), в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург, Россия), в Физическом институте им. П.Н.Лебедева РАН (Москва), в Институте полупроводников (Новосибирск). В мировом масштабе решен ряд актуальных фундаментальных проблем в области оптических явлений в полупроводниках и в их наноструктурах.

Исследования механизмов сдвигового фотогальванического эффекта в трехмерных и в низкоразмерных полупроводниках, а также линейно-циркулярного дихроизма многофотонного поглощения в полупроводниках как в экспериментальном, так и в теоретическом аспекте, являются одними из актуальных и перспективных направлений научных исследований.

А.М.Гласом (США), В.М.Фридкиным (Москва, Россия) экспериментально исследован линейный фотогальванический эффект в однородных сегнетоэлектриках при их однородном освещении. Ими наблюдалось длительное время (от несколько минут до 20 часов) аномально большое стационарное фотонапряжение, которое не объясняется как переходной оптический процесс, так и законами классической физики. Этот эффект экспериментально исследован К.Н.Германом (Германия) и А.Ф.Гибсоном (США) в *GaP*, Г.Рибаксов, А.А.Гуджяном (Канада) и А.А.Рогачевым (Санкт-Петербург, Россия) в теллуре, J.M.Doviak и S.Kothari (США) и И.Д.Ярошецким (Санкт-Петербург, Россия), С.Д.Ганичевым (Дортмунд, Германия) в *GaAs*. С.Д.Ганичевым (Дортмунд, Германия) также экспериментально исследовано новое явление, т.н. спин зависимый циркулярный фотогальванический эффект в ряде полупроводников и в полупроводниковых наноструктурах.

Группой российских ученых, руководимых академиком АН России

Ю.В.Копаевым (Москва, ФИАН), профессорами Н.С.Аверкиевым, Г.Е.Пикусом, Л.Е.Голубом, С.А.Тарасенко, членами корреспондентами РАН Е.Л.Ивченко, М.М.Глазовым (Санкт-Петербург, ФТИ РАН), профессорами В.И.Белиничером, И.Д.Стурманом (Новосибирск, ИП РАН) теоретически разработаны механизмы линейного и циркулярного фотогальванического эффекта в трех-, двух- и одномерных полупроводниках, в топологическом изоляторе, а также в графене.

Учеными нашей страны Э.З.Имамовым и Р.Я.Расуловым теоретически изучены механизмы эффекта фотонного увлечения, поляризационных оптических и фотогальванических эффектов в полупроводниках.

При этом не исследованы:

а) влияние особенностей зонной структуры, в частности, вырождения или горбообразности подзон полупроводника на ток одно- и двухфотонного сдвигового линейного фотогальванического эффекта в *n-GaP*;

б) линейно-циркулярный дихроизм четырехфотонного поглощения света в полупроводнике со сложной зоной;

в) влияние эффекта когерентного насыщения однофотонного перехода дырок на четырехфотонный линейно-циркулярный дихроизм поглощения света в полупроводниках со сложной валентной зоной;

г) вклад в ток сдвигового фотогальванического эффекта одновременного поглощения двух фотонов в *n-GaP*.

Связь темы диссертационного исследования с тематическими планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Работа выполнена в рамках плана научных исследований Кокандского государственного педагогического института.

Целью исследования является определение микроскопической теории оптических явлений в трех (в объемном полупроводнике) и двумерной (в потенциальной яме) системе электронов и сдвигового фотогальванического эффекта в полупроводнике без центра симметрии.

В соответствии с поставленной целью сформулированы следующие **задачи исследования:**

построить теорию линейно-циркулярного дихроизма четырехфотонного поглощения света в полупроводнике со сложной зоной;

построить квантово-механическую теорию одно- и двухфотонного сдвигового линейного фотогальванического эффекта в полупроводнике без центра симметрии со сложной зоной;

определить математические выражения спектральной и температурной зависимости фототока в полупроводнике, обусловленного сдвигом электронов в каждом акте одно- или двухфотонного поглощения света;

рассчитать время релаксации по импульсу электронов в размерно-квантованной яме полупроводника, обусловленной рассеянием электронов на акустических фононах;

сопоставить теоретические результаты с экспериментальными данными по спектральной зависимости тока сдвигового линейного ФГЭ в *n-GaP*.

Объектами исследования являются система двумерных электронов и полупроводники со сложной зонной структурой тетраэдрической симметрии типа *n-GaP*.

Предметом исследования является описание линейно-циркулярного дихроизма четырехфотонного поглощения света и тока одно – двухфотонного сдвигового фотогальванического эффекта в полупроводниках со сложной зоной.

Методы исследования. Для решения поставленных задач применены метод Латтинжера-Кона и уравнение Неймана при исследовании четырехфотонного линейно-циркулярного дихроизма и графическая техника Фейнмана-Келдыша при расчете тока одно-и двухфотонного сдвигового ФГЭ в полупроводниках со сложной зоной.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

определено, что время релаксации электронов по импульсу в полупроводниковой квантовой яме при рассеянии их на акустических фононах может быть больше чем время релаксации импульса в объемном полупроводнике, рассчитано кинетическое уравнение, дающее возможность определить неравновесную функцию распределения низкоразмерных электронов;

определен сдвиговой механизм фотогальванического эффекта в полупроводниках со сложной зоной при одновременном поглощении двух фотонов на основе законов квантовой механики;

рассчитана спектральная зависимость сдвигового фототока в *n-GaP* и сопоставлена теоретически рассчитанная спектральная зависимость с экспериментальными результатами;

определен линейно-циркулярный дихроизм четырехфотонного поглощения света в *p-GaAs*. на основе микроскопической теории

Практические результаты исследования. Научные результаты, полученные в диссертации:

методы расчетов сдвигового фототока применены в низкоразмерной системе носителей тока физики твердого тела;

оптимизируются голографические записи информации, оптических свойств малоинерционных фотоприемников и оптических затворов, использующих результаты, полученные по поляризационным фотогальваническим эффектам;

стимулируют дальнейшие научные исследования многофотонных оптических и фотогальванических эффектов в объемном и низкоразмерном полупроводниках.

Достоверность результатов исследования обосновывается наличием подтверждения теоретических результатов с экспериментом, использованием современных методов расчетов теории твердого тела и квантовой статистической физики,

Научная значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования заключается в получении новых результатов о сдвиговом линейном фотогальваническом эффекте в *n-GaP*, а также четырех

фотонного линейно-циркулярного дихроизма в полупроводнике со сложной валентной зоной.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что выявлены фотонно-кинетические свойства полупроводников и размерно-квантованных структур позволяют использовать их в оптоэлектронике и фотонике, стимулируют дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования поляризационно-зависимых оптических и фотогальванических явлений.

Внедрение результатов исследования. Следующие результаты по исследованию многофотонного поглощения и сдвигового фотогальванического эффекта в трех и двумерных электронных системах определены:

результаты исследования по спектральной и температурной зависимости двухфотонного сдвигового фототока использованы в гранте «Электронные свойства низкоразмерных полупроводников с сильным спин-орбитальным взаимодействием» при изучении оптических переходов в полупроводниках с учетом спин-орбитального взаимодействия (Справка Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе АН России № 11217-279/211.5 от 15 марта 2018 г.). Использование научных результатов дали возможность теоретически изучить спин-орбитального расщепления и оптические переходы под действием линейно и циркулярно поляризованного света в полупроводниках со сложной валентной зоной;

результаты исследования по линейно-циркулярному дихроизму четырех фотонного поглощения в полупроводниках со сложной валентной зоной использованы в проекте «Investigation of the properties of photodiodes fabricated by coating a conductive polymer on silicon» при объяснении малоинерционных свойств полупроводниковых фотодиодов (Университет Улудаг (Турция) HDF(F) 2014/1). Использование научных результатов дали возможность изучить увеличение рабочей скорости полупроводниковых фотопреобразователей;

результаты исследования по рассеянию электронов на акустических фононах в полупроводниковой размерно-квантованной потенциальной яме использованы в проекте «Улучшение эффективности светодиодов, фотоэлементов и других видов оптоэлектронных приборов на основе исследований экситонов, поляронов, биполяронов и явлений переноса в гетеро-и наноструктурах с квантовыми точками» в теоретическом изучении оптических явлений в гетеро-и наноструктурах с квантовыми точками (Справка Агентства Науки и технологий № ФТА-02-11/1149 от 21 ноября 2017 г.). Использование научных результатов даёт возможность изучить экситонные, поляронные и кинетические явления в полупроводниковых гетероструктурах;

результаты исследования по рассеянию электронов на акустических фононах в полупроводниковой размерно-квантованной потенциальной яме использованы в проекте «Улучшение эффективности светодиодов, фотоэлементов и других видов оптоэлектронных приборов на основе исследований экситонов, поляронов, биполяронов и явлений переноса в гетеро-и нано-

структурах с квантовыми точками» при изучении состояний двумерных электронов в приповерхностных областях (Справка Агентства Науки и технологий № ФТА-02-11/1149 от 21 ноября 2017 г.). Использование научных результатов дали возможность теоретически изучить поверхностные состояния в области контакта полупроводник – диэлектрик.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 5 международных и 2 Республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 16 научных трудах, из них 5 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка опубликованных работ автора и цитированной литературы и содержит 118 страниц текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Настоящая диссертация посвящена исследованию микроскопического механизма фотогальванического эффекта в *n-GaP*, обусловленного сдвигом электронов в каждом акте электрон-фотонного взаимодействия при поглощении как линейного, так и нелинейного по интенсивности линейно поляризованного света. Также исследован линейно-циркулярный дихроизм четырехфотонного поглощения света в полупроводнике со сложной валентной зоной.

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

В первой главе «**Полупроводниковые гетероструктуры и поляризационные фотогальванические эффекты в них**» дается обзор научной литературы по фотогальваническим эффектам, о методе расчета волновых функций электронов в ассиметричных полупроводниковых структурах. Проанализированы симметричная и ассиметричная по отношению к инверсии координаты, составляющие волновых функций в полупроводниковых многослойных структурах. Также проведен обзор по теории циркулярного фотогальванического эффекта, возникающего за счет учета спин-орбитального взаимодействия. При этом обсуждены оптические переходы электронов и дырок между размерно-квантованными зонами, где показано, что в этом случае направление и значение фототока определяется зависимостью от ассиметрии объемной, структурной и интерфейсной инверсии. Однако, не были теоретически исследованы влияние особенности зонной структуры полупроводника на одно-и двухфотонный сдвиговой фототок в *n-GaP*, а также воздействие эффекта когерентного насыщения

однофотонного перехода дырок на четырехфотонный линейно-циркулярный дихроизм поглощения света в полупроводниках со сложной валентной зоной.

Во второй главе «Некоторые фотонно-кинетические явления в двумерных электронных системах» проведен расчет времени релаксации импульса электронов при рассеянии на акустических фононах в структурах, состоящих из потенциального барьера и ям, выращенных из полупроводников без центра симметрии. Определено выражение для времени релаксации импульса двумерных (2D) электронов в виде

$$\frac{1}{\tau_{2D}^{(n',n)}} = \frac{2\pi}{\hbar} |M_D|^2 g^{(2D)} \Phi_{\vec{k}'_{\perp}, \vec{k}_{\perp}}^{(n',n)}(+, q_z). \quad \text{Здесь } g^{(2D)} = m^* / (2\pi\hbar^2) - \text{плотность состояний}$$

двумерных электронов, m^* - их эффективная масса,

$$\Phi_{\vec{k}'_{\perp}, \vec{k}_{\perp}}^{(n',n)}(\pm) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left| Y_{\vec{k}'_{\perp}, \vec{k}_{\perp}}^{(n',n)}(\pm) \right|^2 \frac{dq_z}{2\pi}, \quad q_z - z \text{ составляющая волнового вектора фонона.}$$

График последней функции приведен на рис.1 для ряда случаев. Из рис.1 видно, что матричный элемент электронных переходов с участием акустических фононов осциллируют в пространстве q_z . В случаях с $n' = n = 1$ и $n' = n = 2$ получим одинаковые результаты:

$$\Phi_{\vec{k}'_{\perp}, \vec{k}_{\perp}}^{(n',n)}(\pm) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left| Y_{\vec{k}'_{\perp}, \vec{k}_{\perp}}^{(n',n)}(\pm) \right|^2 \frac{dq_z}{2\pi} = \frac{3}{2 \cdot a}. \quad (1)$$

В этом случае при переходах 2D электронов между размерно-квантованными

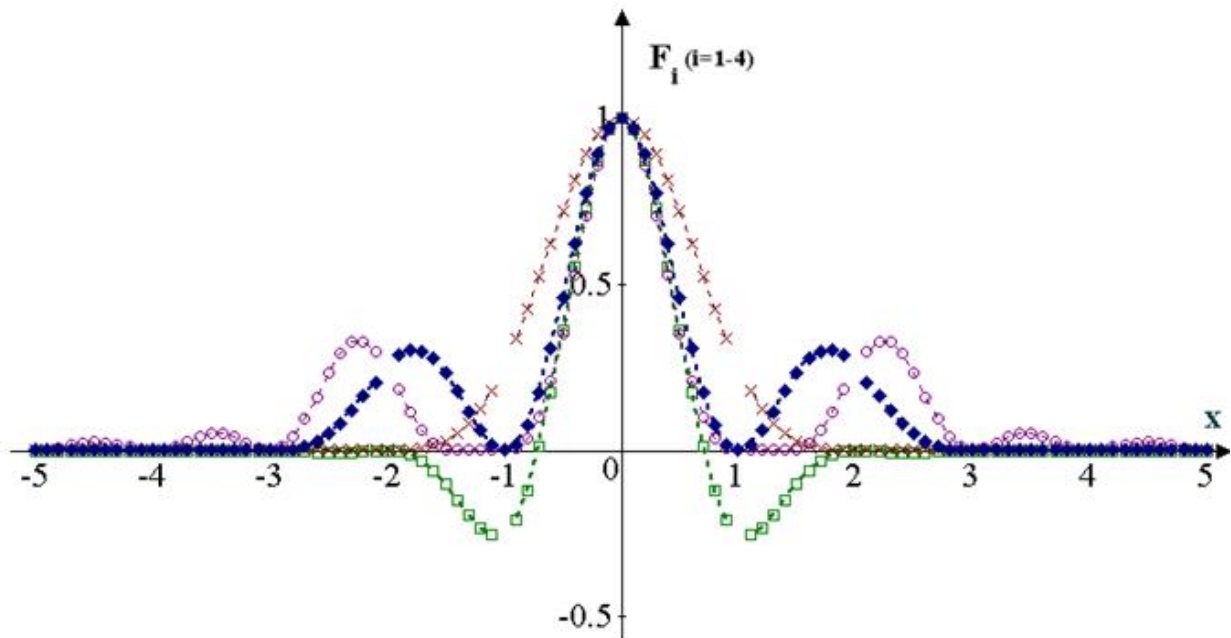


Рис.1. График зависимости функции $F_i (i=1 \div 4)$ от x , где $\times - F_1(x; n' = n = 1)$,

$\blacksquare - F_2(x; n' = n = 1)$, $\blacksquare - F_3(x; n' = n = 1)$, $\circ - F_4(x; n' = n = 1)$.

состояниями одинаковой четности время релаксации импульса растет с уменьшением толщины ямы.

Отношение времен релаксации импульса дву-и одномерных электронов определяется соотношением

$$\frac{\tau_{2D}^{(2,2)}}{\tau_{3D}} = \frac{\tau_{2D}^{(1,1)}}{\tau_{3D}} = \frac{g_{2D}^{(1,1)}}{g_{3D}} = \frac{2ka}{3\pi}. \quad (2)$$

где g_{3D} – плотность состояний электронов в кристалле, k – волновой вектор электронов, определяемый законом сохранения электронов и усредненный по направлению \vec{q} вектора¹.

Из (2) видно, что можно контролировать время релаксации импульса электронов выбором эффективных масс, характеристических величин структуры, например, толщины потенциального барьера и потенциальной ямы. Отметим, что мы не обратили внимания на зависимость величин g_{2D} и k от номера размерно-квантованных состояний. Если обратить внимание на это, то в $\tau_{2D}^{(n',n)}$ появляется дополнительное слагаемое, которое требует отдельного рассмотрения. В вычислениях обращено внимание на симметричное и антисимметричное к инверсии координат составляющие волновых функций.

Также получено кинетическое уравнение для $F_{lk}^{(n)}$ неравновесной функции распределения, с помощью которого можно определить параметры кинетических явлений, протекающих в многослойных структурах полупроводников со сложной валентной зоной в виде

$$\begin{aligned} \vec{v}_l \frac{\partial F_{lk}^{(n)}}{\partial \vec{r}} + \left(e\vec{\varepsilon} + \frac{e}{c} (\vec{v}_l^{(n)} \times \vec{H}) \right) \frac{\partial F_{lk}^{(n)}}{\partial \vec{p}} = \\ = - \frac{1}{(2\pi)^2} \sum_{n'} \left[W_{n'l'\vec{k}',lk} F_{lk}^{(n)} (1 - F_{l'k'}^{(n')}) - W'_{nl\vec{k},n'l'\vec{k}'} F_{l'k'}^{(n')} (1 - F_{lk}^{(n)}) \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь e – заряд дырок, $\vec{p} = \hbar\vec{k}$, $\vec{v}_{lk}^{(n)} = \nabla_{\vec{p}} E_{lk}^{(n)}$ – их групповая скорость, F_{lk} – функция распределения, E_{lk} – энергия дырок в состоянии $|nl\vec{k}\rangle$, $W_{n'l'\vec{k}',nl\vec{k}}$ – вероятность перехода из состояния $|nl\vec{k}\rangle$ в $|n'l'\vec{k}'\rangle$, $n, n' = 1, 2, 3, \dots$ – номера размерно квантованных состояний, l, l' – номера ветвей зоны. Если считать, что функция распределения состоит из двух составляющих, т.е.

$$F_{lk}^{(n)} = f_{lk}^{(n)} + \Delta f_{lk}^{(n)}, \quad (4)$$

то для невырожденных полупроводников $f_{lk}^{(n)}$ можно выбрать как распределение Больцмана, т.е. $f_{lk}^{(n)} = \exp[E_p^{(n)} - E_{lk}^{(n)} / k_B T] \Delta f_{lk}^{(n)}$ – вклад в неравновесную функцию распределения. Здесь $f_{lk}^{(n)}$ – равновесная функция распределения дырок энергии $E_{lk}^{(n)}$. Если учесть соотношения (4), (3) и ограничиться первым слагаемым, то имеем

¹ В общем случае численное значение этого вектора должно зависеть от номера начального и конечного размерно-квантованного состояния электронов.

$$\begin{aligned}
& -\frac{ef_{lk'}^{(n)}}{k_B T} \left(\vec{\varepsilon} \vec{v}_{ek_{\perp}}^{(n)} \right) + \frac{e}{c} \left(\left[\vec{v}_{lk_{\perp}}^{(n)} \times \vec{H} \right], \right) \ddot{a} \vec{p} \left(\Delta f_{lk_{\perp}}^{(n)} \right) = \\
& -\frac{1}{(2\pi)^3} \sum_{n', l'=1,2} \left[f_{lk_{\perp}}^{(n)} \int W_{n'l'k_{\perp}} \left(1 - f_{l'k_{\perp}}^{(n')} \right) d^3 \vec{k}'_{\perp} - \left(1 - f_{lk_{\perp}}^{(n)} \right) \int W_{nl'k_{\perp}, n'l'k'_{\perp}} f_{l'k'_{\perp}}^{(n')} d^3 \vec{k}'_{\perp} \right].
\end{aligned} \tag{5}$$

Из (5) видно, что изменение функции распределения дырок, рассеиваемых на неоднородностях (например, на фонах или на примесях), определяется двумя составляющими. Одно из этих слагаемых характеризует уход дырок из состояния (n, l, \vec{k}_{\perp}) , а второе – приход в начальное состояние. В этом случае переходы в состояние с одинаковыми l и l' соответствуют внутризонным переходам, а переходы с различными l и l' – междузонным переходам (или переходам между ветвями зоны). Естественно, что внутризонные прямые переходы ($l = l'$) соответствуют переходам между размерно-квантованными состояниями с различными номерами ($n \neq n'$).

Также анализированы правила выбора оптических переходов между размерно-квантованными состояниями валентной зоны и состояниями, индуцированными за счет размерного квантования.

В заключение главы приведены соответствующие выводы.

В третьей главе «**Одно-и двухфотонный сдвиговый фотогальванический эффект в n-GaP**» указано, что поляризационно зависимые оптические и фотогальванические эффекты входят в группу интенсивно исследуемых фотоэлектрических явлений, которые на сегодняшний день являются актуальными как в теоретическом, так и в экспериментальном аспектах. Эффект, связанный с возникновением фототока в однородном образце, при его однородном освещении, описываемый передачей импульса фотона, называют эффектом фотонного увлечения. Этот эффект наблюдается не только при междузонных, но и при внутризонных оптических переходах. В отличие от этого эффекта экспериментально наблюдаются эффекты, зависящие от степени поляризации света и возникающие в однородном образце при его однородном освещении, но без учета импульса фотона, которые называются линейным и циркулярным фотогальваническим эффектом. Эти эффекты имеют два механизма: баллистический и сдвиговый. В настоящей главе даны результаты исследования по сдвиговому линейному фотогальваническому эффекту.

Также проанализирован энергетический спектр электронов в полупроводнике с горбообразной зонной структурой и рассчитана спектральная и температурная зависимость коэффициента поглощения однофотонного поляризованного света в *n-GaP*

$$K(\omega, T) = K_{\parallel}(\omega, T) + 2K_{\perp}(\omega, T) \tag{6}$$

Здесь

$$K_{\perp}(\omega, T) = \frac{1}{8} \frac{e^2}{c \hbar} \frac{1}{n_{\omega}} \left(\frac{k_B T}{B} \right)^2 \frac{D^2}{P^2} \frac{\Delta}{\hbar \omega} \exp \left(\frac{E_F}{k_B T} \right) \exp \left(\frac{\hbar \omega - 2A k_{z0}^2}{k_B T} \right) \tag{7}$$

$$K_{\parallel}(\omega, T) = \frac{1}{2} \frac{e^2}{c \hbar} \frac{1}{n_{\omega}} \frac{k_B T}{B} \exp\left(\frac{E_F}{k_B T}\right) \frac{1}{k_{z0}} \exp\left(\frac{\hbar \omega - 2 A k_{z0}^2}{k_B T}\right), \quad (8)$$

$k_{z0} = \frac{\Delta}{2P} [(\hbar \omega / \Delta)^2 - 1]^{1/2}$, Δ - энергетический зазор между ветвями X_l и X_3 в точке X , n_{ω} - коэффициент преломления света, D , B , P - зонные параметры n -GaP. Отсюда видно, что спектральная зависимость $K_{\parallel}(\omega, T)$ пропорциональна k_{z0} , стремящейся в бесконечность по закону $[(\hbar \omega / \Delta)^2 - 1]^{-1/2}$ при условии $\hbar \omega \rightarrow \Delta$. Такая особенность объясняется «горбообразностью» нижней подзоны X_l зоны проводимости.

Приведена феноменологическая теория, дающая возможность определить условия наблюдения фотогальванического эффекта в зависимости от симметрии кристалла. Далее построена количественная теория однофотонного механизма сдвигового линейного фотогальванического эффекта (СЛФГЭ) в n -GaP.

Результирующий фототок в n -GaP, определяемый как сумма вкладов из каждой долины, выражается соотношением

$$j_{\alpha}^{phot} = \frac{I}{\hbar \omega} K L_{shift} e_z (e_x \delta_{\alpha y} + e_y \delta_{\alpha x}) \quad (9)$$

здесь

$$L_{сильж} = 3 \eta_{\omega} D P^{-1}, \quad \eta_{\omega} = \Delta / \hbar \omega, \quad k_{\omega}^2 = [(\hbar \omega)^2 - \Delta^2] (2P)^{-2},$$

N' - концентрация электронов, K_{ω} - однофотонный коэффициент поглощения света, определяемый формулами (6-8) и оптическими переходами между ветвями X_l^C и X_3^C зоны проводимости.

Количественные расчеты показывают, что, если $A_3 - A_1 = \hbar^2 (2m^*)^{-1}$, $m^* = m_1 m_2 (m_1 - m_2)^{-1}$, $m^* = 0,36 m_0$, $\hbar \Omega = 51 \text{ мЭВ}$, $\Delta = 335 \text{ мЭВ}$, $P a_0 = D$, $a_0 = 5,4 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ (постоянная решетки), $T = 200 \text{ К}$, $\hbar \omega = 550 \text{ мЭВ}$, то баллистический фототок

$$J_{ball}^{(z)} = -4e \frac{I}{\hbar \omega} K(\omega) (2e_x e_y) \frac{Q}{P} \alpha_{\delta} \Omega \frac{m_1 m_2}{(m_1 - m_2)} = \frac{m_2}{(m_1 - m_2)} \tau_{1p} \left[(\eta - 1)^{1/2} (N_q + 1) - \right. \\ \left. - (\eta - 1)^{1/2} \right] - \frac{m_1}{(m_1 - m_2)} \tau_{2p} \left[\left(\eta - \frac{m_1}{m_2} \right)^{1/2} (N_q + 1) - \left(\eta + \frac{m_2}{m_1} \right)^{1/2} N_q \right]$$

и он в пять раз больше чем сдвиговый. Здесь $m_l^{-1} = 2A_l \hbar^{-2}$,

$\eta = \frac{m_1 m_2}{(m_1 - m_2) m_0} (\hbar \omega - \Delta) / (\hbar \Omega)$, $\alpha_{\delta} = \frac{e^2}{\hbar \varepsilon^*} \left(\frac{m_1}{2 \hbar \Omega} \right)^{1/2}$ - фрелиховская константа электрон-фононного взаимодействия, τ_{lk} - время релаксации электронов по импульсу в ветви l ($l = X_3, X_1$) зоны.

На рис.2 сопоставлены теоретические результаты с экспериментальными по спектральной зависимости параметра линейного ФГЭ $\tilde{D} = \chi / \sigma'$, для *n-GaP* (σ' - фотопроводимость образца). В расчетах использованы величины $T=300\text{K}$, $\varepsilon_\omega = 9.09$, $n = 2.41 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $m^{*-1} = (m_{\parallel}^{-1} + 2 \cdot m_{\perp}^{-1})/3$, $\varepsilon_0 = 11.1$, $\rho = 4.1 \text{ э/см}^3$, $m_{\perp} = 0.25m_0$, $m_{\parallel} = 4.85 \cdot m_0$, где m_{\perp} и m_{\parallel} - продольная и поперечная (относительно главной кристаллической оси симметрии) эффективная масса электронов.

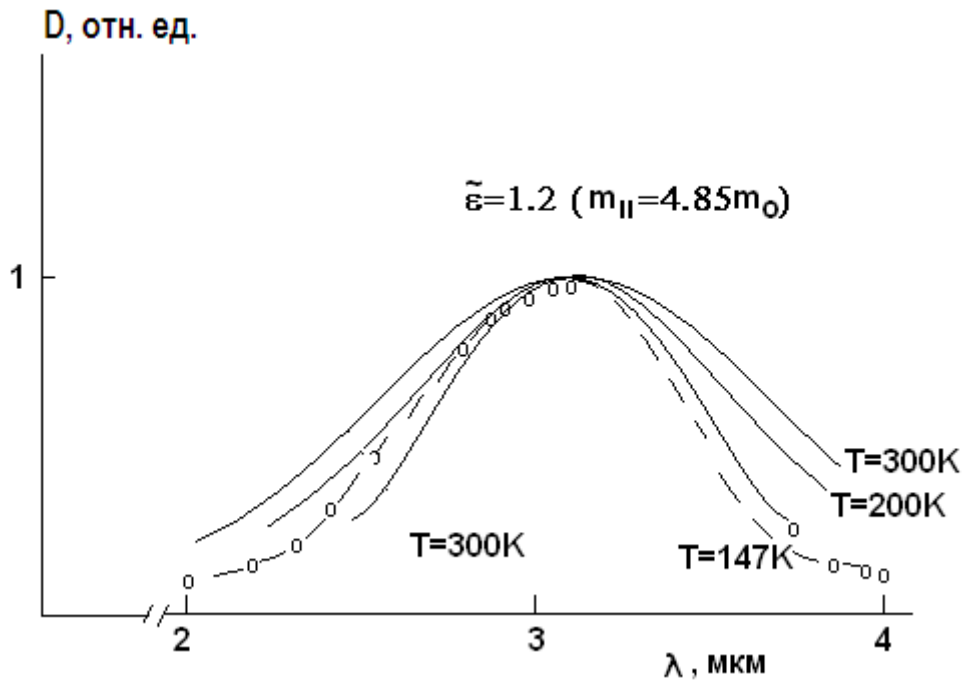


Рис.2. Экспериментальная и теоретическая спектральная зависимость параметра линейного ФГЭ $\tilde{D} = \chi / \sigma'$, для *n-GaP*, где значения величин даны в тексте, а χ - тензор линейного ФГЭ (см. формулу (11)), σ' - фотопроводимость образца, сплошные линии теоретические, кружки - экспериментальные результаты.

Из анализа литературы стало известно, что величина $\tilde{\varepsilon} = 2m_{\parallel} P^2 \hbar^{-2} \Delta^{-1}$ может иметь несколько значений. В частности, в количественном анализе выбрано значение величины $\tilde{\varepsilon}$ так ($\tilde{\varepsilon} = 1.2$), чтобы теоретическая спектральная зависимость параметра линейного ФГЭ $\tilde{D} = \chi / \sigma'$, хорошо согласовывалась с экспериментальной. Уместно отметить, что в области значений $\tilde{\varepsilon}$ больше чем 1.2 теоретическая спектральная зависимость $\tilde{D} = \chi / \sigma'$, смещается в правую сторону относительно экспериментального графика, а в противном случае - в левую.

Времена релаксации импульса электронов вычислялись в предположении, что доминирующим механизмом рассеяния является фреilihовское взаимодействие электронов с продольными оптическими фононами. Отметим, что рассчитанное при $m_{\parallel} = 2m_0$, $T = 300 \text{ K}$, $N = 2.4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ максимальное значение тока фотонного механизма баллистического ЛФГЭ в

1.2 раза больше чем экспериментальный, в 1.5 раза меньше чем сдвиговой ЛФГЭ.

Такое расхождение рассчитанных значений тока ЛФГЭ в n -GaP с экспериментальными, по-видимому, связано со следующими фактами: а) пренебрежением вклада фононного механизма как в баллистический, так и в сдвиговой ЛФГЭ, который требует, как нам кажется, отдельного рассмотрения; б) пренебрежением различия продольных и поперечных эффективных масс электронов в подзонах X_1 и X_3 ; в) пренебрежением вклада в фототок, возникающим после первого столкновения электронов с фононами.

Также построена теория двухфотонного сдвигового фотогальванического эффекта в n -GaP. Возникающий фототок определяется смещением носителей тока в реальном пространстве в каждом квантовом акте. Этот случай требует отсутствия центра симметрии в рассматриваемом образце, в частности, в полупроводниковом кристалле.

Уместно отметить то, что происходит наряду с поглощением двух одинарных фотонов, и одновременное поглощение двух фотонов. Последний тип поглощения дает отдельный вклад в фототок и, как показывают расчеты, этот вклад немаловажный.

Ток сдвигового линейного ФГЭ, обусловленного прямыми двухфотонными оптическими переходами в области долин n -GaP в сферическом приближении в энергетическом спектре электронов определяется выражением

$$J_{shift,\alpha}^{(z)} = -e \frac{IK(\omega)}{\hbar\omega} R_\alpha \mathfrak{Z}(\omega, T) \quad (10)$$

или

$$\chi_{shift} = -eQK(\omega)/(P\Delta) \mathfrak{Z}(\omega, T), \quad (11)$$

где $\mu_- = m_{X_1} \cdot m_{X_3} / (m_{X_1} + m_{X_3})$ - приведенная масса электронов, α -параметр тонкой структуры, $m_{X_1}(m_{X_3})$ - эффективная масса электронов в подзоне

$$X_1(X_3), \quad A_3 = 2A_1 \quad I_0 = \frac{2n_\omega}{\pi\alpha} \mu_- \omega^3, \quad \mathfrak{Z}(\omega, T) = \frac{3}{5} \frac{I}{I_0} \frac{2\hbar\omega - \Delta}{\hbar\omega} \left(\frac{2\hbar\omega - \Delta}{\hbar\omega - \Delta} \right)^{3/2} e^{\frac{2\hbar\omega}{k_B T}} \left(1 + e^{\frac{\hbar\omega}{k_B T}} \right),$$

P, Q -зонные параметры, χ_{shift} -тензор линейного ФГЭ, $R_\alpha = \frac{P}{Q} \frac{\hbar\omega}{\Delta} 2e_\beta e_\gamma \varepsilon_{\alpha\beta\gamma}$, $\varepsilon_{\alpha\beta\gamma}$ -тензор Ливи-Чивита ($\alpha, \beta, \gamma = x, y, z$).

В заключение главы приведены соответствующие выводы.

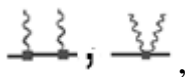
В четвертой главе «**Линейно-циркулярный дихроизм много фотонного поглощения в полупроводнике**» теоретически проанализирован линейно-циркулярный дихроизм четырехфотонного поглощения света, т.е. оптические явления, связанные с выстраиванием по импульсу носителей тока при поглощении плоско(линейно) поляризованного света и ориентацией их момент(спин)ов при поглощении циркулярно (эллиптически) поляризованного света. В частности, рассчитан коэффициент линейно-циркулярного дихроизма, определяемого как отношение вероятности поглощения линейно

поляризованного света к вероятности поглощения циркулярно поляризованного света, а также проведен феноменологический анализ вероятностей переходов. Также качественно объясняется линейно-циркулярный дихроизм много(N)фотонного межзонного поглощения света следующим образом. В случае циркулярно поляризованного излучения фотоны имеют определенную проекцию углового момента (например, спина) на направление импульса фотона $\hbar\vec{q}$: $(+1)$ для σ_+ поляризации и (-1) для σ_- поляризации. В линейно поляризованном свете фотоны не имеют проекции углового момента на направление волнового вектора фотона \vec{q} . Отметим здесь, что при многоквантовом поглощении линейно и циркулярно поляризованного света промежуточные (виртуальные) состояния электронов в кристаллах будут различными. В частности, при возбуждении циркулярно поляризованным светом после поглощения m фотонов ($m \ll N$) система имеет отличный от нуля средний момент количества движения. Это означает, что следующий $(m+1)$ -й фотон взаимодействует уже с оптически ориентированной системой. Поэтому в силу правила отбора по проекциям момента количества движения вероятности двух- или многофотонного поглощения должны различаться для линейно и циркулярно поляризованного света. Заметим, что в приведенных выше рассуждениях при рассмотрении поглощения света в кристаллах мы для простоты пренебрегли кристаллической анизотропией. Следовательно, ЛЦД при N фотонном поглощении ($N \geq 2$) наблюдается даже в кубических кристаллах с изотропным энергетическим спектром при распространении света вдоль главной оси, когда коэффициент однофотонного поглощения не зависит от степени поляризации света. Однако коэффициент однофотонного поглощения света не зависит от природы его поляризации.

Если имеется источник света с частотой ω_1 , ω_2 и с поляризацией \vec{e}_1 , \vec{e}_2 , тогда для вероятности оптических переходов получим соотношение $W_{cv}^{(N=2)}(\vec{e}_1, \vec{e}_2; \omega_1, \omega_2) \propto (\omega_1^{-2} + \omega_2^{-2} + \omega_1^{-1} \omega_2^{-1} |\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2^*|^2)$. Отсюда видно, что в полупроводниках с простой зоной не наблюдается линейно-циркулярный дихроизм, потому что в этом случае вероятность поглощения двух, т.е. линейно и циркулярно поляризованных электромагнитных волн будет одинакова. Если обратить внимание на такие особенности, например, одна из ветвей зоны имеет «горб» или имеется анизотропия в эффективной массе

дырок, то $\alpha_{cv}^{(N=2)} = \frac{W_{cv}^{(N=2, lin)}}{W_{cv}^{(N=2, circ)}}$ параметр линейно-циркулярного дихроизма поглощения света может принять отличное от нуля значение.

Поскольку нас интересуют оптические переходы типа $|\pm 3/2\rangle \mapsto |\pm 1/2\rangle$, поэтому ниже преведем выражения для N фотонного матричного элемента. При расчете $\|M_{m,m'}^{(N)}\|$ учтены следующие фейнмановские диаграммы: для $N=2$:

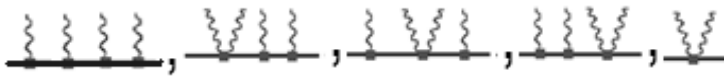



для



для

$N=4$:

 , где диаграммой  -одновременное поглощение двух фотонов. В частности, вклад в двухфотонный матричный элемент для оптического перехода типа $(\pm 3/2) \Rightarrow (\pm 1/2)$ равен $\sqrt{3} B m_0^2 e_z' e_{\mp}' / \hbar^2$, а для переходов $(\pm 3/2) \Rightarrow (\mp 1/2)$ имеем: $\frac{\sqrt{3}}{2} B m_0^2 (e_{\mp}')^2 / \hbar^2$.

Отношение коэффициентов N' и N фотонного поглощения, дающее возможность сопоставления их температурной зависимости, определяется следующим соотношением:

$$\frac{K^{(N')}}{K^{(N)}} = \sqrt{\frac{N'^3}{N^3}} \Xi_{m'm}^{(N',N)} \exp \left[- (E_1^{(N')} - E_1^{(N)}) / k_B T \right], \quad (13)$$

где

$$\Xi_{m'm}^{(N',N)} = \frac{\sum_{m'=\pm 1/2, m=\pm 3/2} \langle |M_{m'm}^{(N')}(\vec{k})|^2 \rangle}{\sum_{m'=\pm 1/2, m=\pm 3/2} \langle |M_{m'm}^{(N)}(\vec{k})|^2 \rangle}. \quad (14)$$

В частности, в приближении $\hbar\omega \gg k_B T$ имеем

$$\frac{K^{(4)}}{K^{(1)}} = 4 \times \exp(-3E_1^{(1)} / k_B T) \times \Xi_{m'm}^{(4,1)}, \quad (15)$$

здесь

$$\Xi_{m'm}^{(4,1)} = \frac{\sum_{m'=\pm 1/2, m=\pm 3/2} \langle |M_{m'm}^{(4)}(\vec{k})|^2 \rangle}{\sum_{m'=\pm 1/2, m=\pm 3/2} \langle |M_{m'm}^{(1)}(\vec{k})|^2 \rangle} = \frac{\varepsilon^3}{315} \begin{cases} 12298 & \text{для линейной поляризации,} \\ 11008 & \text{для циркулярной поляризации,} \end{cases}$$

$K^{(1)}$ -коэффициент однофотонного поглощения света без учета эффекта насыщения поглощения, в температурной зависимости, которой имеется экстремальное значение, удовлетворяющее соотношению

$$T_{extr}^{(N=1)} = \frac{2}{3} \frac{m_{lh}}{m_{hh} - m_{lh}} \frac{\hbar\omega}{k_B}.$$

Например, для p-GaAs при $\lambda = 10,6 \mu m$ имеем $T_{extr}^{(N=1)} = 194 K$.

Тогда, в сферическом приближении в эффективном гамильтониане дырок коэффициент многофотонного поглощения света $K^{(N)}$ ($N=2,3,4$) с учетом эффекта насыщения поглощения определяется выражением

$$\delta K^{(N)} \propto \sum_{m'=\pm 1/2, m=\pm 3/2} \delta |M_{m'm}^{(N)}(\vec{k})|^2 = \sum_{m'=\pm 1/2, m=\pm 3/2} \frac{|M_{m'm}^{(N)}(\vec{k})|^2}{\sqrt{1 + 4 \frac{\alpha_{\omega}}{\hbar^2 \omega^2} |M_{m'm}^{(N)}(\vec{k})|^2}} - |M_{m'm}^{(N)}(\vec{k})|^2 \quad (16)$$

Далее рассмотрим область умеренной интенсивности, где можно использовать теорию возмущений. Тогда, разлагая радикал в (15) в ряд по $4 \frac{\alpha_{\omega}}{\hbar^2 \omega^2} |M_{m'm}^{(N)}(\vec{k})|^2$, имеем следующие результаты.

При $N=1$ имеем

$$\delta |M_{m'm}^{(N=1)}(\vec{k})|^2 = -2 \frac{\alpha_\omega}{\hbar^2 \omega^2} |M_{m'm}^{(1)}(\vec{k})|^4 + 6 \left(\frac{\alpha_\omega}{\hbar^2 \omega^2} \right)^2 |M_{m'm}^{(1)}(\vec{k})|^6 - 20 \left(\frac{\alpha_\omega}{\hbar^2 \omega^2} \right)^3 |M_{m'm}^{(1)}(\vec{k})|^8 + \dots, \quad (17)$$

где первое слагаемое дает линейный, второе-квадратичный, третье-кубический по интенсивности вклад в коэффициент поглощения (ЛЦД), т.е. они дают вклад в двух-, трех- и четырехфотонный процессы соответственно. Проводя угловое усреднение и производя следующее обозначение $\beta_\omega = \alpha_\omega \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^2 \frac{B}{\hbar\omega}$,

перепишем последние выражения, как

$$\begin{aligned} - \left\langle \frac{\alpha_\omega}{\hbar^2 \omega^2} \left(|M_{m'm}^{(1)}(\vec{k})|^2 \right)^2 \right\rangle &= - \frac{1}{315} \alpha_\omega \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^4 B^2 \begin{cases} 1512 & \text{для линейной поляризации,} \\ 1323 & \text{для циркулярной поляризации,} \end{cases} \\ \left\langle 6 \left(\frac{\alpha_\omega}{\hbar^2 \omega^2} \right)^2 \left(|M_{m'm}^{(1)}(\vec{k})|^2 \right)^3 \right\rangle &= \\ = \frac{1}{315} \alpha_\omega \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^4 B^2 \beta_\omega \begin{cases} 23328 & \text{для линейной поляризации,} \\ 17496 & \text{для циркулярной поляризации,} \end{cases} \\ - \left\langle 20 \left(\frac{\alpha_\omega}{\hbar^2 \omega^2} \right)^3 \left(|M_{m'm}^{(1)}(\vec{k})|^2 \right)^4 \right\rangle &= \\ = - \frac{1}{315} \alpha_\omega \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^4 B^2 \beta_\omega^2 \begin{cases} 207360 & \text{для линейной поляризации,} \\ 134460 & \text{для циркулярной поляризации.} \end{cases} \end{aligned}$$

Из последних соотношений видно, что каждое слагаемое (17) дает свой вклад в суммарный коэффициент поглощения (ЛЦД).

Вклад двухфотонного эффекта насыщения в поглощение определим как

$$\begin{aligned} \sum_{m'=\pm 1/2, m=\pm 3/2} \left\langle \delta |M_{m'm}^{(N=2)}(\vec{k})|^2 \right\rangle &= - \frac{9}{4} \frac{\alpha_\omega}{\hbar^2 \omega^2} \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^8 B^4 \left\langle \left(|e_\pm'^2|^4 + 1296 |e'_+ e'_{z'}|^4 \right) \right\rangle = \\ &= - \frac{1}{315} \frac{\alpha_\omega}{\hbar^2 \omega^2} \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^8 B^4 \begin{cases} 23616 & \text{для линейной поляризации,} \\ 36011 & \text{для циркулярной поляризации,} \end{cases} \end{aligned} \quad (18)$$

Тогда коэффициент ЛЦД для данного случая $\delta\eta^{(N=2)} = 0,66$.

Таким образом, пренебрежение одновременного поглощения двух фотонов может привести к заметной погрешности в расчетах коэффициента поглощения (ЛЦД) или других оптических величин, например, фототока.

Заметим, что исследование многофотонного линейно-циркулярного дихроизма в размерно-квантованных структурах можно произвести аналогичным образом, где оптические переходы протекают в два этапа. На первом этапе происходят переходы в двумерном импульсном пространстве, подобно в объемном полупроводнике, а на втором этапе переходы происходят между размерно-квантованными состояниями. Естественно, что каждый из этих этапов имеет свое правило отбора оптических переходов. Например, при одновременном поглощении двух фотонов переходы разрешены между размерно-квантованными состояниями одинаковой четности, когда их номера одинаковы, и разной четности, когда их номера различны. Физическая природа неодновременного поглощения двух или

более фотонов в таких структурах зависит от выбора модели задачи, например, от структуры зоны полупроводника или от направления выращивания структуры, потому что энергетический спектр электронов в полупроводниковой структуре, выращенной по кристаллографической оси (001) отличается от энергетического спектра в структуре, выращенной по (111).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, полученные в диссертации, можно резюмировать следующим образом:

1. Получено кинетическое уравнение для неравновесных носителей тока в размерно-квантованных структурах, выращенных на основе полупроводников со сложной зоной, с помощью которого можно вычислить ряд кинетических параметров таких структур.

2. Фототок, который определяется недиагональным матричным элементом матрицы плотности, как в одно, так и в двух фотонном случае объясняется сдвигом носителей тока в реальном пространстве в каждом квантовом переходе.

3. Рассчитана спектральная и температурная зависимость одно- и двухфотонного тока сдвигового фотогальванического эффекта в полупроводнике со сложной зоной. Температурная зависимость фототока света выражается по температурной зависимости коэффициента одно- и двух фотонного поглощения света.

4. Рассчитаны вклады оптических переходов, связанных одновременным поглощением двух фотонов, в двухфотонный сдвиговый фототок в полупроводнике со сложной зоной.

5. Рассчитано математическое выражение для спектральной и температурной зависимости суммарного однофотонного коэффициента поглощения света и фототока с учетом анизотропии в энергетическом спектре электронов в *n-GaP*

6. Температурная зависимость коэффициента N-фотонного межподзонного поглощения поляризованного излучения в области частот, когда $\hbar\omega \gg k_B T$, определена в зависимости от коэффициента однофотонного поглощения, где её надо умножить на величину $\exp\left[-(N-1)\frac{m_{lh}}{m_{hh}-m_{lh}}\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right]$.

7. Рассчитан линейно-циркулярный дихроизм четырехфотонного поглощения в полупроводнике в зависимости от типа оптических переходов. Показано, что в полупроводнике со сложной валентной зоной при двухфотонном поглощении света при когерентном насыщении поглощения, в оптическом переходе $(+3/2, \vec{k}) \Rightarrow (+1/2, \vec{k})$ выстраивание импульсов дырок происходит в 23 раза интенсивнее, чем их ориентации моментов $(-3/2, \vec{k}) \Rightarrow (-1/2, \vec{k})$.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARD OF SCIENTIFIC DEGREE
PhD.28.02.2018.FM.60.01 AT ANDIJAN STATE UNIVERSITY**

KOKAND STATE PEDAGOGICAL INSTITUTE

ESHBOLTAEV IQBOL MAMIRJONOVICH

**THEORETICAL RESEARCHES OF MULTIPHOTON ABSORPTION
AND SHIFT PHOTOVOLTAIC EFFECT IN THREE AND TWO-
DIMENSIONAL ELECTRON SYSTEMS**

01.04.10 – Physics of semiconductors

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

Andijan – 2018

The theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under No. B2018.2.PhD/FM202.

Dissertation has been prepared at Kokand state pedagogical institute named after Mukimi.

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

Scientific supervisor:	Rasulov Rustam Yavkachovich Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor
Official opponents:	Mamadalimov Abdugafur Teshabayevich Doctor of Physical and Mathematical Sciences, academician Dadamirzayev Mukhammadjon Gulomkodirovich Doctor of Physical and Mathematical Sciences
Leading organization:	Tashkent university of information technologies

Defense will take place «____» _____2018 at _____ at the meeting of Scientific Council number PhD.28.02.2018. FM.60.01 at Andijan state university. Address: 170100, Uzbekistan, Andijan, 129 Universitet street. Phone/fax: 0(374) 223-88-30, e-mail: agsu_info@edu.uz.

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

Abstract of dissertation sent out on «____» _____2018.
(Registry record No. _____ on «____» _____2018).

S.Z.Zaynabidinov

Chairman of Scientific council on award of scientific degree, DSc in physics and mathematics, academician

A.O. Kurbanov

Scientific secretary of Scientific council on award of scientific degree, PhD in physics and mathematics

I.N. Karimov

Chairman of Scientific seminar at Scientific council on award of scientific degree, DSc in physics and mathematics

INTRODUCTION (abstract PhD dissertation)

The aim of research work is to construct a microscopic theory of optical phenomena in three (in a bulk semiconductor) and a two-dimensional (in a potential well) electrons system and a shift photovoltaic effect in a semiconductor without a center of symmetry.

The objects of the research work are a system of two-dimensional electrons and semiconductors with a complex zone structure of tetrahedral symmetry of the *n*-GaP type.

Scientific novelty of dissertation work consists in the following:

it was determined that the relaxation time of electrons by a pulse in a semiconductor quantum well during scattering by acoustic phonons can be greater than the momentum relaxation time in a bulk semiconductor, a kinetic equation was obtained that made it possible to determine the nonequilibrium distribution function of low-dimensional electrons;

on the basis of the laws of quantum mechanics, a shift mechanism of the photovoltaic effect in semiconductors with a complex zone was determined with simultaneous absorption of two photons;

the spectral dependence of the shift photocurrent in *n*-GaP was calculated taking into account the experimental results;

the linear-circular dichroism of four-photon absorption of light in *p*-GaAs was calculated on the basis of the microscopic theory.

Implementation of the research results. The following results on the research of multiphoton absorption and shift photogalvanic effect in three and two-dimensional electron systems:

the results of a research on the spectral and temperature dependence of a two-photon shift photocurrent were used in the grant «Electronic properties of low-dimensional semiconductors with strong spin-orbit interaction» in the study of optical transitions in semiconductors with allowance for the spin-orbit interaction (Reference No. 11217-279 / 211.5 of the Physical and technical institute named after A.F. Ioffe of the Russian Academy of Sciences from March 15, 2018). The use of scientific results made it possible to the theoretical study of spin-orbit splitting and optical transitions under the action of linearly and circularly polarized light in semiconductors with a complex valence band;

the results of research on linear-circular dichroism of four photon absorption in semiconductors with a complex valence band were used in the project «Investigation of the properties of photodiodes fabricated by coating a conductive polimer on silicon» (Reference No. HDF (F) 2014/1 of the University Uludag (Turkey)). The use of scientific results made it possible to study the increase in the operating speed of semiconductor photoconverters;

the results of the investigation of electron scattering by acoustic phonons in a semiconductor time-quantized potential well have been used in the project «Improvement of the efficiency of light-emitting diodes, photographic elements and other types of optoelectronic devices based on studies of excitons, polarons, bipolarons, and transport phenomena in hetero- and nanostructures with quantum

dots» (Reference No. FTA-02-11 / 1149 of Agency of Science and Technology from November 21, 2017). The use of scientific results made it possible to study exciton, polaron, and kinetic phenomena in semiconductor heterostructures;

the results of the research of a single-photon shift photocurrent in semiconductors of tetrahedral symmetry with a complex conduction band were used in the project «Mathematical modeling of the determination of the density of surface states at the semiconductor-dielectric interface» (Reference No. FTA-02-11 / 1149 of Agency of Science and Technology from November 21, 2017). The use of scientific results made it possible to study theoretically the surface states in the contact region of a semiconductor-dielectric.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusions and used literature. The text of the dissertation is outlined on 118 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. Rasulov V.R. Rasulov R.Ya., Eshboltaev I. Linearly and circular dichroism in a semiconductor with a complex valence band with allowance for four-photon absorption of light // Physics of the Solid State. – Springer, 2017. – Vol.59, No.3. – P. 463–468. (№1, Web of Science, IF=0.84).
2. Rasulov V.R. Rasulov R.Ya., Eshboltaev I. On the Theory of the Shift Linear Photovoltaic Effect in Semiconductors of Tetrahedral Symmetry Under Two-Photon Absorption // Russian Physics Journal. – Springer, 2016. – Vol.59, No.1. – P. 92-98. (№1, Web of Science, IF=0.671).
3. Rasulov V.R, Rasulov R.Ya., Eshboltaev I. Linear-Circular Dichroism of Four-Photon Absorption of Light in Semiconductors with a Complex Valence Band // Russian Physics Journal. – Springer, 2015. – Vol. 58, No.12. – P.1681-1686. (№1, Web of Science, IF=0.671).
4. Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Эшболтаев И. Двухфотонный линейный фотогальванический эффект в полупроводниках. Сдвиговый вклад // Узбекский физический журнал. –Ташкент, 2017. – №5. – С. 278-284. (01.00 00, №5).
5. Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Эшболтаев И., Носиров М. О четырехфотонном поглощении света в полупроводнике дырочной проводимости // Научно-технический журнал ФерПИ. – Фергана, 2017. – Спец.вып. – С.18-21. (05.00 00, №20).

II бўлим (II часть; II part)

6. Rasulov R. Ya., Eshboltaev I., Muminov I.A., Abduholikov A.H., Mustafakulov R.R. Absorption of linearly polarized radiation in dimensional quantum wells // Journal of Advanced Research in Natural Science. – North Charleston, 2017. – No.1. – P. 27-32.
7. Rasulov R. Ya., Rasulov V.R., Eshboltaev I., Ummatov X.D. The theory of the four photon of polarized radiation in a semiconductor with complex band structure // American Scientific journal. – New York, 2016. – No.2, – P.93-96.
8. Rasulov R. Ya., Rasulov V.R., Eshboltaev I., Nosirov M.X., Muminov I. Linear-circular dichroism one-photon absorption of light in piezoelectric semiconductors. accounting for the effect of coherent saturation // American Scientific Journal. – New York, 2016. – No.7. – P. 44-47.
9. Rasulov R. Ya., Rasulov V.R., Eshboltaev I., Ahmedov B.B., Abdullayev M. About absorption of polarized radiation in structures with dimensionally induced states // European Applied Sciences. – Stuttgart, Germany, 2014. – №9. – P.76-79.

10. Mamadaliev B. A., Rasulov R. Ya., Rasulov V.R., Eshboltaev I. Two-photon linear photogalvanic effect in semiconductors. The shift contribution // European Applied Sciences. – Stuttgart, Germany, 2013. – No.9. – P. 3-6.

11. Расулов Р.Я., Каримова Г.О., Абдухоликов А.Х., Эшболтаев И. Матричные элементы четырех фотонного поглощения поляризованного излучения в полупроводниках дырочной проводимости / Сборник материалов XIX международной научно-практической конференции «Научные исследования и разработки 2017». – Москва. – 22 февраля 2017 г. – С. 30-32

12. Эшболтаев И., Мустафакулов Р.Р., Абдухоликов А.Х. К теории электронных свойств полупроводниковой размерно-квантованной структуры / XXII международная конференция «Актуальные вызовы современной науки». – Переяслав-Хмельницкий, Украина. – 26-27 февраля 2017 г. – С.114-118.

13. Расулов Р.Я., Расулов В.Р., Эшболтаев И., Маматова М. Двухфотонный сдвиговой фотогальванический эффект в полупроводниках со сложной зоной / Тезисы докладов V Международной конференции: «Актуальные проблемы молекулярной спектроскопии конденсированных сред» – Самарканд. – 22-24 сентября 2016 г. – С.112-113.

14. Rasulov R. Ya., Rasulov V.R., Eshboltaev I., Mansurova G.A, Abdullayev M. Four-photon absorption of light in a semiconductor with a complex band structure taking into account the effect of coherent saturation / «The Ninth International Conference on Eurasian scientific development». Vienna. – 20th May, 2016. – P.139-142.

15. Rasulov R. Ya., Rasulov V.R., Eshboltaev I., Mamatova M.A. To the theory of the four-photon linear circular dichroism of light absorption in p-Ge / European Science and Technology. Materials of the XIII International research and practice conference. – Munich, Germany. – 20th - 21st April, 2016. – P. 18-22.

16. Мамадалиев Б., Коканбаев И.М., Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Эшболтаев И. Сдвиговой линейный фотогальванический эффект в полупроводниках с учетом эффекта резонансного насыщения / Материалы III Международной конференции по оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах. – Фергана. – 14-15 ноября 2014 г. – С. 116-119.

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари
Андижон давлат университетининг «Илмий хабарнома» журналич
тахририятида тахрирдан ўтказилди.
(1.05.2018 йил)

Босишга рухсат этилди: 14.05.2018 йил.
Бичими 60x84 ¹/₁₆, «Times New Roman»
гарнитурлада рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табағи 2,9. Адади: 100. Буюртма: № 166.

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.