

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

Андижон – 2018

**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 тадқики ..... 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 хузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2018.2.PhD/FM202 рақам билан рўйхатга олинган.**

Докторлик диссертацияси Муқимий номидаги Кўқон Давлат педагогика институтида бажарилган.

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

**Илмий раҳбар**

**Расулов Рустам Явқачович**

физика-математика фанлари доктори, профессор

**Расмий оппонентлар:**

**Мамадалимов Абдулгафур Тешабаевич**

физика-математика фанлари доктори, академик

**Дадамирзаев Муҳаммаджон Гуломқодирович**

физика-математика фанлари доктори

**Етакчи ташкилот:**

**Тошкент ахборот технологиялар универсиети**

Диссертация химояси Андижон давлат универсиети хузуридаги Ph.D.28.02.2018.FM.60.01 ракамли Илмий кенгашнинг 2018 йил «\_\_» соат \_\_\_\_ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 170100, Андижон шаҳри, Университет кўчаси, 129-й. Тел./факс: 0(374) 223-88-30; e-mail: [agsu\\_info@edu.uz](mailto:agsu_info@edu.uz), Андижон давлат универсиети мажлислар зали.)

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

Диссертация автореферати 2018 йил «\_\_» да тарқатилди.  
(2018 йил «\_\_» даги \_\_\_\_ ракамли реестр баённомаси.)

**С.З. Зайнабидинов**

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

**А.О. Курбанов**

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

**И.Н. Каримов**

Илмий даражада берувчи Илмий кенгаш хузуридаги илмий семинар раиси, ф.-м.ф.д.

## **КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)**

**Диссертация мавзусининг долзарбилиги 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 эфектларни ўрганиш соҳасида паст инерцияли фотокучайтиргичлар, нано- ва оптоэлектрон қурилмалар яратилишига олиб келмоқда. Шу сабабдан кўп фотонли оптик ва фотогальваник эфектларда 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 кутбланиш ҳолатига боғлиқ бўлган оптик ва фотогальваник эфектларнинг механизмларини аниқлаш; кутбий фотогальваник эфектига 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 кутбий оптик ва фотогальваник эфектларни 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-хуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга

оширишга мазкур диссертациядаги илмий натижалар муайян даражада хизмат қиласы.

Шундай қилиб, уч ва икки ўлчамли ток ташувчилар тизимида кечадиган күтбий фотогальваник эффект ҳамда күп фотонли ютилишни ҳажмий ва паст ўлчамли яримүтказгичларда тадқиқ қилиш **долзарбдири** ҳамда **илмий-амалий истиқболға** әгадир.

**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 ҳодисаларнинг уч ўлчамли ток ташувчилар тизимларидағи, яъни ҳажмий яримүтказгичлардаги 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 номли Физика техника институти (Санкт-Петербург), П.Н.Лебедев номли Россия ФАГа қарашли Физика институти (Москва), яримүтказгичлар 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 фотоэзук тажрибада бир неча минутдан бир соатгача кузатилган. Шунингдек, К.Н.Herman (Германия) ва A.F.Gibson (АҚШ) *GaP*да, G.Ribakovs, A.A.Gudjian (Канада) ва A.A.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 қутбий фотогальваник эффект ҳажмий яримүтказгичларда, С.Д.Ганичев (Дортмунд, Германия), В.А.Шалыгин (Санкт-Петербург, Россия) томонидан спингальваник эффект деб номланувчи янги ҳодиса яримүтказгичли 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 гурӯҳ россиялик олимлар томонидан уч, икки, бир ўлчамли яримүтказгичларда, топологик изоляторларда ҳамда графенда чизиқли ва циркуляр фотогальваник эффектларнинг қатор механизмлари назарий ишлаб чиқылган.

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

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

циркуляр дихроизми; в) коваклар бир фотонли ўтишидаги когерентли түйиниш 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 солиширишдан 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 қўйидагилардан 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 эфектнинг икки фотон бир вактда 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 қўйидагилардан иборат:**

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

қутбий фотогальваник эфект 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 эфектлар 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 эфекти 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 ваnanoэлектроникада қўллаш имконияти мавжудлигида, уч ва икки ўлчамли яримўтказгичларда ёруғлик қутбланишига боғлик кўп фотонли оптик ва фотогальваник эфектлар 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 эфектлар механизмларини аниқлаш асосида:

икки фотонли силжишли фотототокнинг спектрал ва температуравий боғланиши «Кучли спин орбитал ўзаро таъсирили паст ўлчамли яримўтказгичларнинг электронли хоссалари» лойиҳасига яримўтказгичлардаги спин орбитал ўзаро таъсирили оптик ўтишларда фойдаланилган (Россия ФА А.Ф.Иоффе номидаги Физика-техника институтининг 2018 йил 15 мартағи 11217-279x/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 мухокамадан 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 эфектнинг электрон-фотон ўзаро таъсир ҳар бир актида электронларнинг реал фазодаги силжишига боғлиқ

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

**Кириш** қисмida диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, олиб борилган илмий тадқиқотларнинг мамлакатимиз фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги қайд қилинган, хорижий ва республикамизда 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 қутбий фотогальваник эфектлар»** 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 эфект назарияси бўйича ҳам шарҳлар олиб борилган. Бу ҳолда электрон ва ковакларнинг ўлчамли квантлашган зоналариаро оптиканый 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 эфектининг 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 эфектив массаси,  $\Phi_{\vec{k}_\perp, \vec{k}_\perp}^{(n',n)} (\pm) = \int_{-\infty}^{+\infty} |Y_{\vec{k}_\perp, \vec{k}_\perp}^{(n',n)} (\pm)|^2 \frac{dq_z}{2\pi}$ ,  $q_z$ -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 осцилляцияланади. Бу ерда  $n' = n = 1$  ва  $n' = n = 2$  ҳолларда натижалар бир хил бўлади:

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

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 вектори<sup>1</sup>.

(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 бориши талаб қиласди. Ҳисоблашларда электронлар тўлқин функцияларининг координата инверсиясига нисбатан симметриявий ва носимметриявий ташкил этувчилирига 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

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

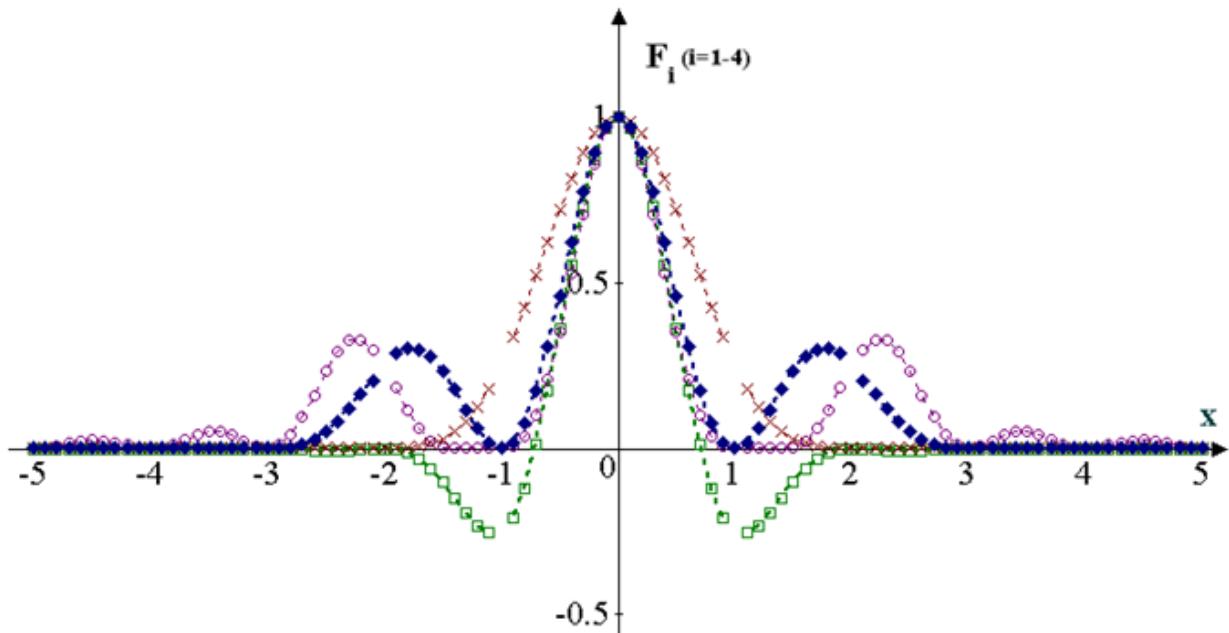
Тақсимот функциясини икки ташкил этувчидан иборат деб қаралса, яъни

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

<sup>1</sup> Умуман олганда, бу векторнинг қиймати ток ташувчилар охирги ва бошлангич ҳолатларининг тартиб рақамига боғлиқ бўлиши керак.

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

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



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

(5)дан кўриняпти, кристалл бир жинслигини бузувчи (масалан, фонон, киришма)ларда сочилаётган коваклар тақсимот 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. Табийки, бир зона ичидаги тўғри ўтишлар ( $l = l'$ ) ҳар хил тартиб рақамли ( $n \neq n'$ ) ўлчамли квантлашган ҳолатлараро ўтишларга олиб келади.

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

Бобнинг охирида натижаларнинг асосий хуносалари келтирилган.

**«n-GaРда бир ва икки фотонли силжишли чизиқли фотогальваник эффект»** мавзули учинчи бобда ёруғликнинг қутбланиш даражасига боғлиқ бўлган оптик ва фотогальваник эффектлар ҳам назарий, ҳам амалий аспектда бугунги кунда ҳам ўз долзарблигини йўқотмаган ва айни 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 эффиқти деб номланади. Бу эффиқт нафақат зоналараро, балки бир зона ичида кечадиган оптик ўтишлар билан боғлиқ ҳолда кузатилиши мумкин. Бу эффиқтдан фарқли ўлароқ, бир жинсли намуна бир жинсли стационар ёритилганида фотоннинг импульсига боғиқ бўлмаган, бироқ ёруғликнинг қутбланиш даражасига боғлиқ бўлган эффиқтлар ҳам экспериментда кузатилган. Улар чизиқли ва циркуляр фотогальваник эффиқт деб номланади. Бу эффиқтларнинг икки хил тури мавжуд бўлиб, уларнинг бири баллистик, иккинчиси эса силжишли механизмидир. Бу бобда силжишли чизиқли фотогальваник эффиқти хусусида олган тадқиқот натижалари қайд қилинган.

Шунингдек, ўркачсимон яримўтказгичларнинг зонавий тузилиш таҳлиллари бажарилган ҳамда *n-GaРда* чизиқли бир фотонли қутбланган ёруғлик ютилиши спектрал ва температуравий боғланиши

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

кўринишида ҳисобланган. Бу ерда

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

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

$k_{z0} = \frac{\Delta}{2P} \left[ (\hbar\omega/\Delta)^2 - 1 \right]^{1/2}$ ,  $\Delta$  -  $X_1$  ва  $X_3$  тармоқларнинг  $X$  нуқтага тегишли орасидаги энергетик оралик,  $n_{\omega}$  - ёруғликнинг синдириш коэффициенти,  $D$ ,  $B$ ,  $P$  - *n-GaРнинг* зонавий параметрлари. Бундан кўриняптики,  $K_{\parallel}(\omega, T)$  нинг спектрал боғланиши  $k_{z0}$  га пропорционал бўлиб,  $\hbar\omega \rightarrow \Delta$  шартда чексизликка интилевчи  $\left[ (\hbar\omega/\Delta)^2 - 1 \right]^{-1/2}$  муносабат орқали аниқланади. Бундай тур ўзига хослик ўтказувчанлик зонасидаги  $X_1$  пастки тармоқнинг «ўркачсимон» тузилиши билан изоҳланади.

Фотогальваник эффиқтни кристаллнинг симметриясига боғлиқ ҳолда кузатиш мумкин бўлган ҳолларни таҳлил қилиш имконини берувчи феноменологиявий назария қайд қилинган. Сўнгра *n-GaРда* кузатиладиган силжишли чизиқли фотогальваник эффиқт бир фотонли механизмининг микдорий назарияси қурилган.

Барча энергетик воҳалар бўйича улушлари йиғиб олинган натижавий фототок қуидагича ифодаланган

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

бу ерда

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

$N'$ -электронлар концентрацияси,  $K_{\omega}$ -(6-8) ифодалар билан аниқланувчи ва ёруғликнинг ўтказувчанлик зонасига тегишли  $X_1^C$  ва  $X_3^C$  тармоқлариаро оптик ўтишга асосланиб ҳисобланган бир фотонли ютилиш коэффициенти.

Миқдорий ҳисоблашлар шуни кўрсатадики, агар  $A_3 - A_1 = \hbar^2(2m^*)^{-1}$ ,  $m^* = m_1 m_2 (m_1 - m_2)^{-1}$ ,  $m^* = 0,36 m_0$ ,  $\hbar\Omega = 51 \text{ мэВ}$ ,  $\Delta = 335 \text{ \AA}$ ,  $Pa_0 = D$ ,  $a_0 = 5,4 \cdot 10^{-8} \text{ см}$  ( $a_0$ -панжара доимийси),  $T = 200 \text{ K}$ ,  $\hbar\omega = 550 \text{ мэВ}$  каби танланганида силжишли фототоқдан

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

фототоқ миқдоран беш марта катта бўлади. Бу ерда  $m_i^{-1} = 2A_i \hbar^{-2}$ ,  $\eta = \frac{m_1 m_2}{(m_1 - m_2) m_0} (\hbar\omega - \Delta) / (\hbar\Omega)$ ,  $\alpha_{\hat{\sigma}} = \frac{e^2}{\hbar \epsilon^*} \left( \frac{m_1}{2\hbar\Omega} \right)^{1/2}$ , фрелих электрон-фонон ўзаро таъсир домийлиги,  $\tau_{ik}$ -зонанинг  $l (l = X_3, X_1)$  тармоғидаги электрон импульсининг релаксация вақти.

2-расмда  $n\text{-GaP}$  учун чизиқли ФГЭ параметри  $\tilde{D} = \chi/\sigma'$  нинг спектрал боғланишига нисбатан назарий ҳисоблаш тажриба натижалари билан солиштирилган ( $\sigma'$ -намунанинг фотоўтказувчанлиги). Ҳисоблашларда  $T = 300 \text{ K}$ ,  $\epsilon_{\omega} = 9.09$ ,  $n = 2.41 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $m^{*-1} = (m_{\parallel}^{-1} + 2 \cdot m_{\perp}^{-1})/3$ ,  $\epsilon_0 = 11.1$ ,  $\rho = 4.1 \text{ \Omega/cm}^3$ ,  $m_{\perp} = 0.25 m_0$ ,  $m_{\parallel} = 4.85 \cdot m_0$  катталиклар танланган, бу ерда  $m_{\perp}$  ва  $m_{\parallel}$  - электронларнинг (кристалл асосий симметрия ўқига нисбатан танланган) кўндаланг ва бўйлама эффектив массалари. Адабиётлар таҳлилидан шу маълум бўлди,  $\tilde{\epsilon} = 2m_{\parallel} P^2 \hbar^{-2} \Delta^{-1}$  катталик қатор қийматларга эга бўлиши мумкин. Хусусан, миқдорий таҳлилда чизиқли ФГЭ параметри  $\tilde{D} = \chi/\sigma'$  назарий спектрал боғланишининг тажрибага мос келадиган  $\tilde{\epsilon}$  нинг ( $\tilde{\epsilon} = 1,2$ ) қиймати танланди. Шуни таъкидлаш ўринлики,  $\tilde{\epsilon}$  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 фототоқ ифодасидаги электронлар импульсининг релаксация вақти фрелих ўзаро таъсирга

нисбатан ҳисобланди. Шуни таъкидлаш жоизки,  $m_{||}=2m_0$ ,  $T=300$  К,  $n=2.4\cdot10^{17}$  см<sup>-3</sup> миқдорларда баллистиқ чизиқли ФГЭнинг фотонли механизмидаги  $\tilde{D}$  катталик экспериментал натижадан 1.2 марта ортиқ, силжишли улуш эса 1.5 марта ортиқ бўлади.

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

Шунингдек,  $n$ -*GaP*да силжишли фотогальваник эфект 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 қиласди.

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 шуни кўрсатадики, унинг улуси 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

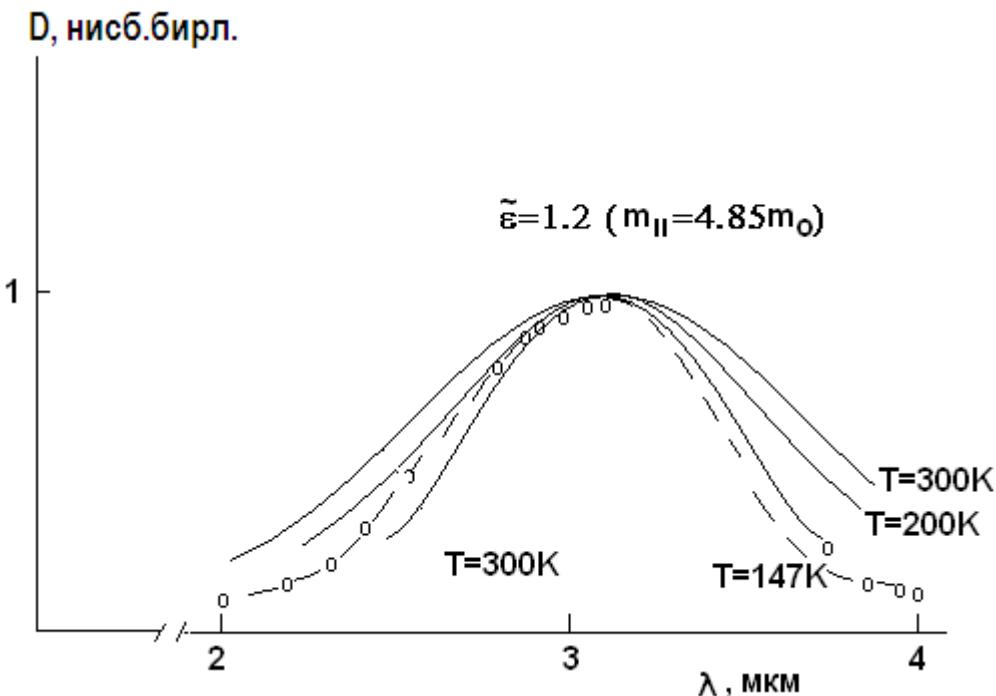
$$\chi_{shift} = -eQK(\omega)/(P\Delta)\Im(\omega, T) \quad (11)$$

ифодага эга бўламиз, бу ерда  $\mu_- = m_{X_1} \cdot m_{X_3} / (m_{X_1} - m_{X_3})$  - электронларнинг келтирилган массаси,  $\alpha$ -нозик структура параметри,  $A_3 = 2A_1$   $I_0 = \frac{2n_\omega}{\pi\alpha} \mu_- \omega^3$ ,  $\Im(\omega, T) = \frac{3}{5} \frac{I}{I_0} \frac{2\hbar\omega - \Delta}{\hbar\omega} \left( \frac{2\hbar\omega - \Delta}{\hbar\omega - \Delta} \right)^{3/2} e^{-\frac{2\hbar\omega}{k_B T}} \left( 1 + e^{-\frac{\hbar\omega}{k_B T}} \right)$ ,  $m_{X_1}(m_{X_3}) - X_1(X_3)$  тармоқдаги электронларнинг эфектив массаси,  $P, Q$ -зонавий параметрлар,  $\chi_{shift}$  - чизиқли ФГЭ тензори,  $R_\alpha = \frac{P}{Q} \frac{\hbar\omega}{\Delta} 2e_\beta e_\gamma \epsilon_{\alpha\beta\gamma}$ ,  $\epsilon_{\alpha\beta\gamma}$  - Ливи-Чивит тензори ( $\alpha, \beta, \gamma = x, y, z$ ).

Бобнинг охирода унга тегишли хулосалар қайд қилинган.

**«Яримўтказгичда кўп фотонли ёруғлик ютилишининг чизиқли циркуляр дихроизми»** номли тўртинчи бобда ёруғлик тўрт фотонли ютилишининг чизиқли циркуляр дихроизми, яъни ясси (чизиқли) кутбланган

ёруғлик ютилганида фотоуйғотилған ток ташувчилар импульсига күра тизгиналашиши, циркуляр (эллиптиқ) қутбланган ёруғлик ютилганида эса улар момент(спин)ларининг ориентацияланишига боғлиқ оптик ҳодисалар назарий тадқиқ қилинганды. Хусусан, ясси қутбланган ёруғлик ютилиш эҳтимоллигининг циркуляр қутбланган ёруғлик ютилиш эҳтимоллигига нисбати билан аниқланадиган коэффициент, чизиқли циркуляр дихроизм коэффициенти ҳисобланады; уларнинг феноменологиявий таҳлиллари бажарылған. Шунингдек, ёруғликнинг күп ( $N$ ) фотонли зоналараро ютилишида

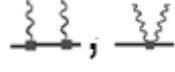
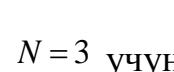


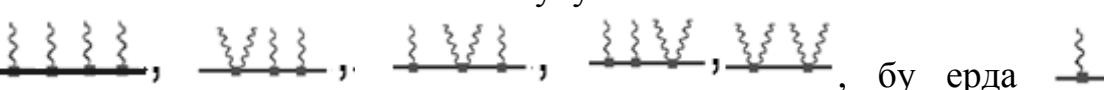
**2-расм.**  $n$ - $GaP$  үчүн чизиқли ФГЭ параметри  $\tilde{D} = \frac{\chi}{\sigma'}$ , нинг матнда қайд қилинганды катталикларга нисбатан назарий ва тажрибавий спектрал боғланишлари, бу ерда  $\chi$  чизиқли ФГЭ тензори ((11) формулага к.),  $\sigma'$ -намунанинг фотоүтказувчанлиги; бутун чизиқлар назарий, доирачалар тажриба натижалари.

чизиқли циркуляр дихроизми күйидагича сифатли таҳлил қилинганды. Циркуляр қутбланган ёруғликда фотонлар  $\hbar\vec{q}$  импульси йўналишига нисбатан аниқ бир бурчакли моментга (масалан, спинга) эга бўлади. Агар бурчакли моментнинг сақланиш қонуни циркуляр қутбланган ёруғлик учун эътиборга олинса, у ҳолда  $\sigma_+$  қутбланишда у  $(+1)$  ва  $\sigma_-$  қутбланишда  $(-1)$  қиймат қабул қиласи. Чизиқли (ёки ясси) қутбланган ёруғликда фотон бурчакли моментининг  $\vec{q}$  тўлқин векторига нисбатан проекцияси мавжуд бўлмайди. Таъкидлаймизки, чизиқли ва циркуляр қутбланган ёруғликнинг кўп квантли ютилишида системанинг (атом ёки кристаллдаги электронларнинг) оралиқ (виртуал) ҳолатлари ҳар хил бўлади. Хусусан, циркуляр қутбланган ёруғлик таъсирида  $m$  сонли фотонларнинг ютилишида ( $m\langle N \rangle$ ) система нолдан фарқли ҳаракат миқдори моментига эга бўлади. Бу оптик ориентирланган система билан навбатдаги  $(m+1)$ -фотон ўзаро таъсирилашишини англашади. Шунингдек, ток ташувчилар ҳаракат миқдори

моменти проекцияларига нисбатан олинган танлаш қоидасига кўра икки ёки кўп фотонли ютилиш ёруғликнинг қутбланиш 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 чизиқли циркуляр дихроизми ҳатто изотроп энергетик спектр яқинлашишида ҳам кузатилиши керак. Бироқ ёруғликнинг бир фотонли ютилиш коэффициенти унинг қутбланиш табиатига боғлиқ бўлмайди.

Ёруғликнинг  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  частотали ва  $\vec{e}_1$ ,  $\vec{e}_2$  қутбланишли манбалари мавжуд ҳолда оптик ўтиш эҳтимоллиги учун  $W_{cv}^{(N=2)}(\vec{e}_1, \vec{e}_2; \omega_1, \omega_2) \propto (\omega_1^{-2} + \omega_2^{-2} + \omega_1^{-1} \omega_2^{-1} |\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2^*|^2)$  муносабат келиб чиқади. Бундан кўриняптики, оддий зонали яримўтказгичларда чизиқли циркуляр дихроизми кузатилмайди, чунки бу ҳолда чизиқли ва циркуляр қутблашган 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 «ўркачсимон» бўлиши ёки коваклар эфектив массаси анизатропиясига эътибор қаратилса, у ҳолда ёруғлик ютилишининг чизиқли 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  $p\text{-GaAs}$  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 қиласиз.  $\|M_{m,m'}^{(N)}\|$ ни хисоблашда 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 улуси  $\sqrt{3}Bm_0^2 e_z e_{\mp}^2 / \hbar^2$ ,  $(\pm 3/2) \Rightarrow (\mp 1/2)$  тур ўтишларнинг улуси эса  $\frac{\sqrt{3}}{2}Bm_0^2 (e_{\mp}^2)^2 / \hbar^2$  муносабатлар билан ифодаланади.

Ёруғликнинг кўп фотонли ютилиш коэффициентларининг температуравий боғланишларини солиштириш имконини берувчи  $N'$  ва  $N$  фотонли ютилишларга тегишли ютилиш коэффициентлари 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

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

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

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

бу ерда

$$\Xi_{m'm}^{(4,1)} = \frac{\sum_{m'=\pm 1/2, m=\pm 3/2} \left\langle \left| M_{m'm}^{(4)}(\vec{k}) \right|^2 \right\rangle}{\sum_{m'=\pm 1/2, m=\pm 3/2} \left\langle \left| M_{m'm}^{(1)}(\vec{k}) \right|^2 \right\rangle} = \frac{\varepsilon^3}{315} \begin{cases} 12298 & \text{ясси кутбланиш учун,} \\ 11008 & \text{циркуляр кутбланиш учун,} \end{cases}$$

$K^{(1)}$ - ёруғликнинг тўйиниши эътиборга олинмаган ҳолда ҳисобланган бир фотонли ютилиш коэффициенти бўлиб, унинг температуравий боғланишидаги экстремал қиймати қўйидаги 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 коэффициенти қўйидаги ифода ёрдамида аниқланади

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

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

$N=1$  ҳол учун қўйидаги муносабат ўринли бўлади

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

бу ерда ютилиш коэффициентига (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  $\beta_\omega = \alpha_\omega \left( \frac{eA_0}{c\hbar} \right)^2 \frac{B}{\hbar\omega}$  белгилашлар киритилса,

у ҳолда ютилиш коэффициентларга улуш берадиган катталиклар учун қуидаги натижаларни оламиз

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

Охирги муносабатлардан кўриняптики, (17) ифода ҳар бир натижавий ютилиш коэффициентига, яъни чизиқли циркуляр дихроизмга ўз улушкини беради. Хусусан, икки фотонли тўйиниш эфектининг натижавий ютилиш коэффициентига берган улуси

$$\begin{aligned}
 \sum_{m'=\pm 1/2, m=\pm 3/2} \left\langle \delta \left| M_{m'm}^{(N=2)}(\vec{k}) \right|^2 \right\rangle &= -\frac{9}{4} \frac{\alpha_\omega}{\hbar^2\omega^2} \left( \frac{eA_0}{c\hbar} \right)^8 B^4 \left\langle \left( \left| e'_\pm \right|^4 + 1296 \left| e'_+ e'_- \right|^4 \right) \right\rangle = \\
 = -\frac{1}{315} \frac{\alpha_\omega}{\hbar^2\omega^2} \left( \frac{eA_0}{c\hbar} \right)^8 B^4 \left\{ \begin{array}{ll} 23616 & \text{ясси кутбланиш учун,} \\ 36011 & \text{циркуляр кутбланиш учун.} \end{array} \right.
 \end{aligned} \tag{18}$$

Бу ҳол учун чизиқли 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 чизиқли 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 қиласи.

## ХУЛОСА

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

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

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 эфект токи спектрал ва температуравий боғланишларнинг математик ифодалари аниқланган. Фототокнинг температуравий боғланиши мос ҳолда ёруғликнинг бир ва икки фотонли ютилиш коэффициентининг температуравий боғланиши билан ифодаланиши кўрсатилган.

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

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

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

7. Яримўтказгичда тўрт фотонли ютилишнинг чизиқли циркуляр дихроизми оптик ўтишлар турига боғлиқ ҳолда хисобланган. Мураккаб валент зонали яримўтказгичда ёруғликнинг икки фотонли ютилиши хисобланган бўлиб, когерентли тўйиниш эфектида  $(+3/2, \vec{k}) \Rightarrow (+1/2, \vec{k})$  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  
УЧЕНЫЙ 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. Мукими.

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

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

**Официальные оппоненты:** **Мамадалимов Абдуугафур Тешабаевич**  
доктор физико-математических наук, академик  
**Дадамирзаев Мухаммаджон Гуломкодирович**  
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](mailto: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](mailto: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 Узбекистанделено 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 настоящеедиссертационное 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, организаций, 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  $n\text{-GaP}$ , 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.Глассом (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.Hermanом (Германия) и A.F.Gibsonом (США) в  $GaP$ , G.Ribakovs, A.A.Gudjianом (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.Белиничем, 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 четырёхфотонного 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 четырёхфотонного 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:

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

определен сдвиговый 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 четырёхфотонного поглощения света в *p-GaAs*. на основе микроскопической теории

**Практические результаты исследования.** Научные результаты, полученные в диссертации:

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

оптимизируются голограммические 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 выявленны 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 os photodiodes fabricated by coating a conductive polimer 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 фонах 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 фонах 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 ассимметричных полупроводниковых структурах. Проанализированы симметричная и ассимметричная 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 ассимметрии объемной, структурной и интерфейсной инверсии. Однако, не были теоретически исследованы влияние особенности зонной структуры полупроводника на одно- и двухфотонный сдвиговый 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 фонах 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

$$\frac{1}{\tau_{2D}^{(n',n)}} = \frac{2\pi}{\hbar} |M_D|^2 g^{(2D)} \Phi_{\vec{k}'_{\perp}, \vec{k}_{\perp}}^{(n',n)} (+, q_z).$$
 Здесь  $g^{(2D)} = m^*/(2\pi\hbar^2)$ -плотность состояний двумерных электронов,  $m^*$ - их эффективная масса,  $\Phi_{\vec{k}'_{\perp}, \vec{k}_{\perp}}^{(n',n)} (\pm) = \int_{-\infty}^{+\infty} |Y_{\vec{k}'_{\perp}, \vec{k}_{\perp}}^{(n',n)} (\pm)|^2 \frac{dq_z}{2\pi}$ ,  $q_z$ - $z$  составляющая волнового вектора фона.

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

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

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

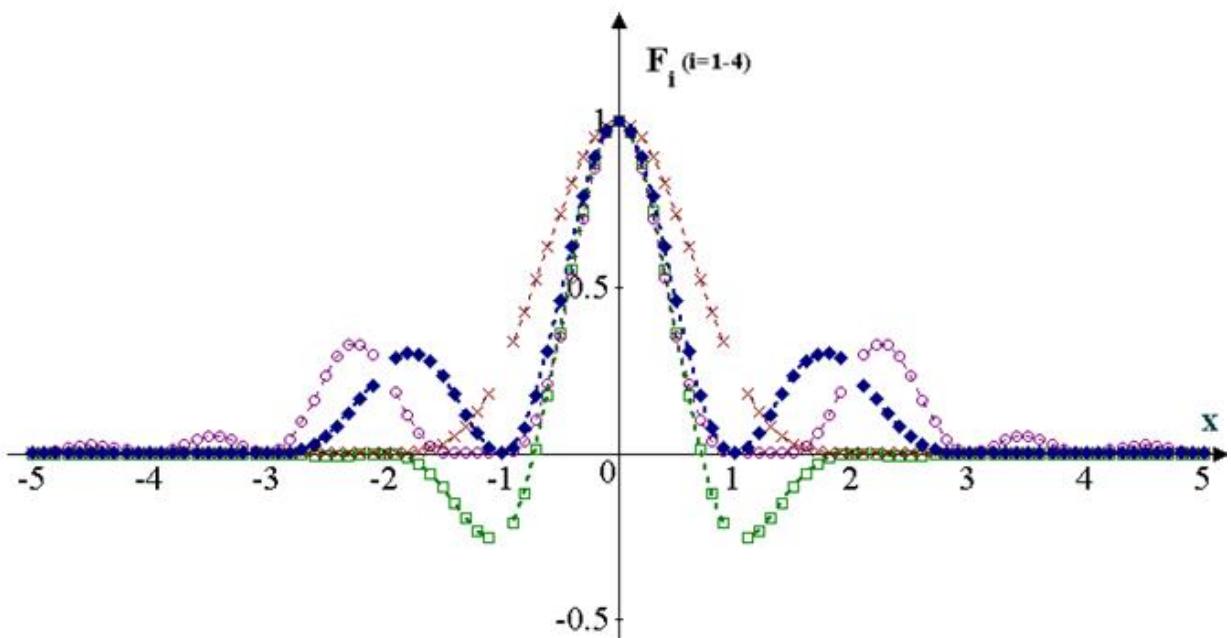


Рис.1. График зависимости функции  $F_i (i=1 \div 4)$  от  $x$ , где  $\times - F_1(x; n' = n = 1)$ ,

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

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  $\vec{q}$  вектора<sup>1</sup>.

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  $F_{l\vec{k}}^{(n)}$  неравновесной функции распределения, с помощью которого можно определить параметры кинетических явлений, протекающих в многослойных структурах полупроводников со сложной валентной зоной в виде

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

Здесь  $e$ -заряд дырок,  $\vec{p} = \hbar\vec{k}$ ,  $\vec{v}_{l\vec{k}}^{(n)} = \nabla_{\vec{p}} E_{l\vec{k}}^{(n)}$  - их групповая скорость,  $F_{l\vec{k}}$  - функция распределения,  $E_{l\vec{k}}$  - энергия дырок в состоянии  $|nl\vec{k}\rangle$ ,  $W_{n'l'\vec{k}',n'l\vec{k}}$  - 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.

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

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

---

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

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

Из (5) видно, что изменение функции распределения дырок, рассеиваемых на неоднородностях (например, на фононах 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 наблюдены 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

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

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

$k_{z0} = \frac{\Delta}{2P} \left[ (\hbar \omega / \Delta)^2 - 1 \right]^{1/2}$ ,  $\Delta$  - энергетический зазор между ветвями  $X_1$  и  $X_3$  в точке  $X$ ,  $n_{\omega}$  - 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  $\left[ (\hbar \omega / \Delta)^2 - 1 \right]^{-1/2}$  при условии  $\hbar \omega \rightarrow \Delta$ . Такая особенность объясняется «горбообразностью» нижней подзоны  $X_1$  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

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

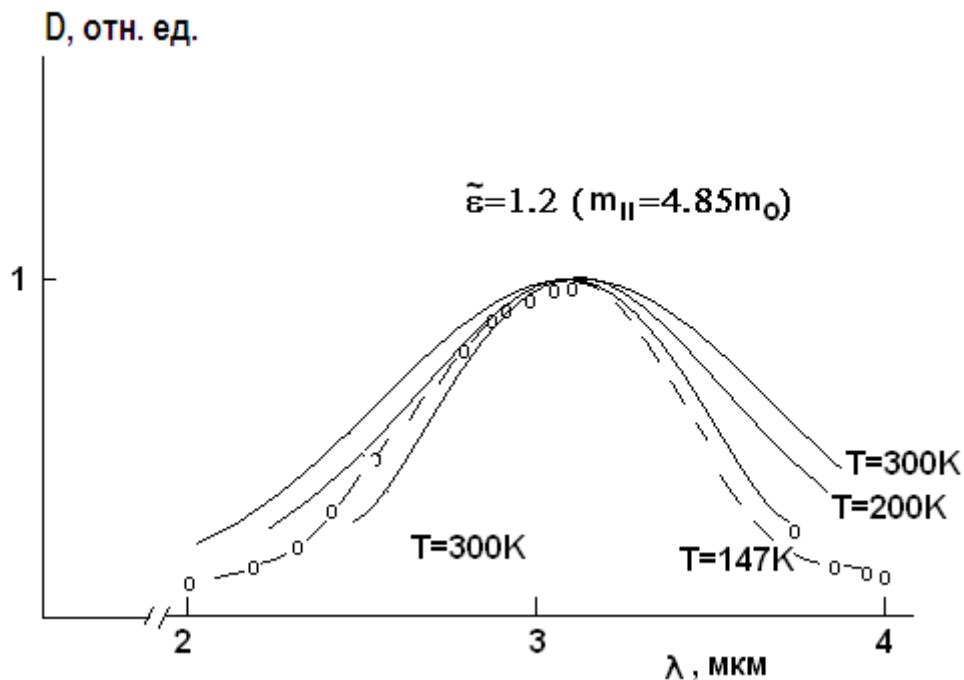
$N'$ -концентрация электронов,  $K_{\omega}$ -однофотонный коэффициент поглощения света, определяемый формулами (6-8) и оптическими переходами между ветвями  $X_1^C$  и  $X_3^C$  зоны проводимости.

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

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

и он в пять раз больше чем сдвиговый. Здесь  $m_i^{-1} = 2A_i \hbar^{-2}$ ,  $\eta = \frac{m_1 m_2}{(m_1 - m_2) m_0} (\hbar \omega - \Delta) / (\hbar \Omega)$ ,  $\alpha_{\hat{\alpha}} = \frac{e^2}{\hbar \varepsilon^*} \left( \frac{m_1}{2 \hbar \Omega} \right)^{1/2}$  - фрелиховская константа электрон-фононного взаимодействия,  $\tau_{lk}$  - 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 ( $\sigma'$ -фотопроводимость образца). В расчетах использованы величины  $T=300\text{K}$ ,  $\epsilon_\omega = 9.09$ ,  $n = 2.41 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $m^{*-1} = (m_\parallel^{-1} + 2 \cdot m_\perp^{-1})/3$ ,  $\epsilon_0 = 11.1$ ,  $\rho = 4.1 \text{ g/cm}^3$ ,  $m_\perp = 0.25m_0$ ,  $m_\parallel = 4.85 \cdot m_0$ , где  $m_\perp$  –  $m_\parallel$  - 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  $\chi$  - тензор линейного ФГЭ (см. формулу (11)),  $\sigma'$ -фотопроводимость образца, сплошные линии – теоретические, кружки-экспериментальные результаты.

Из анализа литературы стало известно, что величина  $\tilde{\epsilon} = 2m_\parallel P^2 \hbar^{-2} \Delta^{-1}$  может иметь несколько значений. В частности, в количественном анализе выбрано значение величины  $\tilde{\epsilon}$  так ( $\tilde{\epsilon} = 1.2$ ), чтобы теоретическая спектральная зависимость параметра линейного ФГЭ  $\tilde{D} = \chi/\sigma'$  хорошо согласовывалась с экспериментальной. Уместно отметить, что в области значений  $\tilde{\epsilon}$  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 фрелиховское 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 сдвиговый 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 сдвиговый 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

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

или

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

где  $\mu_- = m_{X_1} \cdot m_{X_3} / (m_{X_1} - m_{X_3})$  - приведенная масса электронов,  $\alpha$ -параметр тонкой структуры,  $m_{X_1}$  ( $m_{X_3}$ ) - эффективная масса электронов в подзоне  $X_1$  ( $X_3$ ),  $A_3 = 2A_1$ ,  $I_0 = \frac{2n_\omega}{\pi\alpha} \mu_- \omega^3$ ,  $\Im(\omega, T) = \frac{3}{5} \frac{I}{I_0} \frac{2\hbar\omega - \Delta}{\hbar\omega} \left( \frac{2\hbar\omega - \Delta}{\hbar\omega - \Delta} \right)^{3/2} e^{-\frac{2\hbar\omega}{k_B T}} \left( 1 + e^{-\frac{\hbar\omega}{k_B T}} \right)$ ,

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

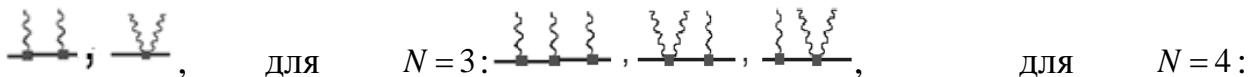
В заключение главы приведены соответствующие выводы.

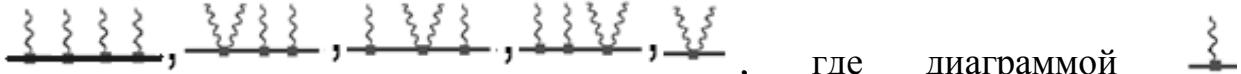
В четвертой главе «Линейно-циркулярный дихроизм многофотонного поглощения в полупроводнике» теоретически проанализирован линейно-циркулярный дихроизм четырехфотонного поглощения света, т.е. оптические явления, связанные с выстраиванием по импульсу носителей тока при поглощении плоско(линейно) поляризованного 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  $\sigma_+$  поляризации и (-1) для  $\sigma_-$  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 ( $m\langle N \rangle$ ) 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  $\omega_1, \omega_2$  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 приведим выражения для  $N$  фотонного матричного элемента. При расчете  $\|M_{m,m}^{(N)}\|$  учтены следующие фейнмановские диаграммы: для  $N=2$ :





изображено однофотонное, а 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

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

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

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

здесь

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

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

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

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

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

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

Далее рассмотрим область умеренной интенсивности, где можно использовать теорию возмущений. Тогда, разлагая радикал в (15) в ряд по  $4 \frac{\alpha_\omega}{\hbar^2 \omega^2} \left| M_{m'm}^{(N)}(\vec{k}) \right|^2$ , 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 выращения 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 двухфотонного 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](http://www.adu.uz)) and on the «Ziyonet» Information and educational portal ([www.ziyonet.uz](http://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](mailto: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](mailto: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 polymer 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 maked 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 maked 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 сдвиговый 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. – 20<sup>th</sup> 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. – 20<sup>th</sup> - 21<sup>st</sup> April, 2016. – P. 18-22.
16. Мамадалиев Б., Коканбаев И.М., Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Эшболтаев И. Сдвиговый линейный фотогальванический эффект в полупроводниках с учетом эффекта резонансного насыщения / Материалы III Международной конференции по оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- иnanoструктурах. – Фергана. – 14-15 ноября 2014 г. – С. 116-119.

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидағи нусхалари  
Андижон давлат университетининг «Илмий хабарнома» журнали  
тахририятида таҳрирдан ўтказилди.  
(1.05.2018 йил)

Босишига руҳсат этилди: 14.05.2018 йил.  
Бичими 60x84  $1/16$ , «Times New Roman»  
гарнитурада рақамли босма усулида босилди.  
Шартли босма табоби 2,9. Адади: 100. Буюртма: № 166.

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»  
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.