

**ФАРҒОНА ПОЛИТЕХНИКА ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ФИЗИКА-
МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ҚЎҚОН ДАВЛАТ ПЕДАГОГИКА ИНСТИТУТИ

СУЛТОНОВ РАВШАНЖОН РУСТАМОВИЧ

**ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКЛАРДА ЁРУҒЛИКНИНГ НОЧИЗИҚЛИ
ЮТИЛИШИ, ИККИ ФОТОНЛИ БАЛЛИСТИК ТОҚ ВА ЎЛЧАМЛИ
КВАНТЛАШИШ**

01.04.07 – Конденсирланган ҳолат физикаси

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

Фарғона – 2020

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

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

**Content of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD) on
physical and mathematical sciences**

Султонов Равшанжон Рустамович

Пьезоэлектрикларда ёруғликнинг нозиклиги ютилиши, икки
фотонли баллистик ток ва ўлчамли квантлашиш..... 3

Султонов Равшанжон Рустамович

Нелинейное поглощение света, двухфотонный баллистический
ток и размерное квантование в пьезоэлектриках..... 22

Sultonov Ravshanjon Rustamovich

Nonlinear absorption of light, two photonic ballistic current and
dimensional quantation in piezoelectrics..... 41

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works..... 48

**ФАРҒОНА ПОЛИТЕХНИКА ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ФИЗИКА -
МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ҚЎҚОН ДАВЛАТ ПЕДАГОГИКА ИНСТИТУТИ

СУЛТОНОВ РАВШАНЖОН РУСТАМОВИЧ

**ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКЛАРДА ЁРУҒЛИКНИНГ НОЧИЗИҚЛИ
ЮТИЛИШИ, ИККИ ФОТОНЛИ БАЛЛИСТИК ТОҚ ВА ЎЛЧАМЛИ
КВАНТЛАШИШ**

01.04.07 – Конденсирланган ҳолат физикаси

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

Фарғона – 2020

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси **Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2020.2.PhD/FM487** рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Кўкон давлат педагогика институтида бажарилган.

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

Илмий раҳбар:	Расулов Воҳоб Рустамович физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD), доцент
Расмий оппонентлар:	Аюханов Рашид Ахметович физика-математика фанлари доктори. Султонов Номонжон Акрамович физика-математика фанлари доктори, профессор.
Етакчи ташкилот:	И.Каримов номидаги Тошкент давлат техника университети

Диссертация ҳимояси PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 рақамли Илмий Кенгашнинг 2020 йил «6» кўк.б.р.б соат 14:00 даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 150107, Ўзбекистон, Фарғона шаҳри, Фарғона кўчаси, 86-уй. Тел.: (99873) 241-13-03. Факс: (99873) 241-12-06; e-mail: ferpi_info@edu.uz, Фарғона политехника институти мажлислар зали).

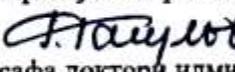
Диссертация билан Фарғона политехника институти Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (0001-A рақам билан рўйхатга олинган). (Манзил: 150107, Фарғона шаҳри, Фарғона кўчаси, 86-уй. Тел.: (99873) 241-13-03).

Диссертация автореферати 2020 йил «24» окт.б.р.б куни тарқатилди.
(2020 йил «24» окт.б.р.б даги PhD/FM-01 рақамли реєстр баённомаси)




Н.Х.Юлдашев
Фалсафа доктори илмий даражасини берувчи
Илмий Кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., профессор


Б.З.Полвонов
Фалсафа доктори илмий даражасини берувчи
Илмий Кенгаш котиби, физика математика
фанлари бўйича фалсафа доктори, доцент


Р.Я.Расулов
Фалсафа доктори илмий даражасини берувчи
Илмий Кенгаш қошидаги илмий семинар
раиси, ф.-м.ф.д., профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Ҳозирги вақтда ҳажмий ва паст ўлчамли қаттиқ жисмлар электроникаси, хусусан, наноэлектрониканинг жадал суръатлар билан ривожланишида пьезоэлектрик кристаллар – пьезокристаллар муҳим ўрин эгаллайди. Бу ҳол қутбланган ёруғликнинг ютилишида электрон ва коваклар спинлари ҳамда импульсларининг тизгинлашиши билан тавсифланувчи ток ташувчиларнинг номувозанат ҳолатга ўтиши ҳисобига квазизарралар ва улар спинларининг ноҳолдан фарқли оқимлари содир бўлиши билан боғланган. Мувозанат ҳолатга релаксацияланишда иштирок этадиган бундай кинетик жараёнлар уч ва паст ўлчамли яримўтказгичлардан тайёрланган қурилмаларда содир бўладиган оптик ҳодисаларда ўз аксини топади.

Қаттиқ жисмлар технологияси параметр ва хоссалари аввалдан танланган пьезокристаллардан фойдаланган ҳолда ҳозирги замон қурилмаларини яратиш имкониятини яратмоқда. Хусусан, симметрия маркази бўлмаган муҳитларда кузатилган қутбий фототок тадқиқотларидан голографияда маълумотларни нафақат ёруғликнинг интенсивлигига кўра, балки ёруғликнинг қутбланиш даражасига нисбатан ҳам ёзиш имкониятини яратди. Бу борадаги муваффақиятлар яримўтказгичли фотоника соҳасига кўшимча, сезиларли туртки берди. Айни пайтда оптоэлектроника ва фотоника соҳаларидаги асосий масалалардан бири пьезокристаллар ва уларнинг наноструктураларидаги ток ташувчилар билан қутбланган ёруғликнинг ўзаро таъсирини тадқиқ қилишдир. Шу сабабли бундай тадқиқотлар наноэлектроника, фотоника ва спинтроникада нафақат янги йўналишларни очади, балки фундаментал илмий тадқиқот олиб бориш имкониятини ҳам яратади. Шунинг учун ҳажмий ва ўлчамли квантлашган мураккаб зонали яримўтказгичлардаги қутбланган ёруғлик таъсиридаги кинетик ҳодисаларни тадқиқ этиш актуал бўлиб, диссертацияда қўйилган муаммоларни ҳал этиш учун асос бўлиб хизмат қилади.

Мамлакатимизнинг мустақиллик йилларида илм-фан соҳасидаги устувор йўналишларда, жумладан, «Қайта тикланувчи энергия манбаларидан фойдаланишни ривожлантириш»да икки ва уч ўлчамли яримўтказгичлар ва уларнинг структураларида содир бўладиган ёруғликнинг қутбланишига боғланган оптик ва фотонли кинетик ҳодисаларни ўрганиш бўйича муҳим натижалар олинди. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясига кўра, илмий тадқиқот ва инновацион фаолиятни ривожлантириш, илмий ва инновацион ютуқларни амалиётга жорий этишнинг эффектив механизмларини яратиш масалаларига оид муаммоларни ҳал қилишга алоҳида эътибор қаратилган.

Мазкур диссертация иши Ўзбекистон Республикаси Президентининг фармонлари ва қарорлари, жумладан, 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2018 йил 17 июлидаги ПҚ-3855-сон

«Илмий ва илмий-техникавий фаолият натижаларини тижоратлаштириш самарадорлигини ошириш бўйича кўшимча чора-тадбирлар тўғрисида»ги, 2018 йил 6 августдаги ПҚ-3899-сон «Илмий ва инновацион фаолиятни интеграциялаш тизимининг самарадорлигини ошириш бўйича чора-тадбирлар тўғрисида»ги ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон «Фанлар академияси фаолияти, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги қарорлари талабларига мос тушади.

Тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялар тараққиётининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот иши Республика фан ва технологиялар тараққиётининг “Ш. Қайта тикланувчи энергия манбаларидан фойдаланишни ривожлантириш” устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Ҳажмий қаттиқ жисм ва уларнинг ўлчамли квантлашган структураларида кутбий оптик ва ФГЭлар тўғрисида тадқиқотлар жаҳоннинг илғор мамлакатлари илмий тадқиқот марказлари ва университетларида олиб борилмоқда. Хусусан, А.М.Гласс (АҚШ) ва В.М.Фридкин (Москва, Россия) томонидан бир жинсли сегнетоэлектрикларда ФГЭ экспериментал тадқиқ этилиб, намуна бир жинсли кутбланган ёруғлик билан ёритилганида, аномал катта стационар фотокучланиш бир неча соат кузатилган. Бундай ҳодисалар тажрибада К.Х.Херман (Германия) ва А.Ф.Гибсон (АҚШ) *GaP* да, А.А.Рогачев (Санкт-Петербург, Россия) теллурда, Ж.М.Довиак ва С.Котари (АҚШ), С.Д.Ганичев (Регензбург, Германия), А.В.Андрианов ва И.Д.Ярошецкий (Санкт-Петербург, Россия) *p-GaAs* да кузатишган.

Россия ФАнинг академиги Ю.В.Копяев, мухбир аъзолари Е.Л.Ивченко, М.М.Глазов, профессорлар Г.Е.Пикус, Н.С.Аверкиев, Л.Е.Голуб, С.А.Тарасенко (Санкт-Петербург, Россия) ва В.И.Белиничер, И.Д.Стурман, Л.И.Магарилл, М.В.Энтин (Новосибирск, Россия) раҳбарлик қилган бир гуруҳ олимлар томонидан циркуляр ва чизиқли ҳамда спин боғланган ФГЭлар механизмлари ҳажмий ва паст ўлчамли қаттиқ жисм ва сегнетоэлектрикларда назарий ўрганилган. ФотоЭЮК симметрия маркази бўлмаган бир жинсли муҳитлардаги ток ташувчиларнинг фонлар, фотонлар ёки киришмаларда сочилиш актининг асимметрияси билан боғланганлиги тадқиқ этилган.

Шунинг билан бир қаторда пьезоэлектрик зонавий тузилишининг мураккаблиги ҳамда ёруғлик кутбланиш ҳолатига боғлиқ бўлган оптик ва фотогальваник эффект механизмлари, баллистик чизиқли фотогальваник эффектнинг икки фотонли оптик ўтишларга ва кристалл зонасининг ўзига хослигига боғлиқ механизмлари, пьезоэлектрик кристалларда ёруғликнинг нозизиқли ютилиши ва уларга мос чизиқли циркуляр дихроизм каби эффектларнинг микроскопик назарияси ўрганилмаган. Шунинг учун бу йўналишда синчковлик билан илмий изланишлар олиб бориш талаб этилади ва бундай масалалар ушбу диссертацияда назарий тадқиқ этилган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти ОТ-Ф2 (Физика ва астрономия) тартиб рақамли «Яримўтказгичлар ва уларнинг ўлчамли квантлашган ўраларида кутбий оптик самаралар» мавзусидаги (2007-2011 йй.), Ўзбекистон Республикаси ФА Президиуми қошидаги фундаментал тадқиқотларни қўллаб-қувватлаш фондининг (ФПФИ) 79-06 тартиб рақамли «Яримўтказгичлар ва яримўтказгичли наноструктураларнинг кутбланишган фотонлар иштирокидаги кинетик хоссаларининг назарий тадқиқи» мавзусидаги (2006-2010 йй.) фундаментал тадқиқот грантлари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади пьезокристалларда кутбланишган ёруғлик таъсирида содир бўлувчи икки ва уч фотонли оптик ва чизиқли фотогальваник эффектларнинг механизмларини, шунингдек, спин боғланган ўлчамли квантлашишни тадқиқ қилишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

мураккаб зонали пьезокристалларда кўп фотонли оптик ҳамда баллистик ФГЭларнинг механизмларини тадқиқ қилиш;

пьезокристалларда электронларнинг фонларда асимметриявий сочилишига боғлиқ ҳолда икки фотонли баллистик чизиқли ФГЭнинг механизмларини тадқиқ қилиш;

пьезокристалларда кутбий боғлиқ фототокнинг спектрал ёки температуравий боғланишларига нисбатан назарий ҳисобланган натижаларни тажриба натижалари билан солиштириш;

пьезокристалларда электронлар энергетик спектрининг спинга боғлиқ ўлчамли квантлашишини ўрганиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида икки ва уч ўлчамли ковак ўтказувчанликли куб симметрияли пьезояримўтказгичлар олинган.

Тадқиқотнинг предмети пьезокристалларда ёруғликнинг кутбланиш ҳолатига боғлиқ фотонли кинетик жараёнлар: уч ва тўрт фотонли ютилишнинг чизиқли циркуляр дихроизм ҳамда икки фотонли баллистик ФГЭлардан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот масалаларини ҳал этишда қаттиқ жисмлар назарияси ва физикавий кинетиканинг ҳисоблаш методлари: Келдишнинг диаграммалар техникаси, ташиш матрицалари назарияси ва зичлик матрицаси, кўзғалишлар назарияси, квант механикасининг олтин қоидаси, Больцманнинг кинетик тенгламасидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

илк марта тетраэдр симметрияли пьезокристалларда бир вақтда уч фотонли ютилишни эътиборга олган ҳолда куб симметрияли пьезокристалларда уч ва тўрт фотонли чизиқли циркуляр дихроизмининг спектрал боғланиши, ёруғлик икки ва уч фотонли ютилиш коэффициентининг спектрал ва температуравий боғланишлари ҳисобланган;

илк марта бир вақтнинг ўзида икки фотонли ютилишни эътиборга олган ҳолда Келдишнинг диаграммалар техникаси асосида пьезокристалларда икки фотонли чизиқли фотогальваник эффектнинг баллистик механизми яратилган;

икки фотонли баллистик ток ковакларининг эффектив гамильтонианида тўлқин векторга нисбатан чизиқли, квадратик ва кубинчи ҳадлар эътиборга олинганида содир бўлиши исботланган;

пьезокристалларда спин боғланган ўлчамли квантлашишни эътиборга олган ҳолда ток ташувчилар энергетик спектри ҳисобланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

икки фотонли оптик ва фотогальваник эффектлар натижаларини татбиқ этиш билан ахборотларни голографик ёзиш, хотирада сақлаш ва қайта ишлаш қурилмалари, оптоэлектрон системаларнинг оптик хусусиятлари оптималлаштирилган;

кўп қатламли пьезокристалларда ўлчамли квантлашиш ва тунелланишнинг ҳисоблаш усуллари пьезокристаллардаги паст ўлчамли электронлар тизимига қўлланилган;

физикавий кинетиканинг фотонли кинетик эффектлар бўйича олиб бориладиган экспериментал натижалар интерпретацияларининг асоси бўлган паст ўлчамли ток ташувчилар системасида ва инверсия маркази бўлмаган кристаллардаги ҳисоблаш усуллари ривожлантирилган.

Олинган натижаларнинг ишончилиги олинган ҳисоблаш натижаларининг фотогальваника соҳасидаги етакчи мутахассислар томонидан бажарилган тажриба натижаларига мос тушиши, квант статистик физика ва физикавий кинетиканинг ҳисоблаш методларидан фойдаланилган математик ҳисоблашларнинг қатъийлиги, номувозанатдаги электронлар системаси учун қаттиқ жисмлар назариясидаги диаграммалар техникасидан фойдаланилганлиги, текшириш объектининг тўғри танланганлиги билан асосланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Диссертация натижаларининг илмий аҳамияти пьезокристалларда ёруғликнинг кўп фотонли ютилиш коэффициентининг ҳамда икки фотонли баллистик чизиқли фотогальваник эффект токининг қутбий, спектрал ва температуравий боғланишлари, шунингдек, ўлчамли квантлашган пьезокристалларнинг электрон хоссалари ҳақида янги маълумотлар беришда ўз ифодасини топади.

Ишнинг амалий аҳамияти оптик ва фотогальваник эффектлар қўлланилган қутбланган нурланиш регистрациясининг частотали диапазонини орттириш ва регистрацияни нафақат ёруғликнинг интенсивлигига нисбатан, балки унинг қутбланишига нисбатан ҳам олиб бориш мумкинлигида ўз ифодасини топади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Пьезокристалларда ёруғликнинг ночизиқли ютилиши, икки фотонли баллистик ток ҳамда ўлчамли квантлашиш эффектини тадқиқ қилиш бўйича олинган натижалар асосида:

ҳажмий пьезокристал ҳамда ўлчамли квантлашган структураларда содир бўладиган ва ёруғликнинг кутбланиш ҳолатига боғлиқ бўлган оптик ва фотоэлектрик ҳодисалар соҳасида олиб борилган тадқиқот натижалари ОТ-Ф2-71 «Ўта юқори частотали электромагнит майдондаги деформацияланган р-п ўтиш вольт-ампер характеристикасига ёруғликнинг таъсирини тадқиқ қилиш» мавзусидаги грант лойиҳасида пьезокристалл пардалардаги ток ташувчилар оқимиغا электромагнит тўлқинларнинг таъсирини тушунтиришда фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2020 йил 27 июлдаги 89-03-2653-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш электромагнит майдон таъсиридаги пьезокристалли пардаларда ток ташишнинг физикавий хусусиятларини тушунтириш имконини берган;

пьезокристалларда кутбланган ёруғликнинг бир ва икки фотонли ночизикли ютилиши бўйича олинган ҳисоблаш натижалари Ф2-ОТ-О-1594 рақамли «Экситонларни, поляронларни ва биполяронларни ва кўчиш ҳодисаларини тадқиқ этиш асосида нурлатгичлар, фотоэлементлар ва бошқа турдаги оптоэлектрон асбобларнинг самарадорлигини яхшилаш» мавзусидаги грант лойиҳасида пьезокристалли фотоэлектрик нурлатгичларда рухсат этилган ва тақиқланган оптик ўтишларни тадқиқ қилишда фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2020 йил 27 июлдаги 89-03-2653-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш пьезокристалларда полярон ва биполярон иштирок этганда электронлар ўтишларини тушунтириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишининг натижалари 5 та халқаро ва 4 та Республика миқёсидаги илмий конференцияларда маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 18 та илмий иш чоп этилган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг диссертацияларнинг асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий журналларда 9 та мақола, шундан 7 таси хорижий журналларда нашр этилган.

Диссертация тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, тўрт боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг ҳажми 113 саҳифани ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Мазкур диссертация мураккаб зонали пьезокристалларда ёруғликнинг кутбланиш даражасига боғлиқ бўлган кўп фотонли оптик ва фотовольтаик эффектларни, шунингдек, ток ташувчилар энергетик спектрининг спин боғланган ўлчамли квантлашишини тадқиқ қилишга бағишланган.

Кириш қисмида диссертация мавзусининг актуаллиги ва зарурати асосланган, олиб борилган илмий тадқиқотларнинг Ўзбекистон фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги қайд

қилинган, мавзу бўйича хорижий ва республикамизда олиб борилган 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 диссертациянинг структураси бўйича маълумотлар берилган.

Диссертациянинг **“Пьезокристалларда кутбий оптик ва фотогальваник эффектлар”** деб номланган биринчи бобида симметрия маркази бўлмаган пьезокристалларда оптик ва фотогальваник эффектларнинг ҳолати ва ривожланиши уларнинг опто- ва фотоэлектроника, шунингдек, маълумотларни голографиявий ёзишда қўлланишига эътибор қаратган ҳолда муҳокама қилинган.

Паст ўлчамли ва ҳажмий яримўтказгичли кристаллар, графен, топологик изолятор ва Вейл полуметалларда улар стационар бир жинсли ёритилганида содир бўладиган кутбий ва спин боғланган бир ва икки фотонли фотогальваник эффектларни тадқиқ этиш ҳолатлари таҳлил қилинган.

Пьезокристалларда ёруғликнинг бир ва икки фотонли ютилишида кутбий боғланган фототокнинг феноменологиявий интерпретацияси берилган. Хусусан, фотонли эргаштириш эффекти квант механикавий назариясида ток ташувчиларга фотонлар импульси ва бурчакли моментининг бир вақтда узатилиши ҳақида гап боради, классик назарияда эса бу эффект ток ташувчилар ёруғлик тўлқинининг электр ва магнит майдони бир вақтда таъсир этиши билан аниқланувчи Лоренц кучининг таъсирида содир бўладиган оқими билан тушунтирилади.

Кутбий боғланган фотогальваник эффектнинг физикавий табиати қатор ўзига хосликларга эгадир. Улардан бири инверсия маркази бўлмаган пьезокристалларда айнан мувозанат принципи бажарилмайди, чунки улар фазовий ва вақтга нисбатан мавжуд симметрияларни тасвирлай олмайди.

Айнан мувозанат принципининг бузилиши электронлар сочилишида кристалларнинг кинетик хоссаларини сезиларли ўзгартирувчи асимметрияни юзага келтиради ва ихтиёрий номувозанатли стационар ҳолатда электр тоқининг содир бўлишига имконият яратади.

Агар бу номувозанатли ҳолат ёритилиш туфайли содир бўлса, у ҳолда йўналиши ёруғликнинг кутбланишига ва кристаллнинг симметриясига боғлиқ бўлган фотогальваник ток ҳосил бўлади.

Ёруғлик интенсивлиги (I)нинг квадратига боғлиқ фототокни қуйидаги кўринишда қайд қиламиз:

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

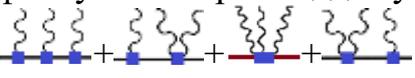
Бу ерда \vec{e} – электромагнит тўлқиннинг қутбланиш вектори ва симметриявий $(e_\beta e_\gamma^* + e_\gamma e_\beta^*)/2$ ва антисимметриявий $(e_\beta e_\gamma^* - e_\gamma e_\beta^*)/2$ кўпайтмаларнинг бири-бирига боғлиқ бўлмаган тасаввурларга кўра шакл алмаштирилиши эътиборга олинган. $[e_m e_n^*]$, $i(\vec{e}^* \times \vec{e})$ катталиклар ва стационар ток $\vec{j}^{(2)}$ ҳақиқийдир, шунинг учун (1)даги $A_{\alpha\beta\gamma\mu\nu}$, $B_{\alpha\beta\gamma\lambda}$, $C_{\alpha\beta\gamma}$ тензорлар ҳам ҳақиқийдир. Учинчи ранг тензор $C_{\alpha\beta\gamma}$ β ва γ бўйича симметриявий бўлиб, симметриявий хоссаларига кўра пьезотензорга айнийдир. Шунинг учун $C_{\alpha\beta\gamma}$ тензор бешинчи ранг $A_{\alpha\beta\gamma\mu\nu}$ тензор каби симметрия маркази бўлмаган кристалларда нолдан фарқли компоненталарга эга. $B_{\alpha\beta\gamma\lambda}$ тензор ихтиёрий симметрияли кристалларда, шунингдек, симметрия маркази бўлмаган кристалларда нолдан фарқли компоненталарга эга бўлади.

(1)нинг учинчи ҳади билан боғланган фототок эллиптик қутбланган ёруғлик учун нолдан фарқли бўлиб, у чизиқли қутбланган ёки қутбланмаган ёруғлик билан ёритилганда ҳосил бўлмайди. Шу сабабли $B_{\alpha\beta\gamma\lambda}$ тензор билан ифодаланувчи эффектни мос ҳолда икки фотонли циркуляр фотогальваник эффект деб номланади. $A_{\alpha\beta\gamma\mu\nu}$ тензор билан ифодаланувчи эффект, одатда, чизиқли қутбланган ёруғлик таъсирида кузатилади ва уни мос ҳолда икки фотонли чизиқли фотогальваник эффект деб аталади.

(1)нинг иккинчи ҳади билан боғланган фототок бир вақтнинг ўзида эллиптик ва чизиқли қутбланган ёруғлик билан ёритилганида нолдан фарқлидир. Умумий фототокка бериладиган ана шу улушлар билан икки фотонли фотогальваник эффект бир фотонлидан фарқ қилади. $A_{\alpha\beta\gamma\mu\nu}$, $B_{\alpha\beta\gamma\lambda}$, $C_{\alpha\beta\gamma}$ тензорларнинг вақт инверсияси операциясига нисбатан симметриявий хоссаларига кўра эффектнинг диссипатив жараёнларга боғланганлиги ёки боғланмаганлигини таҳлил қилиш мумкин. Шунинг учун чизиқли фотогальваник эффект энергиянинг сақланиш қонунини ифодаловчи δ Дирак функцияси билан аниқланади, циркуляр ФГЭ диссипатив жараёнларга боғлиқ эмас.

“Мураккаб валент зонали пьезоэлектрикларда кўп фотонли ютилишнинг чизиқли-циркуляр дихроизми” номли иккинчи бобда куб симметрияли пьезокристалларнинг оғир ва енгил коваклар тармоқлариаро кўп фотонли оптик ўтишлар билан тавсифланадиган ёруғлик ютилиши назарий тадқиқ қилинган: пьезокристалл валент зонаси тармоқлариаро оптик ўтишларнинг матрицавий элементлари, ёруғлик ютилишининг уч ва тўрт фотонли чизиқли циркуляр дихроизми квант механикавий таҳлил қилинган, шунингдек, қутбланган ёруғлик икки ва уч фотонли ютилиш коэффициентининг спектрал ва температуравий боғланишлари келтирилган ва микдорий ҳисоблашлар олиб борилган.

Уч фотонли барча тур оптик ўтишларда  Фейнман диаграммаси билан тавсифланувчи учта алоҳида алоҳида фотоннинг ютилишини, 

диаграммаси орқали ифодаланган дастлаб бир вақтда икки фотон, сўнгра битта фотон ютилишини, шунингдек  диаграмма билан аниқланувчи дастлаб битта, сўнгра бир вақтда иккита фотоннинг ютилишини ҳамда  диаграмма билан тавсифланувчи бир вақтда учта фотоннинг ютилиши эътиборга олинган.  диаграммалар билан аниқланувчи оптик ўтишлар матрицавий элементлари суммаси модули квадратининг коваклар тўлқин вектори фазовий бурчакларига нисбатан ўртачалаштирилганидан сўнг:

чизикли кутбланган ёруғлик учун

$$\left\langle \sum_{m=\pm 3/2; m'=\pm 1/2} |M_{m,m'}^{(3)}|^2 \right\rangle_{linear} = \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^6 \left(\frac{B^2 k}{\hbar\omega} \right)^2 \left[21,5 + 4,9 \frac{\hbar\omega}{B^2 k} D' + 0,5 \left(\frac{\hbar\omega D'}{B^2 k} \right)^2 \right], \quad (2)$$

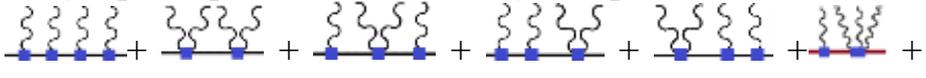
циркуляр кутбланган ёруғлик учун

$$\left\langle \sum_{m=\pm 3/2; m'=\pm 1/2} |M_{m,m'}^{(3)}|^2 \right\rangle_{circ} = \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^6 \left(\frac{B^2 k}{\hbar\omega} \right)^2 \left[22,5 + 7,8 \frac{\hbar\omega}{B^2 k} D' + 0,49 \left(\frac{\hbar\omega D'}{B^2 k} \right)^2 \right] \quad (3)$$

муносабатлардан уч фотонли ютилишда бир вақтнинг ўзида уч фотон ютилиши ҳам эътиборга олинса, у ҳолда натижавий чизикли-циркуляр дихроизм коэффициентининг коваклар гамильтонианининг тўлқин вектори кубига пропорционал ҳади олд коэффициенти (D')нинг миқдorigа ва ишорасига боғлиқлиги келиб чиқади. Масалан, p -GaAs учун бу зонавий параметрни мусбат ишорали ва $D' = 3,9 \times 10^{-23} \text{ eV} \cdot \text{sm}^3$ деб ҳисобланса, у ҳолда катталикларнинг қуйидаги: $\lambda = 10,6 \text{ mkm}$ - ёруғликнинг тўлқин узунлиги, гамильтонианининг тўлқин вектори квадратига пропорционал зонавий параметрнинг $B = 5,66 \times 10^{-38} \text{ J} \cdot \text{m}^2$ қийматлари учун $\frac{\hbar\omega}{B^2 k} D'$ нисбат $2,55 \times 10^{-2} \ll 1$

қийматни қабул қилади, бу ерда k - валент зона тармоқлариаро оптик ўтишда қатнашаётган ковак тўлқин вектори. Шундай қилиб, бир вақтда уч фотонли ютилишнинг уч фотонли чизикли-циркуляр дихроизмга берадиган улуши (агар когерентли тўйиниш эффекти эътиборга олинмаса) 6% дан ортмайди. Умуман олганда, чизикли-циркуляр дихроизмга бир вақтда уч фотон ютилиш билан боғлиқ улуш частотанинг камайиши билан орта боради. Хусусан, частота 10%га орттирилса, у ҳолда бу улуш p -GaAs учун камида 15%га ортиши мумкин.

Пьезокристалл валент зонаси тармоқлариаро тўрт фотонли оптик ўтишлар бир неча этапдан иборат эканлигига эътибор қаратилади: биринчи этапда тўртта алоҳида алоҳида фотонлар ютилса, иккинчи этапда иккита алоҳида-алоҳида иккита ва бир вақтда иккита фотон ютилади, учинчи этапда эса бир вақтнинг ўзида иккитадан икки марта фотонлар ютилади, охириги этапда дастлаб битта, сўнгра бир вақтнинг ўзида учта фотон (ва аксинча)

ютилади. Натижада  тур оптик ўтишлар учун қайд қилинган матрицавий элементлар

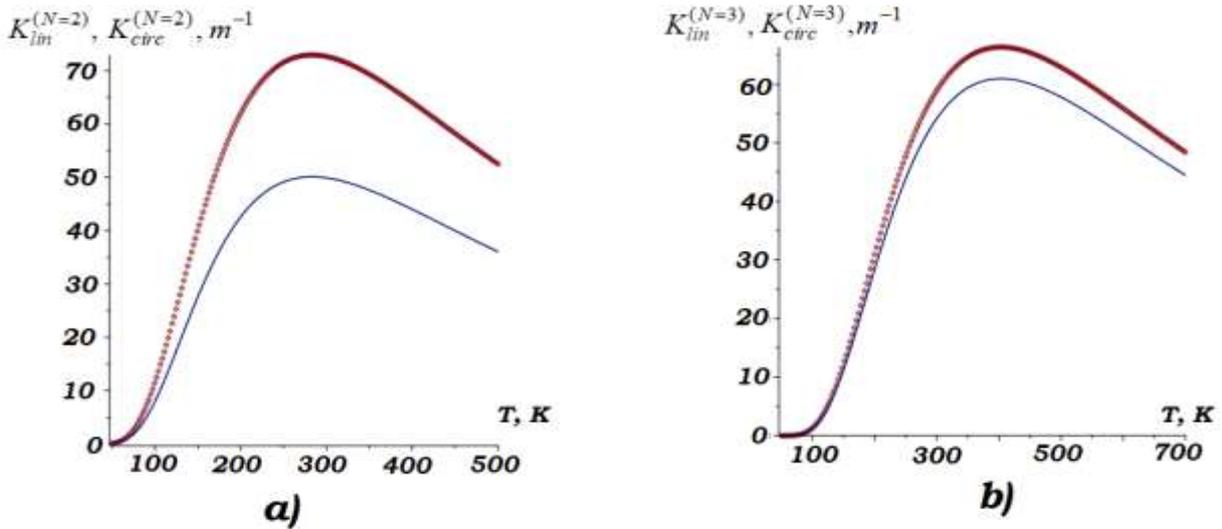
суммаси модули квадратининг коваклар тўлқин векторининг азимутал ва кутбий бурчакларига нисбатан ўртачалаштириш бажарилса, у ҳолда чизиқли кутбланган ёруғлик учун:

$$\left\langle \sum_{m=\pm 3/2; m'=\pm 1/2} |M_{m,m'}^{(4)}|^2 \right\rangle_{linear} = \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^8 \left(\frac{B^2}{\hbar\omega} \right)^2 \left[649 + 96 \frac{\hbar\omega}{B^2 k} D' + 98 \left(\frac{\hbar\omega D'}{B^2 k} \right)^2 \right], \quad (4)$$

циркуляр кутбланган ёруғлик учун эса

$$\left\langle \sum_{m=\pm 3/2; m'=\pm 1/2} |M_{m,m'}^{(4)}|^2 \right\rangle_{circ} = \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^8 \left(\frac{B^2}{\hbar\omega} \right)^2 \left[350 + 106 \frac{\hbar\omega}{B^2 k} D' + 94 \left(\frac{\hbar\omega D'}{B^2 k} \right)^2 \right], \quad (5)$$

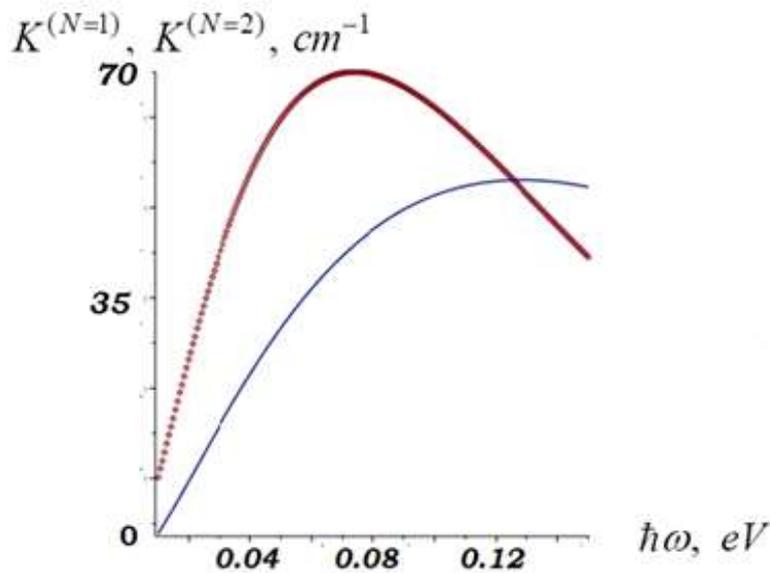
муносабатларга эга бўламиз. Охириги ифодалардан бир вақтда учта фотон ютилишининг *p-GaAs* ва $\lambda = 10,6 \text{ mkm}$ тўлқин узунлиги учун тўрт фотонли чизиқли циркуляр дихроизм коэффицентига бериладиган улуши 3% тартибида бўлади ва бу улуш коваклар эффектив массаларининг ҳамда частотанинг миқдоран ортиши билан ортиб боради.



1-расм. $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ тўлқин узунликли кутбланган ёруғликнинг *p-GaAs* валент зонаси тармоқлариаро ютилишдаги $K_{circ}^{(N=2)}(T)$ (узлуксиз чизиқ) ҳамда $K_{lin}^{(N=2)}(T)$ нинг (ромблар) икки фотонли (*a* расм) ва $K_{circ}^{(N=3)}(T)$ нинг (узлуксиз чизиқ) ҳамда $K_{lin}^{(N=3)}(T)$ нинг (ромблар) уч фотонли (*b* расм) оптик ўтишлар учун температуравий боғланишлари.

Куб симметрияли ковакли ўтказувчанликли пьезокристаллнинг валент зонаси тармоқлариаро оптик ўтишлар ҳисобига ёруғликнинг икки ($K^{(N=2)}(\omega)$) ва уч ($K^{(N=3)}(\omega)$) фотонли ютилиш коэффицентларининг спектрал боғланишидан (1-расм) кўриняптики, биринчидан, чизиқли кутбланган ёруғлик ютилиш коэффицентининг спектрал боғланишларида фотон

энергиясининг ортиши билан ортиб боради ва максимумга эришади, сўнгра камайиб боради, иккинчидан, икки ва уч фотонли ютилишда чизиқли циркуляр дихроизмнинг (хусусан, спектр максимумида мос келган қиймати 1,4 экани) мавжудлиги, яъни спектрал боғланишларнинг ёруғлик қутбланиш даражасига боғлиқлиги келиб чиқади. Ҳисоблашлар кўрсатадики, температура миқдоран 1,5 марта камайтирилса, у ҳолда $K^{(N=1)}(\omega)$, $K^{(N=2)}(\omega)$ спектрал боғланишлардаги максимал қийматлар тақрибан 1,4 мартага камаяди, $K^{(N=3)}(\omega)$ боғланишда эса ўзгаришсиз қолади. Бир $K^{(N=1)}(\omega)$ ва икки $K^{(N=2)}(\omega)$ фотонли чизиқли қутбланган ёруғликнинг ютилиш коэффициентларини солиштириш мақсадида уларнинг *p-GaAs* валент зонаси тармоқлариаро ютилишидаги спектрал боғланишлари $K^{(N=1)}$ (узлуксиз чизиқ) ва $K^{(N=2)}$ (ромблар) хона температураси ($T=300$ К) учун келтирилди. 2-расмдан кўриняптики, $\xi = \frac{eA_0}{c\hbar} \sqrt{B} = 0,1$ шартда паст частоталар соҳасидагина икки фотонли ютилиш бир фотонли ютилишдан устун бўлади, катта частоталар соҳасида эса аксинчадир.



2-расм. *p-GaAs* валент зонаси тармоқлариаро оптик ўтишлар ҳисобига чизиқли ёруғликнинг бир фотонли $K^{(N=1)}$ (узлуксиз чизиқ) ва икки фотонли $K^{(N=2)}$ (ромблар) ютилиш коэффициентларининг спектрал боғланишлари, $T=300$ К.

“Пьезоэлектрикларда икки фотонли баллистик ток” номли учинчи бобда ёруғликнинг ночизиқли ютилишида содир бўладиган қутбий фотогальваник эффектларнинг квант механикавий таҳлиллари қаралган. Фототок икки зона (ёки зонача)ларнинг тартиб рақамига нисбатан диагонал ва нодиагонал улушлари билан аниқланади, яъни

$$\vec{j}_{бал} = -e \sum_{n\vec{k}} \vec{V}_{n\vec{k}} f_{n\vec{k}}, \quad \vec{j}_{силж} = -e \sum_{n \neq n', \vec{k}} \vec{V}_{n'n}(\vec{k}) \rho_{nn'}(\vec{k}), \quad (6)$$

бу ерда e -элементар заряд (коваклар учун $e > 0$, электронлар учун $e < 0$), $\rho_{m'n'}(\vec{k})$ ва $\vec{V}_{n'n}(\vec{k})$ -зичлик матрицаси ва тезлик операторининг матрицавий элементи, $\vec{V}_{n\vec{k}} = \hbar^{-1} \vec{\nabla}_{\vec{k}} E_{n\vec{k}}$ - n зонадаги \vec{k} тўлқин векторли электроннинг гуруҳли тезлиги, $\rho_{m'}(\vec{k}) = f_{n\vec{k}}$ - генерация, сочилиш ва рекомбинация жараёнлари билан аниқланувчи номувозанатдаги стационар тақсимот функцияси, n ва n' мураккаб зона учун зоначаларининг, тусланган зонали кристалларда эса зона тусланган ҳолатларининг тартиб рақами.

(б)нинг диагонал улуши ёруғлик ҳисобига индуцирланган асимметриявий тақсимот функция билан аниқланади ва у баллистик улуш деб номланади. Нодиагонал улуш эса эркин ток ташувчиларнинг ҳар бир квант ўтишларида реал фазода силжиши билан боғланган, у силжишли улуш деб аталади.

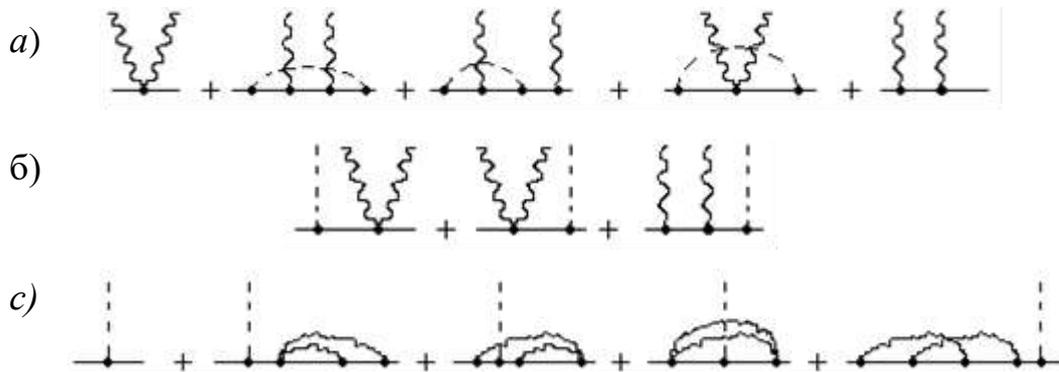
Ташқи ўзгармас электр майдони ва фазовий бир жинслилик бўлмаганида, симметрия маркази бўлмаган мураккаб зонали пьезокристалларда қутбланган ёруғликнинг икки фотонли ютилиши ҳисобига генерацияланувчи доимий ток билан тавсифланувчи икки фотонли қутбий ФГЭни қарайлик. Бу ҳолда икки фотоннинг кетма-кет ва бир вақтда ютилишини эътиборга оламиз (3-расм).

Қутбий фототокнинг физикавий табиати, юқорида қайд қилинганидек, кристаллнинг симметрияси, хусусан, унда симметрия марказининг бўлмаслиги билан аниқланади, чунки бундай кристалларда айнан мувозанат принципи ҳар доим ҳам бажарилавермайди. Натижада муҳитдаги номувозанатли стационар ҳолат ундаги квазизарралар, масалан, фотоуйғотилган ток ташувчилар оқимининг пайдо бўлишига олиб келади.

Табиатан қутбий фототок электронларнинг фонон, фотон ёки кристалл структурасининг бошқа тур бузилишлари билан асимметриявий ўзаро таъсири, икки фотонли оптик ўтишлар эҳтимоллигининг асимметриявий қисми $W_{n'\vec{k}', n\vec{k}}^{(2, ass)}$ билан аниқланади. $W_{n'\vec{k}', n\vec{k}}^{(2, ass)}$ катталиқка улушни иккита учинчи тартибли, биринчи ва бешинчи тартибли, иккинчи ва тўртинчи тартибли матрицавий элементларнинг интерференцияси беради. Бу ҳолда баллистик чизиқли ФГЭ нафақат охириги ва бошланғич ҳолатлар учун, балки бошланғич ва оралиқ ҳолатларнинг биттасини ўз ичига олган энергия сақланиш қонуни бажарилганида содир бўлади. Мос ҳолда баллистик чизиқли ФГЭ токига 3-расмда тасвирланган уч хил тур оптик ўтишлар ўз улушларини беради. 3-расмдан кўриняптики, чизиқли ФГЭ биринчи ва бешинчи (c канал) тартибли, реал фонон иштирок этадиган (b канал) ва иштирок этмайдиган (a канал) иккинчи ва тўртинчи тартибли жараёнларнинг интерференцияси туфайли содир бўлади.

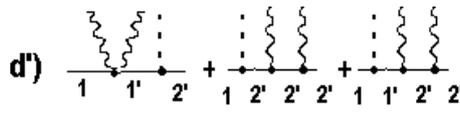
Пьезокристалларда ёруғликнинг икки фотонли ютилишида баллистик чизиқли ФГЭ, бир фотонли яқинлашишидаги каби, ҳар бири электрон-фонон ва электрон-фотон ўзаро таъсир операторларининг матрицавий элементлари

кўпайтмасининг мавҳум ҳади билан аниқланувчи $\Phi_i(\vec{k}, \vec{k}')$ функциялар билан ифодаланди. Бунда аниқ бир тартибда олинган ўзаро таъсир операторлари матрицавий элементларнинг пастки индекслари m, n, l қаралаётган зонанинг зоначаси (тармоғи)га тегишли тартиб рақамларига тенг деб ҳисоблаш зарур. Масалан, $p-GaAs$ тур пьезокристаллнинг валент зонаси учун $m, n, l = 1, 2$. Таъкидлаймизки, бундай функциялар билан бир қаторда уларда $M_{2\vec{k}, 1\vec{k}}^{(2)} \rightarrow \sum \frac{M_{2\vec{k}, l\vec{k}}^{(1)} M_{l\vec{k}, 1\vec{k}}^{(1)}}{E_{l\vec{k}} - E_{1\vec{k}} - i0}$ алмаштириш билан аниқланувчи функциялар ҳам мавжуддир. Хусусан, $p-GaAs$ учун ёруғликнинг икки фотонли ютилишида фотоуйғотилган ковакларнинг тўлқин вектори: $k_\omega = \sqrt{2\mu\omega/\hbar}$, оғир (енгил) ковакларнинг энергияси: $E_{hh(lh)}^* = \frac{2m_{lh(hh)}}{m_{hh} - m_{lh}} \hbar\omega$, $m_{hh} = m_1 (m_{lh} = m_2)$ - оғир (енгил) ковакларнинг эффектив массаси, бу ҳолда ковакларнинг сферик энергиявий спектри танланган. У ҳолда валент зонасидаги ковакларнинг тармоқлариаро оптик ўтишларнинг табиати (тури)га қараб оралик ҳолатлардаги ковакларнинг энергияси ҳар хил бўлиши аниқланган.



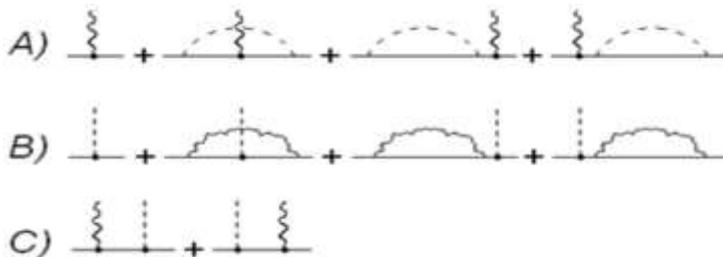
3-расм. Интерференцияси пьезокристалларда икки фотонли кутбий фотогальваник эффектга олиб келувчи Фейнман-Келдыш диаграммалари. Узлуксиз чизик – электрон ёки ковак, тўлқинли чизик – фотон, штрихли чизик – фонон.

Оралик ҳолатлардаги ковакларнинг тўлқин векторлари охири муносабатлар ёрдамида уларда $m_{hh} \rightarrow m_{lh}$ алмаштириш билан аниқланади. Таъкидлаш жоизки, ковакларнинг энергияси $\hbar\Omega$ дан кичик бўлган частоталар соҳасида узатилиши билан (агар руҳсат этилган бўлса) боғлиқ бўлган жараёнлар баллистик чизикли ФГЭ токига улуш бермайди. Масалан, $p-GaAs$ пьезокристаллда чексиз оғир коваклар яқинлашишида

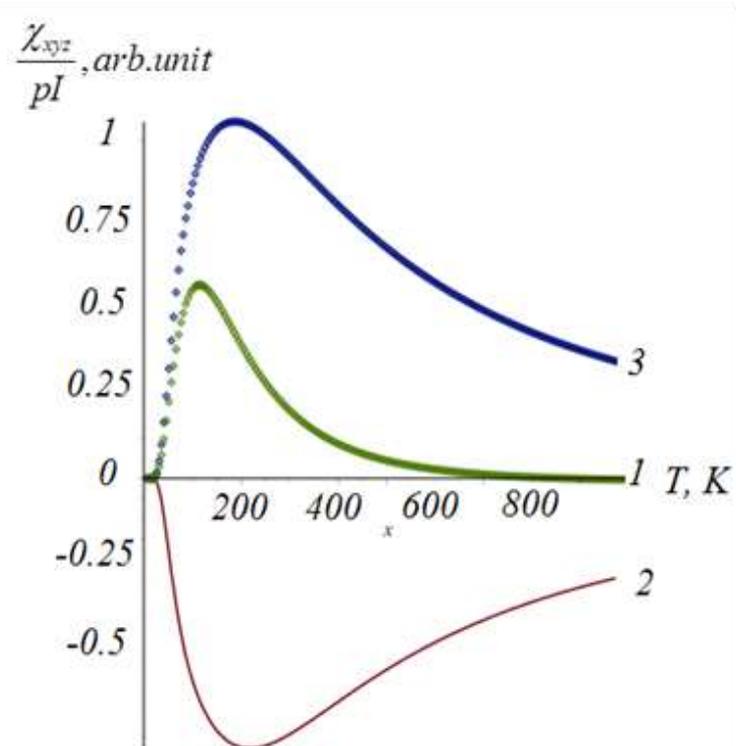


d') диаграммалар билан ифодаланувчи жараёнларнинг бир қисми фототокка ўз улушини бермайди.

Шуни қайд қилиш ўринлики, 4-расмда икки фотонли оптик ўтишлар бир фотонли оптик ўтишлар билан алмаштирилган ҳол тасвирланган. Бу ҳолда асимметриявий сочилиш эҳтимоллигида электрон-фотон ва электрон-фонон ўзаро таъсир операторлари эътиборга олинган ҳолда бир фотонли баллистик фототокнинг спектрал ва температуравий боғланишлари ҳисобланди. 5-расмда *p-GaAs* валент зонасининг тармоқлариаро оптик ўтишларга асосланган ҳолда 117 meV энергияли фотон учун қайд қилинган $\chi_{xyz}/(pI)$ катталиққа нисбатан ҳисобланган температуравий боғланиши тасвирланган, бу ерда χ_{xyz} - фотогальваник эффект тензори, p - коваклар концентрацияси. Бу расмдан кўриняптики, реал фотонлар ва виртуал фононлар (1-чизик) ҳамда реал фононлар ва виртуал фотонлар (2-чизик) иштирок этган оптик ўтишлар улушлари мусбат ишорали реал фотон ва фононлар (3-чизик) иштирок этган оптик ўтишлар улуши манфий қийматлидир, яъни реал фотон ва фононлар иштирокида ковакларнинг асимметриявий сочилишида содир бўладиган фототок қолган тип оптик ўтишларда содир бўладиган фототокка тескари йўналган. Натижавий баллистик фототок мусбат қийматлидир. χ_{xyz} нинг назарий температуравий боғланиши 6-расмда тасвирланган бўлиб, CO_2 -лазер билан ёритилган *p-GaAs* пьезокристаллда $\hbar\omega = 117 \text{ meV}$ энергияли фотон учун кузатилган эксперимент натижалари билан солиштирилган. Миқдорий ҳисоблашларда қуйидаги катталиқлар танланган: $m_2 = 0,068m_0$ ва $m_1 = 0,12m_0$ - енгил ва оғир коваклар эффектив массалари, $C = e\Omega_{LO} \sqrt{\frac{4\pi\rho}{\epsilon^*}}$ - фрелих электрон-фонон ўзаро таъсир доимийлиги $\epsilon^{*-1} = \epsilon_\infty^{-1} - \epsilon_0^{-1}$, ϵ_0 ва ϵ_∞ - статик ва юқори частотали диэлектрик киритувчанлик, d_0 - деформациявий электрон-фонон ўзаро таъсир доимийлиги, $d_0 a_0 = 48 \text{ eV}$ (a_0 - кристалл панжара доимийлиги), $\hbar\Omega_{LO} = 36 \text{ meV}$ - оптик фонон энергияси.



4-расм. Интерференцияси мураккаб зонали яримўтказгичларда чизикли фотогальваник эффектга олиб келувчи Фейнман-Келдыш диаграммалари. Узлуксиз чизик – электрон (ковак), тўлқинли чизик – фотон, штрихли чизик – фонон.



5-расм. p -GaAs валент зонасининг тармоқлариаро оптик ўтишларга асосланган ҳолда 117 meV энергияли фотон учун қайд қилинган $\chi_{xyz}/(p \cdot I)$ катталиқнинг температуравий боғланиши, бу ерда p – коваклар концентрацияси, χ_{xyz} – чизиқли фотогальваник тензор.

“Тетраэдр симметрияли пьезокристалларда спинга боғлиқ ўлчамли квантлашиш” номли тўртинчи бобда тетраэдр симметрияли яримўтказгичларда электронлар энергетик спектрининг спинга боғлиқ ўлчамли квантлашиши тадқиқ қилинган. Электронлар энергетик спектрининг ўлчамли квантлашишини тадқиқ қилишда уларнинг кинетик энергияларини тавсифий энергиялардан миқдоран кичик деб ҳисобланган. Бу ҳолда l тартиб рақамли қатламдаги ўлчамли квантлашиш эффеќтини ҳисоблаш имконини берувчи гамилтониан қуйидагича кўринишга эга:

$$\hat{H}_l^{(\zeta)} = -\frac{\hbar^2}{2m_l^*} \frac{\partial^2}{\partial x_\zeta^2} + \frac{\hbar^2 (\vec{k}_\perp^{(\zeta)})^2}{2m_l^*} + V_l(x_\zeta) + \hat{H}_l^{(\zeta D)}, \quad (7)$$

бу ерда $\zeta = 1, 2, 3$ мос ҳолда yz , xz ва xy интерфейсларга тўғри келади, $(\vec{k}_\perp^{(1)})^2 = k_z^2 + k_y^2$, $(\vec{k}_\perp^{(2)})^2 = k_x^2 + k_z^2$, $(\vec{k}_\perp^{(3)})^2 = k_x^2 + k_y^2$, $x_1 = x$, $x_2 = y$, $x_3 = z$.

Электроннинг тўлқин функцияси

$$\psi_l^{(\zeta \pm)} = \chi_l^{(\pm)} u_l^{(\zeta \pm)}(x) e^{i\vec{m}_\perp \vec{k}_\perp^{(\zeta)}}, \quad \chi_l^{(\pm)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ \mp e^{-i\varphi} \end{pmatrix} \quad (8)$$

яъни $\hat{H}_l^{(D1)}$ Дрессельхауз гамилтонианини диагоналлаштирадиган кўринишда танланади. Бу ерда φ гетероструктуранинг интерфейси текислигидаги электрон \vec{k}_\perp вектор ташкил этувчиларининг кутбий бурчаги

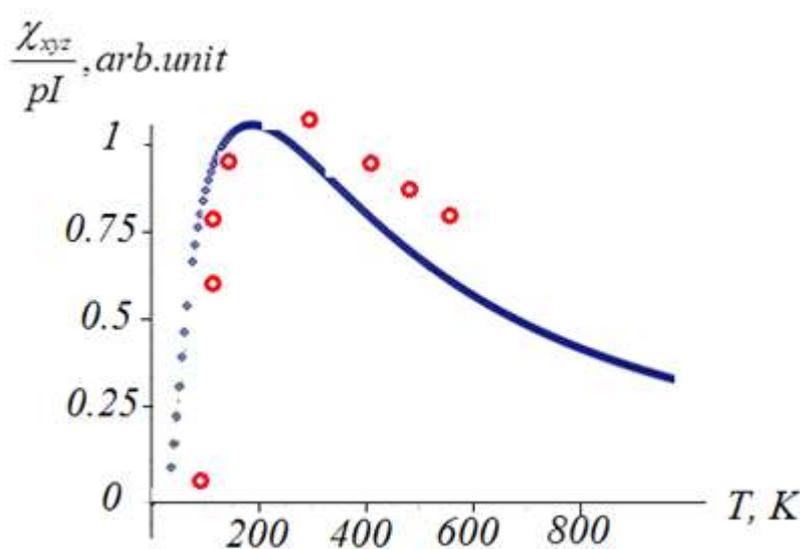
бўлиб, юқориги ишора (+1/2) спинли электронларга, пастки ишора эса (-1/2) спинли электронларга тегишлидир.

$u^{(\pm)}(z)$ тўлқин функциялар учун қайд қилинган Шредингер тенгламаси

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m_l^{(\zeta)}} \frac{\partial^2}{\partial x_\zeta^2} + V_l(x_\zeta) \right] u_l^{(\zeta\pm)}(x_\zeta) = E_l^{(\zeta)} u_l^{(\zeta\pm)}(x_\zeta), \quad (9)$$

кўринишга келади, бу ерда $m_l^{(\zeta\pm)} = m_l^{(*)} \left(1 \pm \frac{2\gamma_l m_l^{(*)} k_\perp^{(\zeta)}}{\hbar^2} \right)^{-1}$ ва у

$\kappa_l^{(\zeta\pm)} = \sqrt{\frac{2m_l^{(\zeta\pm)}}{\hbar^2} (V_l - E_l^{(\zeta\pm)})}$ катталикка боғлиқ равишда ўзгаради.



6-расм. *p-GaAs* валент зонасининг тармоқлариаро оптик ўтишларга асосланган ҳолда 117 meV энергияли фотон учун қайд қилинган $\chi_{xyz}/(p \cdot I)$ катталикнинг температуравий боғланиши, бу ерда $p = 7,4 \cdot 10^{22} m^{-3}$ – коваклар концентрацияси, χ_{xyz} – бир фотонли чизиқли фотогальваник тензори, ромблар – назария, доиралар – тажриба натижалари.

(9) тенгламани ечишда ҳар бир қатламдаги потенциал $V_l(z) = V_l = const$ деб ҳисобланса, у ҳолда $u_l^{(\zeta\pm)}(x_\zeta = a) = 0$ шартда

$$E_l^{(\zeta\pm)} = V_l + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_l^{*2}} \left(n_l^{(\zeta\pm)} \right)^2 \left(1 \pm \frac{2\gamma_l m_l^{(*)} k_\perp^{(\zeta)}}{\hbar^2} \right) \quad (10)$$

натижа олинади, бу ерда $n_l^{(\zeta\pm)} = 1, 2, \dots$.

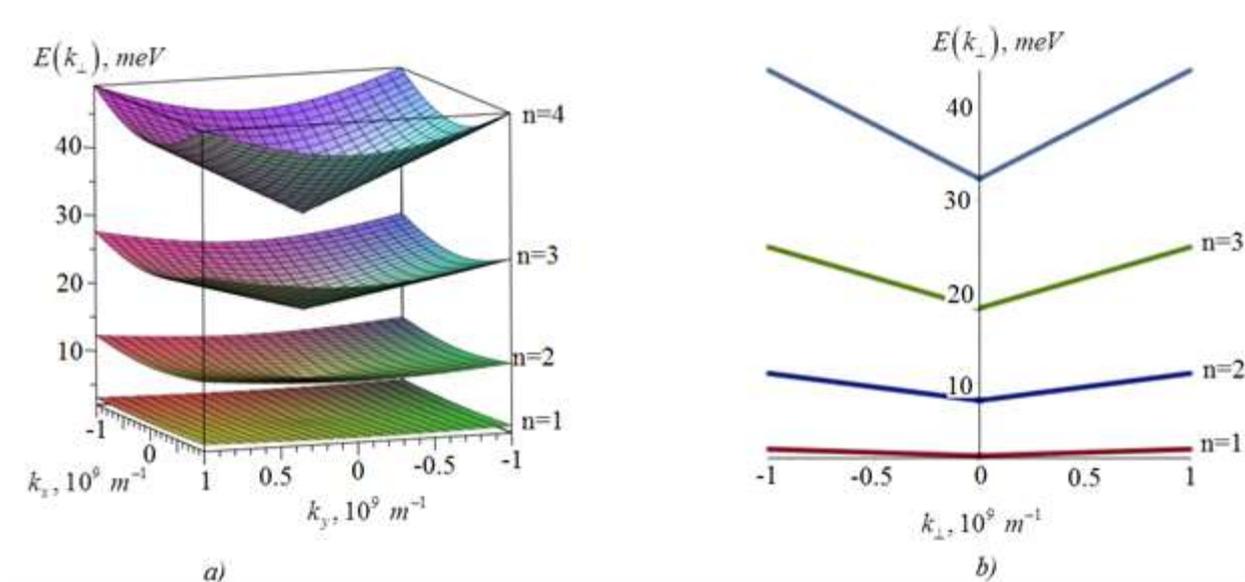
GaAs яримўтказгичдаги электронлар энергетик спектрининг (10) формула ёрдамида $n_l^{(\zeta\pm)} = n$ катталикнинг ҳар хил қийматлари учун

ҳисобланган ўлчамли квантлашиши 7-расмда тасвирланган. Ҳисоблашларда зонавий параметрларнинг қийматлари қуйидаги жадвалдан олинган.

1-жадвал.

$A_{III}B_V$ яримўтказгичлар зонавий параметрлари

	<i>GaSb</i>	<i>InAs</i>	<i>GaAs</i>	<i>InP</i>	<i>InSb</i>
$\gamma_l, 1.6 \times 10^{-49} J \cdot m^3$	187	130	24	8	220
m_l^*/m_0	0.041	0.023	0.067	0.081	0.013



7-расм. *GaAs* яримўтказгичидаги электронлар энергетик спектрининг уч (a) ва икки ўлчамли (b) спин боғланган ўлчамли квантлашиши.

1-жадвалга кўра $\frac{2\gamma_l m_l^{(*)} k_{\perp}^{(\zeta)}}{\hbar^2}$ катталик *InSb* яримўтказгич учун $1,74 \cdot 10^{-11} \cdot k_{\perp}^{(\zeta)}$, *GaSb* яримўтказгич учун $4 \cdot 10^{-12} \cdot k_{\perp}^{(\zeta)}$ қийматни қабул қилади. У ҳолда электронлар эффектив массасида Дрессельхауз гамильтониани эътиборга олинганда ҳосил бўладиган спин боғланган улушини эътиборга олмаса бўлади. Шу сабабли бу улушни электронлар тўлқин функцияларини ҳамда чекли энергетик баландликли ва чекли геометрик ўлчамли потенциал тўсиқдан ўтишини тўлқин векторнинг $k_{\perp}^{(\zeta)} \sim 10^9 m^{-1}$ қийматидаги ҳисоблашларда эътиборга олинмаса сезиларли хатоликка олиб келмайди.

Натижада электронларнинг ўлчамли квантлашган энергетик спектри ноэквидистант дискрет сатҳлардан ташкил топганлиги ҳамда гетероструктуранинг интерфейси бўйлаб йўналган икки ўлчамли тўлқин векторига боғлиқлиги аниқланди (7-расм).

ХУЛОСА

“Пьезоэлектрикларда ёруғликнинг ночизиқли ютилиши, икки фотонли баллистик ток ва ўлчамли квантлашиш” мавзусидаги фалсафа доктори (PhD) диссертация ишининг натижаларидан келиб чиққан ҳолда қуйидаги хулосалар тақдим этилади:

1. Бир вақтнинг ўзида икки ва уч фотон ютилишини эътиборга олиб мураккаб зонали пьезокристаллар учун қутбий боғланган кўп фотонли оптик ва фотогальваник эффектлар назарияси ривожлантирилган.
2. Мураккаб зонали пьезокристалларда бир вақтда уч фотонли ютилишни ҳам эътиборга олиб кўп фотонли чизиқли циркуляр дихроизмнинг миқдорий назарияси қурилган, зона тармоқлариаро ёруғлик икки ва уч фотонли ютилиш коэффициентининг спектрал ва температуравий боғланишлари ҳисобланган.
3. Пьезокристаллда икки фотонли баллистик фотогальваник эффект тоқининг феноменологик назарияси келтирилган ва унга кўра қутбий боғланган фотогальваник эффектларнинг типлари намунанинг симметриясига боғлиқлиги исботланган.
4. Мураккаб зонали пьезокристаллда икки фотонли баллистик фотогальваник эффектнинг квант механикавий назарияси қурилган ва валент зонаси тармоқлариаро асимметриявий оптик ўтишлар эҳтимоллиги билан аниқланадиган механизмлари яратилган.
5. Тетраэдр симметрияли пьезокристаллар учун қутбий боғланган бир фотонли токнинг температуравий боғланишлари оптик ўтишлар турларига қараб ҳисобланган ҳамда фототокнинг назарий ва экспериментал натижалари солиштирилган.
6. Тетраэдр симметрияли оддий зонали яримўтказгичларда Дрессельхауз яқинлашишида электронлар энергетик спектрининг спинга боғлиқ ўлчамли квантлашиши ҳисобланган.
7. Электронларнинг ўлчамли квантлашган энергетик спектри ноэквидистант дискрет сатҳларда ташкил топганлиги ва гетероструктуранинг интерфейси бўйлаб йўналган икки ўлчамли тўлқин векторга боғлиқлиги аниқланган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ ПО ФИЗИКО-
МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ ПРИ ФЕРГАНСКОМ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ**

**КОКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ**

СУЛТОНОВ РАВШАНЖОН РУСТАМОВИЧ

**НЕЛИНЕЙНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА, ДВУХФОТОННЫЙ
БАЛЛИСТИЧЕСКИЙ ТОК И РАЗМЕРНОЕ КВАНТОВАНИЕ В
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКАХ**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам

Фергана – 2020

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером B2020.2.PhD/FM487.

Диссертация выполнена в Кокандском государственном педагогическом институте.

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

Научный руководитель:	Расулов Вохоб Рустамович доктор философии по физико-математическим наукам (PhD), доцент.
Официальные оппоненты:	Аюханов Рашид Ахметович доктор физико-математических наук. Султонов Номонжон Акрамович доктор физико-математических наук, профессор.
Ведущая организация:	Ташкентский государственный технический университет им. И.Каримова

Защита диссертации состоится «6» 11 2020 года в 14.00 часов на заседании Научного совета PhD.03.27.02.2020.FM.106.01 при Ферганском политехническом институте (Адрес: 150107, Узбекистан, г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел.: (+99873) 241-13-03; факс: (+99873) 241-12-06; e-mail: ferpi_info@edu.uz).

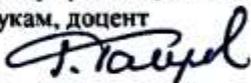
С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ферганского политехнического института (регистрационный номер ~~0001-А~~) (Адрес: 150107, г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел.: (+99873) 241-13-03).

Автореферат диссертации разослан «24» 10 2020 года.
(протокол рассылки № 01 от «24» 10 2020 г.)




Н.Х.Юлдашев
Председатель Научного совета по присуждению ученой степени доктора философии, д.ф.-м.н., профессор


Б.З.Полвонов
Ученый секретарь Научного совета по присуждению ученой степени доктора философии, доктор философии по физико-математическим наукам, доцент


Р.Я.Расулов
Председатель научного семинара при научном совете по присуждению ученой степени доктора философии, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время в мире пьезоэлектрические кристаллы, например, пьезополупроводники приобретают все большее значение в интенсивном развитии области объемной и низкоразмерной твердотельной электроники, в частности, в нанoeлектронике. Это связано с тем, что поглощение поляризованного излучения переводит систему носителей заряда в неравновесное состояние, которое характеризуется выстраиванием спинов и импульсов электронов и дырок отличными от нуля потоками квазичастиц и их спинов. Отклонение от равновесия и кинетические процессы, ответственные за релаксацию в основное состояние проявляются в оптических эффектах как в объемных, так и в низкоразмерных твердотельных приборах.

Достижения технологии пьезоэлектриков открывают новые возможности создания современных устройств с заданными параметрами и свойствами. Среди таковых все возрастающий интерес, в частности, привлекают поляризационно-зависимые фотогальванические явления, наблюдаемые в пьезоэлектриках. Успехи в реализации устройств голографической записи на основе поляризационных фотогальванических эффектов в пьезоэлектриках придали дополнительный импульс исследованиям в области твердо-тальной фотоники—недавно сформировавшегося направления физики твердых тел. Одной из ключевых задач фотоники является изучение взаимодействия поляризованного излучения с носителями тока в пьезоэлектриках со сложной валентной зоной и в их наноструктурах. В связи с этим изучение электронных, оптических и фотогальванических свойств пьезоэлектриков и их размерно-квантованных структур не только открывают новые направления в нанoeлектронике, фотонике и спинтронике, но и приводят к проведению фундаментальных научных исследований. Поэтому исследование механизмов фотонно-кинетических явлений в пьезоэлектриках со сложной зонной структурой и в их наноструктурах, как с учетом эффекта когерентного насыщения, так и без его учета является актуальным и служит основанием для решения проблем, поставленных в диссертации.

В годы независимости в нашей стране серьезные приоритеты в области науки, включая развитие использования возобновляемых источников энергии, получили значительные результаты при исследовании поляризационно-зависимых оптических и фотонно-кинетических явлений в двух и трехмерных пьезоэлектриках и в пьезоэлектриковых структурах. Согласно плану действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан особое внимание уделяется решению вопросов развития научно-инновационных деятельностей, а также реализации эффективных механизмов научных и инновационной достижений к практическим применениям.

Настоящее диссертационное исследование служит ответственному выполнению задач, предусмотренных в ряде указов и постановлений

Президента страны, в том числе в Указе Президента № УП-4947 «О мерах по дальнейшей реализации Стратегии действий по развитию Республики Узбекистан в 2017-2021 годах» от 7 февраля 2017 года, и в Постановлениях Президента № ПП-1442 «О приоритетных направлениях развития индустрии Республики Узбекистан на 2011-2015 гг. от 15 декабря 2010 года и № ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере и изложенных в соответствующих законодательных актах.

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

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

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

Группой Российских ученых, руководимых академиком Российской АН Ю.В.Копаевым, членом-корреспондентом РАН Е.Л.Ивченко, профессорами Г.Е.Пикусом, Н.С.Аверкиевым, Л.Е.Голуб, С.А.Тарасенко (Санкт Петербург, Россия) и В.И.Белиничером, И.Д.Стурманом, Л.И.Магариллом и М.В.Энтиным (Новосибирск, Россия) теоретически исследованы механизмы циркулярного и линейного фотогальванического эффекта в пьезоэлектриках и сегнетоэлектриках. Показано, что возникновение фотоэдс в однородных средах без центра симметрии обусловлено асимметрией актов рассеяния носителей тока на фононах, на фотонах или на примесях.

Вместе с вышеуказанными не исследованы: механизмы оптических и фотогальванических эффектов (ФГЭ) в зависимости от сложности зонной структуры пьезоэлектрика и от степени поляризации света, механизмы баллистического линейного фотогальванического эффекта, обусловленные

двухфотонными оптическими переходами с учетом особенности зоны кристалла, микроскопическая теория таких явлений, как нелинейное поглощение света и линейно-циркулярного дихроизма в пьезоэлектрических кристаллах. Поэтому необходимы тщательные научные исследования в этой области, которые теоретически исследованы в настоящей диссертации.

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

Целью исследования является исследование механизмов двух- и трехфотонных оптических и линейного фотогальванического эффекта в пьезоэлектриках при их освещении поляризованным излучением, а также спин-зависимое размерное квантование.

Задачи исследования:

исследование механизмов многофотонных оптических и баллистических фотогальванических эффектов в пьезополупроводниках со сложной зоной;

исследование механизмов двухфотонного баллистического линейного ФГЭ в пьезокристаллах, обусловленного асимметричным рассеянием электронов на фононах;

сопоставление теоретических расчетов с экспериментальными данными по спектральной или температурной зависимости тока линейного фотогальванического эффекта в пьезокристаллах;

изучение спин-зависимого размерного квантования энергетического спектра носителей тока.

Объектами исследования выбраны двух и трехмерные пьезокристаллы кубической симметрии дырочной проводимости.

Предметами исследования являются трех и четырех фотонный линейно-циркулярный дихроизм и двухфотонный баллистический ФГЭ и спин-зависимое размерное квантование в пьезокристаллах.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использованы методы расчетов квантовой теории твердого тела и физической кинетики: диаграммная техника Келдыша, теория матрицы переноса и матрицы плотности, теория возмущений и золотое правило квантовой механики, а также кинетическое уравнение Больцмана.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые рассчитана спектральная зависимость трех- и четырехфотонного линейно-циркулярного дихроизма в пьезокристаллах кубической симметрии с учетом одновременного трехфотонного поглощения

света, вычислены спектральные и температурные зависимости коэффициентов двух- и трехфотонного поглощения света в пьезокристаллах тетраэдрической симметрии;

впервые на основе диаграммной техники Келдыша создан баллистический механизм двухфотонного линейного фотогальванического эффекта в пьезокристаллах с учетом одновременного поглощения двух фотонов;

доказано, что двухфотонный баллистический механизм возникает при учете линейного, квадратичного и кубического по волновому вектору слагаемые в эффективном гамильтониане дырок;

рассчитан энергетический спектр носителей тока с учетом спин-зависимого размерного квантования в пьезокристаллах.

Практические результаты исследования заключается в следующем:

применением результатов исследования двух-фотонных оптических и фотогальванических эффектов оптимизированы оптические характеристики устройств голографических записей, сохранение в памяти и переобработки информации, оптоэлектронных систем;

методы расчета размерного квантования и туннелирования в многослойных пьезокристаллах использованы в низкоразмерной системе носителей тока пьезокристаллов;

развиты методы расчетов физической кинетики в низкоразмерных системах носителей тока и в кристаллах без центра инверсии, которые закладывают прочную основу для интерпретации экспериментальных результатов по фотонно-кинетическим эффектам.

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

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов диссертации заключается в получении новых данных о поляризационной, спектральной и температурной зависимостях коэффициента многофотонного поглощения света и тока двухфотонного линейного фотогальванического эффекта в пьезокристаллах, а также данными о свойстве размерного квантования в пьезокристаллах.

Практическая значимость работы заключается в применении фотонно-кинетических явлений поляризационно зависимых оптических и фотогальванических эффектов для регистрации излучения, позволяющих расширить частотный диапазон фотоэлементов и проводить регистрацию не только по интенсивности, но и по поляризации света.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных результатов по исследованию нелинейного поглощения света,

двухфотонного баллистического тока и размерного квантования в пьезоэлектриках:

Результаты исследования, проведенного в области поляризационно-зависимых оптических и фотоэлектрических явлений в объемных пьезокристаллах и размерно-квантованных структурах, использованы в гранте ОТ-Ф2-07117 «Исследование влияния света на вольт-амперную характеристику деформационного р-п перехода в поле сверхвысоко – частотного электромагнитного поля» при объяснении влияния электромагнитной волны на поток носителей тока в пьезополупроводниковых пленках (Справка Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан 89-03-2653 от 27 июля 2020 г.). Использование научных результатов дает возможность объяснению физических свойств токопереноса в поликристаллических пьезополупроводниках в зависимости от электромагнитного поля;

результаты теоретических расчетов по нелинейному одно-и двухфотонному поглощению поляризованного света использованы в проекте Ф2-ОТ-О-1594 «Улучшение эффективности светодиодов, фотоэлементов и других оптоэлектронных устройств на основе исследований экситонов, поляронов и биполяронов в гетеро-и наносистемах с квантовой точкой» при исследовании разрешенных и запрещенных оптических переходов в фотоэлектрических светодиодах (Справка Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан 89-03-2653 от 27 июля 2020 г.). Использование научных результатов дает возможность теоретическому изучению переходов электронов в пьезокристаллах с участием поляронов и биполяронов.

Апробация результатов исследований. Результаты исследования докладывались и обсуждались на 5 международных и 4 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, в том числе 9-научные статьи в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций, 7 из них в зарубежных научных журналах.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы. Объём диссертации составляет 113 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Данная диссертация посвящена исследованию многофотонных оптических и фотовольтаических эффектов, зависящих от степени поляризации света, а также спин-зависимого размерного квантования энергетического спектра носителей тока в пьезокристаллах со сложной зоной.

Во введении обоснована актуальность и необходимость темы диссертации, соответствие проведенных научных исследований приоритетным

направлениям развития науки и технологии в нашей стране, проведен обзор научных исследований по теме за рубежом и в Узбекистане, проанализирован уровень исследования проблемы, приведена информация о целях, задачах, предмете и объекте исследования, научной новизне и практической ценности исследования и их применения, об опубликованных работах и структуре диссертации.

В первой главе **“Поляризационно-зависимый фототок в пьезокристаллах”** обсуждены состояние и развитие оптических и фотогальванических эффектов в пьезополупроводниковых кристаллах без центра симметрии в связи с использованием их в пьезокристаллах в области опто-и фотоэлектроники, а также в голографических записях информации.

Проведен анализ состояния исследований одно-и двух-квантовых поляризационно-и спин-зависимых фотогальванических эффектов в низко-размерных и в объемных пьезокристаллах, в графене, в топологических изоляторах и в полуметаллах Вейля, возникающих при их однородном стационарном освещении.

Дается феноменологическая интерпретация поляризационно-зависимых фототоков в пьезокристаллах при одно-и двухфотонном поглощении излучения. В частности, если в квантово-механической теории эффекта фотонного увлечения речь идет об одновременной передаче импульса и углового момента от фотона к носителям тока, то в классической теории этот же эффект описывается как движение носителей тока под действием силы Лоренца, обусловленной одновременным воздействием электрического и магнитного поля световой волны.

Физическая природа поляризационно зависимого фотогальванического эффекта обладает рядом особенностей. Одна из этих особенностей состоит в том, что в пьезокристаллах без центра инверсии не выполняется принцип детального равновесия, поскольку они не отражают каких-либо пространственно-временных свойств симметрии.

Нарушение принципа детального равновесия приводит к асимметрии рассеяния электронов, что существенно изменяет кинетические свойства кристалла и создает возможность для возникновения электрического тока в произвольном неравновесном стационарном состоянии.

Если это неравновесное состояние обусловлено освещением, то возникает фотогальванический ток, направление которого определяется как симметрией кристалла, так и поляризацией света.

Фототок, квадратичный по интенсивности (I) света, имеет вид

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

где $\vec{e}(\vec{q})$ – вектор поляризации (волновой вектор) электромагнитной волны и учтено, что симметризованные $(e_{\beta} e_{\gamma}^{*} + e_{\gamma} e_{\beta}^{*})/2$ и антисимметризованные

$(e_\beta e_\gamma^* - e_\gamma e_\beta^*)/2$ произведения преобразуются по независимым представлениям. Так как величины $[e_m e_n^*]$, $i(\vec{e}^* \times \vec{e})$ и стационарный ток $\vec{j}^{(2)}$ вещественны, потому тензоры $A_{\alpha\beta\gamma\mu\nu}$, $B_{\alpha\beta\gamma\lambda}$, $C_{\alpha\beta\gamma}$ в (1) также вещественны. Тензор третьего ранга $C_{\alpha\beta\gamma}$ симметричен β , γ и по симметричным свойствам аналогичен пьезотензору. Поэтому тензор $C_{\alpha\beta\gamma}$, как и тензоры пятого ранга $A_{\alpha\beta\gamma\mu\nu}$, имеет отличные от нуля компоненты в кристаллах без центра симметрии. Тензор $B_{\alpha\beta\gamma\lambda}$ имеет отличные от нуля компоненты в кристаллах произвольной симметрии, в том числе и в кристаллах без центра инверсии.

Фототок, связанный с третьим слагаемым (1), отличен от нуля лишь для эллиптически поляризованного света и не возникает как при освещении линейно поляризованным, так и при освещении неполяризованным светом. Поэтому эффект, описываемый тензором $B_{\alpha\beta\gamma\lambda}$, называют двухфотонным циркулярным фотогальваническим эффектом.

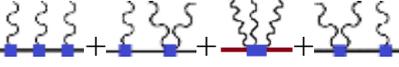
Эффект, описываемый тензором $A_{\alpha\beta\gamma\mu\nu}$, обычно наблюдается при освещении линейно поляризованным светом и его удобно называть двухфотонным линейным фотогальваническим эффектом.

Фототок, связанный со вторым слагаемым (1), отличен от нуля при одновременном освещении эллиптически и линейно поляризованным светом. Именно последним вкладом в общий фототок отличаются двухфотонные поляризационные фотогальванические эффекты от однофотонных.

Судя по симметрии тензоров $A_{\alpha\beta\gamma\mu\nu}$, $B_{\alpha\beta\gamma\lambda}$, $C_{\alpha\beta\gamma}$ по отношению к операции инверсии времени можно анализировать, связаны ли эффекты, описываемые ими, с процессами диссипации. Поэтому уместно отметить, что линейный ФГЭ описывается δ -функциями Дирака, соответствующими законам сохранения энергии, а циркулярный ФГЭ – не связан с процессами диссипации.

Во второй главе **“Линейно-циркулярный дихроизм многофотонного поглощения в пьезоэлектриках со сложной валентной зоной”** теоретически исследовано поглощение света, обусловленное многофотонными оптическими переходами между подзонами легких и тяжелых дырок в пьезоэлектрических кристаллах кубической симметрии: рассчитаны матричные элементы оптических переходов, квантово-механически проанализирован линейно-циркулярный дихроизм (отношение вероятности поглощения линейно-поляризованного света к вероятности поглощения циркулярно-поляризованного света) трех и четырехфотонного поглощения света, проведены расчеты спектральной и температурной зависимости коэффициента двух и трех-фотонного поглощения света.

При анализе трех фотонных оптических переходов учтены поглощения трех отдельных фотонов, изображаемые Фейнмановской диаграммой , поглощение, где сначала поглощается один фотон, далее одновременно поглощаются два фотона, изображаемые Фейнмановской диаграммой , а также поглощение, где сначала одновременно

поглощаются два фотона, далее поглощается один фотон, изображаемые Фейнмановской диаграммой , одновременное поглощение трех фотонов, изображаемые Фейнмановской диаграммой . После углового усреднения по телесным углам волнового вектора дырок квадрата модуля матричных элементов оптических переходов, изображаемые Фейнмановскими диаграммами  имеем:

для линейно поляризованного света

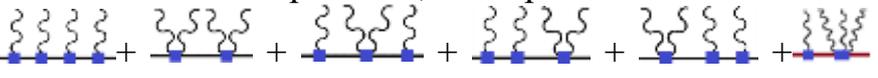
$$\left\langle \sum_{m=\pm 3/2; m'=\pm 1/2} |M_{m,m'}^{(3)}|^2 \right\rangle_{linear} = \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^6 \left(\frac{B^2 k}{\hbar\omega} \right)^2 \left[21,5 + 4,9 \frac{\hbar\omega}{B^2 k} D' + 0,5 \left(\frac{\hbar\omega D'}{B^2 k} \right)^2 \right], \quad (2)$$

для циркулярно поляризованного света

$$\left\langle \sum_{m=\pm 3/2; m'=\pm 1/2} |M_{m,m'}^{(3)}|^2 \right\rangle_{circ} = \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^6 \left(\frac{B^2 k}{\hbar\omega} \right)^2 \left[22,5 + 7,8 \frac{\hbar\omega}{B^2 k} D' + 0,49 \left(\frac{\hbar\omega D'}{B^2 k} \right)^2 \right] \quad (3)$$

Из этих выражений имеем, что, если при расчетах трехфотонных оптических переходов учесть одновременное поглощение трех фотонов, то результирующий коэффициент трехфотонного линейно-циркулярного дихроизма зависит от зонного параметра (D') перед кубическим по волновому вектору слагаемым в эффективном гамильтониане дырок. Например, если для p -GaAs считать, что зонный параметр положителен и $D' = 3,9 \times 10^{-23} \text{ eV} \cdot \text{sm}^3$, то для следующих величин: $\lambda = 10,6 \text{ mkm}$ - длина волны света, зонный параметр перед квадратичным по волновому вектору дырок в гамильтониане $B = 5,66 \times 10^{-38} \text{ J} \cdot \text{m}^2$ величина $\frac{\hbar\omega}{B^2 k} D'$ принимает значение $2,55 \times 10^{-2} \ll 1$, где \vec{k} - волновой вектор дырок, участвующих в межподзонных оптических переходах, определяемый законом сохранения энергии. Таким образом, вклад оптических переходов, сопровождаемых одновременным поглощением трех фотонов в результирующий четырехфотонный коэффициент линейно-циркулярного дихроизма для p -GaAs в случае $\lambda = 10,6 \text{ mkm}$ не превышает 3% и этот вклад, как и в трехфотонном поглощении света, увеличивается с ростом частоты света.

Четырехфотонные оптические переходы между подзонами валентной зоны пьезокристалла состоят из нескольких этапов: на первом этапе поглощаются четыре отдельные фотона, на втором этапе сначала поглощаются два отдельных фотона, а затем одновременно поглощаются два фотона, на третьем этапе происходит одновременное поглощение двух фотонов два раза, на последнем этапе сначала поглощается один фотон, а затем одновременно поглощаются три фотона (и наоборот). После углового усреднения по телесным углам волнового вектора дырок квадрата модуля матричных элементов оптических переходов, изображаемых Фейнманов-

скими диаграммами  получим:

для линейно поляризованного света

$$\left\langle \sum_{m=\pm 3/2; m'=\pm 1/2} |M_{m,m'}^{(4)}|^2 \right\rangle_{linear} = \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^8 \left(\frac{B^2}{\hbar\omega} \right)^2 \left[649 + 96 \frac{\hbar\omega}{B^2 k} D' + 98 \left(\frac{\hbar\omega D'}{B^2 k} \right)^2 \right], \quad (4)$$

для циркулярно поляризованного света

$$\left\langle \sum_{m=\pm 3/2; m'=\pm 1/2} |M_{m,m'}^{(4)}|^2 \right\rangle_{circ} = \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^8 \left(\frac{B^2}{\hbar\omega} \right)^2 \left[350 + 106 \frac{\hbar\omega}{B^2 k} D' + 94 \left(\frac{\hbar\omega D'}{B^2 k} \right)^2 \right], \quad (5)$$

Из последних выражений видно, что вклад оптических переходов, сопровождаемых одновременным поглощением трех фотонов в результирующий четырехфотонный коэффициент линейно-циркулярного дихроизма, не превышает 6% и этот вклад увеличивается с ростом частоты света.

Из спектральной зависимости коэффициентов двух ($K^{(N=2)}(\omega)$) и трех ($K^{(N=3)}(\omega)$) фотонного поглощения света, обусловленного оптическими

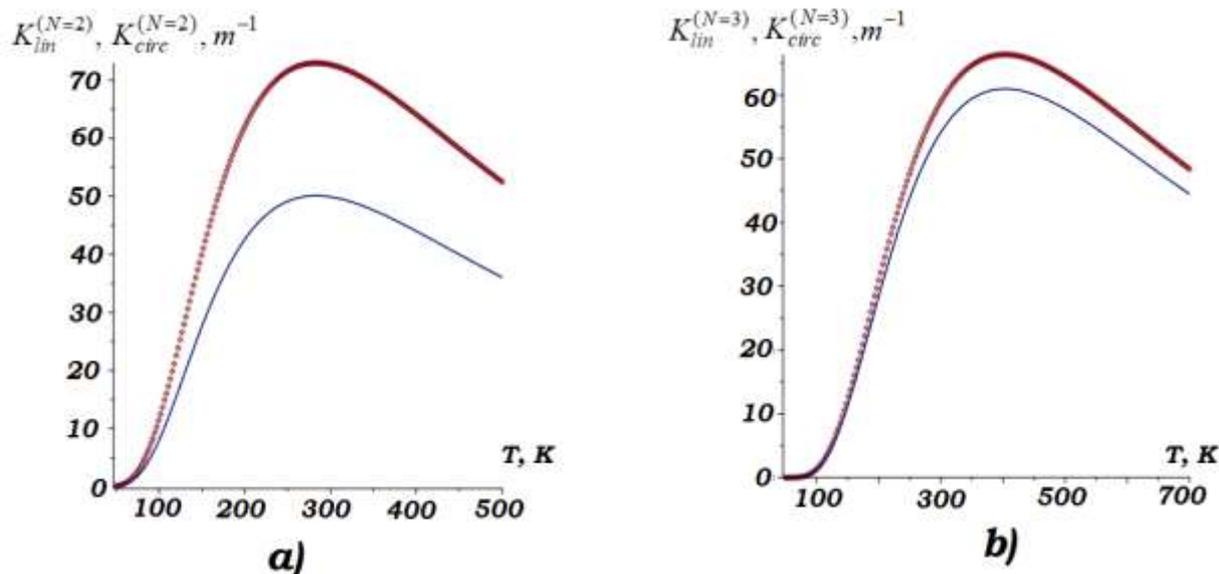


Рис. 1. Температурная зависимость двух и трехфотонных поглощений линейно ($K_{lin}^{(N=2)}(T)$ и $K_{lin}^{(N=3)}(T)$ ромбики) и циркулярно ($K_{circ}^{(N=2)}(T)$ и $K_{circ}^{(N=3)}(T)$ сплошные линии) поляризованного света длиной волны $\lambda = 10,6 \mu m$ в $p - GaAs$.

переходами между подзонами валентной зоны пьезокристалла кубической симметрии дырочной проводимости (рис.1) видно, что: во-первых, с ростом частоты света коэффициент поглощения света сначала растет, достигает до максимума и далее падает, во-вторых, возникает линейно-циркулярный дихроизм в двух и трехфотонном поглощении света, т.е. поглощение зависит от степени поляризации поглощаемого света. В частности, в максимуме

спектральной зависимости $K^{(N=2)}(\omega)$ коэффициент линейно-циркулярного дихроизма равен 1,4, а для $K^{(N=3)}(\omega)$ -равен 1,1.

Расчеты показывают, что при уменьшении температуры в 1,5 раза, максимумы в спектральных зависимостях $K^{(N=1)}(\omega)$, $K^{(N=2)}(\omega)$ уменьшаются в 1,4 раза, а зависимость $K^{(N=3)}(\omega)$ остается без изменения. Из спектральной зависимости одно ($K^{(N=1)}(\omega)$) и двух ($K^{(N=2)}(\omega)$) фотонного поглощения линейно-поляризованного света (рис.2) видно, что в *p-GaAs* при комнатной температуре в области малых частот двухфотонное поглощение доминирует по отношению к однофотонному поглощению при выполнении условия

$$K^{(N=1)}.$$

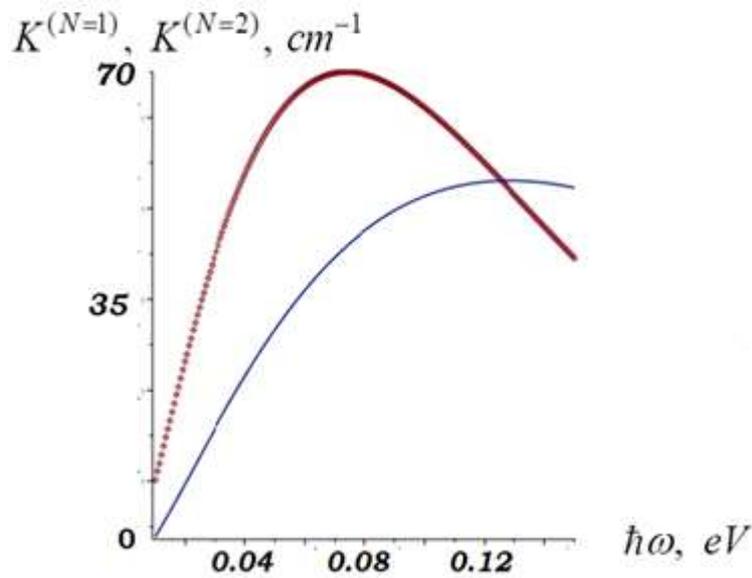


Рис. 2. Спектральные зависимости одно ($K^{(N=1)}$, сплошная линия) и двух ($K^{(N=2)}$, ромбики) фотонного поглощения линейно поляризованного света в *p-GaAs* при $T = 300$ K.

В третьей главе “Двухфотонный баллистический ток в пьезоэлектриках” рассмотрено квантово-механическое описание поляризационных фотогальванических эффектов при нелинейном поглощении света. Фототок имеет два вклада: диагональный и недиагональный по номерам зон (или подзон)

$$\vec{j}_{бал} = -e \sum_{n\vec{k}} \vec{V}_{n\vec{k}} f_{n\vec{k}}, \quad \vec{j}_{сов} = -e \sum_{n \neq n', \vec{k}} \vec{V}_{n'n}(\vec{k}) \rho_{nn'}(\vec{k}), \quad (6)$$

где e -элементарный заряд ($e > 0$ для дырок, $e < 0$ для электронов), $\rho_{nn'}(\vec{k})$ и $\vec{V}_{n'n}(\vec{k})$ -матричные элементы матрицы плотности и оператора скорости, $\vec{V}_{n\vec{k}} = \hbar^{-1} \vec{\nabla}_{\vec{k}} E_{n\vec{k}}$ - групповая скорость электрона в зоне n с волновым вектором

\vec{k} , $\rho_m(\vec{k}) = f_{n\vec{k}}$ -неравновесная стационарная функция распределения, определяемая процессами генерации, рассеяния и рекомбинации, n и n' нумеруют подзоны сложной зоны.

Диагональный вклад в (6) определяется асимметрией функции распределения, индуцированной светом, и имеет название баллистический вклад. Недиагональный вклад связан со сдвигом свободных носителей в реальном пространстве при квантовых переходах, его называют сдвиговым фототоком.

Рассмотрим двухфотонный поляризационно-зависимый ФГЭ, представляющий собой генерацию постоянного тока за счет двухфотонного поглощения поляризационного света в пьезокристаллах без центра симметрии со сложной зоной в отсутствие внешнего постоянного электрического поля и пространственных неоднородностей. При этом будем учитывать как последовательное, так и одновременное поглощение двух фотонов (рис.3).

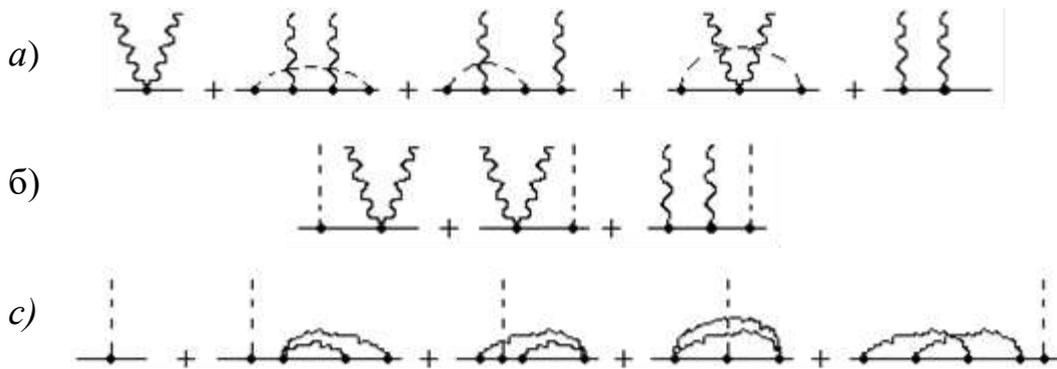


Рис.3. Диаграммы Фейнмана-Келдыша, интерференция которых приводит к поляризационно-зависимому двухфотонному фотогальваническому эффекту в пьезополупроводниках. Сплошная линия-электрон или дырка, волнистая-фотон, штриховая-фонон.

Физическая природа поляризационно-зависимого фототока, как указано выше, определяется симметрией кристалла, в частности, отсутствием в нем центра инверсии, где не всегда выполняется принцип детального равновесия. В результате произвольное неравновесное стационарное состояние в среде приводит к возникновению в ней потока квазичастиц, например, потока фотовозбужденных носителей тока.

По природе поляризационно-зависимый фототок определяется асимметрией взаимодействия электронов с фононами, фотонами и другими неоднородностями кристаллических структур, т.е. асимметричной частью вероятности двухфотонных оптических переходов $W_{n'\vec{k}',n\vec{k}}^{(2,ass)}$. Вклады в $W_{n'\vec{k}',n\vec{k}}^{(2,ass)}$ дает интерференция двух матричных элементов третьего порядка или интерференция матричных элементов первого и пятого, второго и четвертого

порядков. При этом баллистический линейный ФГЭ возникает лишь при выполнении закона сохранения энергии не только для начального и конечного состояний, но и для одного из промежуточных состояний.

Соответственно имеются три типа переходов, дающих вклад в ток баллистического линейного ФГЭ, показанные на рис.3. Видно, что линейный ФГЭ возникает за счет интерференции процессов первого и пятого (канал *c*), второго и четвертого порядков как с участием (канал *б*), так и без участия (канал *а*) фонона и двух процессов третьего порядка.

Баллистический линейный ФГЭ при двух-фотонном поглощении света в пьезокристаллах, как и при однофотонном приближении, описывается

$\Phi_i(\vec{k}, \vec{k}')$ функциями, каждая из которых определяется мнимой частью произведения матричных элементов операторов электрон-фононного и электрон-фотонного взаимодействий, выбранных в определенном порядке. При этом, необходимо учесть, что нижние индексы m, n, l в матричных элементах операторов взаимодействия пробегает значения номеров подзон (или ветвей) рассматриваемой зоны. Например, для валентной зоны пьезокристалла типа $p-GaAs$ $m, n, l = 1, 2$. Заметим, что наряду с $\Phi_i(\vec{k}, \vec{k}')$ функциями, имеются функции, в которых надо провести замену

$$M_{2\vec{k}, 1\vec{k}}^{(2)} \rightarrow \sum \frac{M_{2\vec{k}, i\vec{k}}^{(1)} M_{i\vec{k}, 1\vec{k}}^{(1)}}{E_{i\vec{k}} - E_{1\vec{k}} - i0}.$$

В частности, для $p-GaAs$ волновой вектор фотовозбужденных дырок при двухфотонном поглощении света: $k_\omega = \sqrt{2\mu\omega/\hbar}$, а энергия

тяжелых(легких) дырок $E_{hh(lh)}^* = \frac{2m_{lh(hh)}}{m_{hh} - m_{lh}} \hbar\omega$, $m_{hh} = m_1(m_{lh} = m_2)$ - эффективная

масса тяжелой(легкой) дырки, где выбран сферический энергетический спектр дырок. Тогда, в зависимости от типа оптических переходов, обусловленных прямыми оптическими переходами дырок между ветвями валентной зоны, энергия промежуточного состояния дырок принимает различные значения.

Волновые вектора промежуточных состояний легких дырок определяются последними соотношениями лишь при замене в них $m_{hh} \rightarrow m_{lh}$. Также отметим, что в области частот, когда энергии дырок меньше, чем $\hbar\Omega$, процессы с испусканием фононов (если они разрешены) не дают вклада в ток баллистического линейного ФГЭ.

Например, для процесса в приближении бесконечно тяжелых дырок в пьезокристаллах типа $p-GaAs$, часть процессов, описываемая

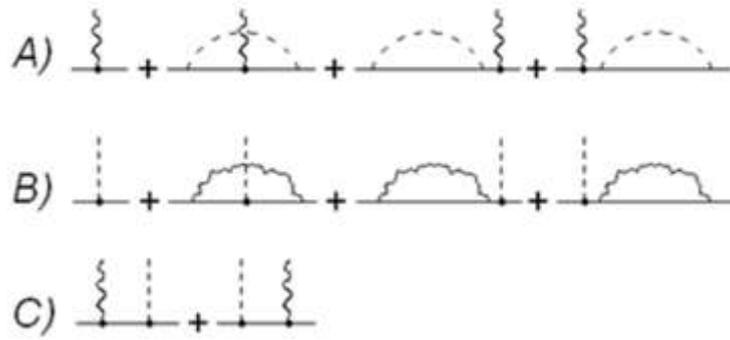
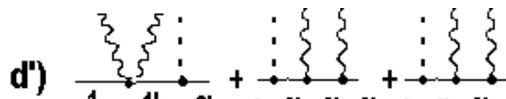
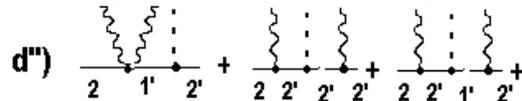


Рис.4. Диаграммы Фейнмана-Келдыша, интерференция которых приводит к линейному фотогальваническому эффекту в пьезополупроводниках со сложной зоной. Сплошная линия – электрон (дырка), волнистая – фотон, штриховая – фонон.



диаграммами $d')$ не дают вкладов в фототок, потому что при этом не происходит асимметричное рассеяние. Отметим, что



в процессах типа $d'')$ дают вклады в фототок тогда, когда энергия фонона достигает энергии двух фотонов. Отметим, что проводя замену двухфотонных оптических переходов, представленных на рис.4, на однофотонные и учитывая вероятность асимметричного рассеяния оператора электрон-фотонного и электрон-фононного взаимодействий, рассчитана спектральная и температурная зависимость баллистического фототока. На рис.5 представлена температурная зависимость величины χ_{xyz} / p в p -GaAs, обусловленной межподзонами оптическими переходами с участием фотона энергией 117 meV , где χ_{xyz} - фотогальванический тензор, p - концентрация дырок. Из рис. 5 видно, что вклады в фототок оптических переходов, где фотоны (1-линия) и фононы (2-линия) реальные, имеют положительный знак, а вклад оптических переходов, где и фононы, и фотоны реальные, то этот вклад отрицательный. Это означает, что фототок, возникающий при асимметричном рассеянии дырок при оптических переходах, когда фотоны и фононы реальные, противоположно направлен относительно остальных вкладов в фототок.

Теоретическая температурная зависимость суммарного χ_{xyz} представлена на рис.6 и сопоставлена с экспериментальными результатами, проведенными в p -GaAs при освещении CO_2 -лазером с энергией фотона $\hbar\omega = 117 \text{ meV}$. При количественных расчетах выбраны следующие параметры: $m_2 = 0,068m_0$ и $m_1 = 0,12m_0$ - эффективные массы легких и тяжелых дырок,

$C = e\Omega_{LO} \sqrt{\frac{4\pi\rho}{\varepsilon^*}}$ - константа фрелиховского электрон-фононного взаимодействия,

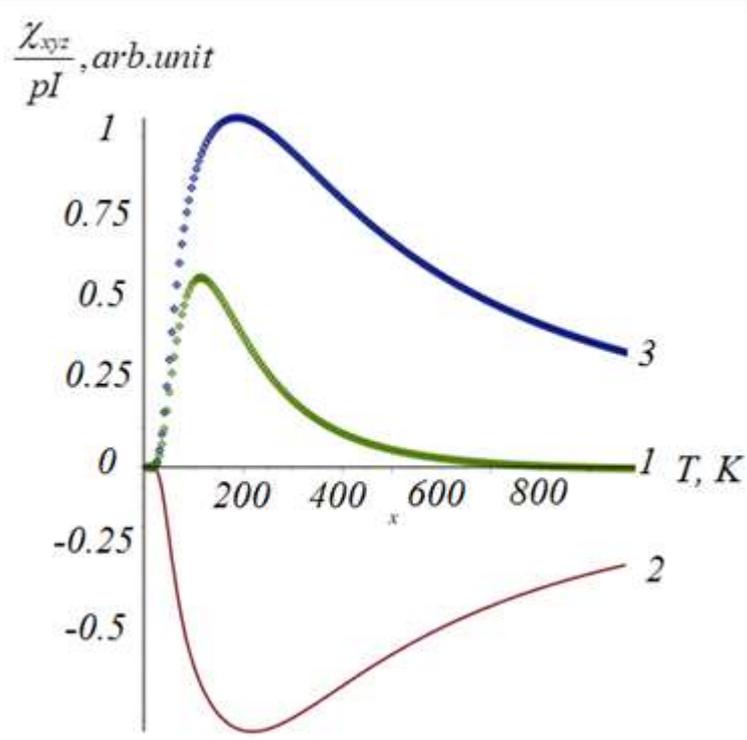


Рис. 5. Температурная зависимость величины $\chi_{xyz}/(p \cdot I)$ в p -GaAs при оптических переходах между подзонами валентной зоны при энергии фотонов 117 мэВ, где, $p = 7,4 \cdot 10^{22} m^{-3}$ – концентрация дырок, χ_{xyz} – тензор однофотонного линейного фотогальванического эффекта.

$\varepsilon^{*-1} = \varepsilon_{\infty}^{-1} - \varepsilon_0^{-1}$, ε_0 и ε_{∞} -статическая и высокочастотная диэлектрическая проницаемость, d_0 -константа деформационного электрон-фононного взаимодействия, $d_0 a_0 = 48 eV$ (a_0 - постоянная кристаллической решетки), $\hbar\Omega_{LO} = 36 meV$ -энергия оптического фонона.

В четвертой главе “Спин-зависимое размерное квантование в пьезокристаллах тетраэдрической симметрии” теоретически исследовано спин-зависимое размерное квантование в пьезокристаллах тетраэдрической симметрии. При исследовании размерного квантования энергетического спектра электронов учтено, что кинетическая энергия электронов меньше, их характерной энергии. В этом случае гамильтониан, описывающий эффект размерного квантования в слое l имеет вид

$$\hat{H}_l^{(\zeta)} = -\frac{\hbar^2}{2m_l^*} \frac{\partial^2}{\partial x_{\zeta}^2} + \frac{\hbar^2 (\vec{k}_{\perp}^{(\zeta)})^2}{2m_l^*} + V_l(x_{\zeta}) + \hat{H}_l^{(\zeta D)}, \quad (7)$$

где $\zeta = 1, 2, 3$ соответствуют интерфейсам yz , xz и xy , $(\vec{k}_\perp^{(1)})^2 = k_z^2 + k_y^2$, $(\vec{k}_\perp^{(2)})^2 = k_x^2 + k_z^2$, $(\vec{k}_\perp^{(3)})^2 = k_x^2 + k_y^2$, $x_1 = x$, $x_2 = y$, $x_3 = z$.

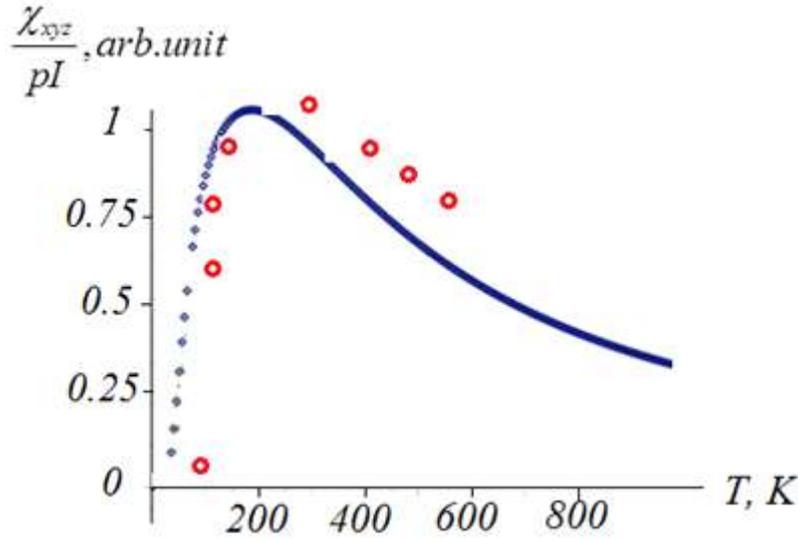


Рис. 6. Температурная зависимость величины $\chi_{xyz}/(p \cdot I)$ в p -GaAs при оптических переходах между подзонами валентной зоны при энергии фотонов 117 мэВ, где ромбики – теория, кружки – эксперимент, $p = 7,4 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ – концентрация дырок, χ_{xyz} – тензор однофотонного линейного фотогальванического эффекта.

Волновая функция электронов выбрана

$$\psi_l^{(\zeta\pm)} = \chi_l^{(\pm)} u_l^{(\zeta\pm)}(x) e^{i\vec{n}_\perp \vec{k}_\perp^{(\zeta)}}, \quad \chi_l^{(\pm)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ \mp e^{-i\varphi} \end{pmatrix} \quad (8)$$

так, чтобы диагонализировали гамильтониан Дрессельхауза $\hat{H}_l^{(D1)}$. Здесь φ – полярный угол между составляющими волнового вектора \vec{k}_\perp и интерфейса гетероструктур, верхний знак соответствует электронам со спином (+1/2), а нижний – электронам со спином (-1/2).

Уравнение Шредингера, соответствующее волновым функциям $u^{(\pm)}(z)$ принимает вид

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m_l^{(\zeta)}} \frac{\partial^2}{\partial x_\zeta^2} + V_l(x_\zeta) \right] u_l^{(\zeta\pm)}(x_\zeta) = E_l^{(\zeta)} u_l^{(\zeta\pm)}(x_\zeta), \quad (9)$$

где $m_l^{(\zeta\pm)} = m_l^{(*)} \left(1 \pm \frac{2\gamma_l m_l^{(*)} k_\perp^{(\zeta)}}{\hbar^2} \right)^{-1}$ и она зависит от величины

$$\kappa_l^{(\zeta\pm)} = \sqrt{\frac{2m_l^{(\zeta\pm)}}{\hbar^2} (V_l - E_l^{(\zeta\pm)})}.$$

При решении (9) считаем, что в каждом слое структуры потенциал $V_l(z) = V_l = const$, тогда при условии $u_l^{(\zeta\pm)}(x_\zeta = a) = 0$ получим

$$E_l^{(\zeta\pm)} = V_l + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_l^* a^2} \left(n_l^{(\zeta\pm)} \right)^2 \left(1 \pm \frac{2\gamma_l m_l^{(*)} k_\perp^{(\zeta)}}{\hbar^2} \right), \quad (10)$$

где $n_l^{(\zeta\pm)} = 1, 2, \dots$

На рис.7 представлено размерное квантование энергетического спектра электронов в *GaAs*, рассчитанное по формуле (10) для разных значений $n_l^{(\zeta\pm)} = n$.

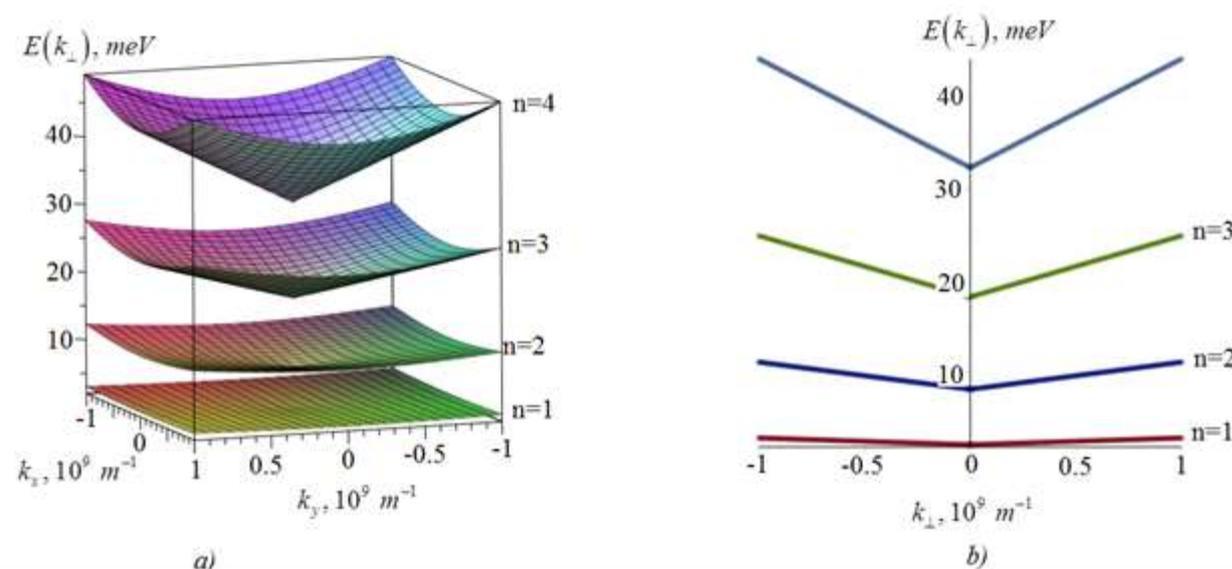


Рис.7. Трех (a) и двух (b) мерное спин-зависимое размерное квантование энергетического спектра электронов в *GaAs*.

При расчетах значения зонных параметров выбраны из следующей таблицы.

Таблица 1. Зонные параметры полупроводников $A_{III}B_V$

	<i>GaSb</i>	<i>InAs</i>	<i>GaAs</i>	<i>InP</i>	<i>InSb</i>
$\gamma_l, 1.6 \times 10^{-49} J \cdot m^3$	187	130	24	8	220
m_l^*/m_0	0.041	0.023	0.067	0.081	0.013

По табл.1 величина $\frac{2\gamma_l m_l^{(*)} k_\perp^{(\zeta)}}{\hbar^2}$ для полупроводника *InSb* равна $1,74 \cdot 10^{-11} \cdot k_\perp^{(\zeta)}$, а для *GaSb* – $4 \cdot 10^{-12} \cdot k_\perp^{(\zeta)}$. Тогда можно не учитывать спин-зависимый вклад в гамильтониан Дрессельхауза, зависящий от эффективной массы электронов. По этой причине учет данного вклада в волновой вектор электронов с $k_\perp^{(\zeta)} \sim 10^9 m^{-1}$ при расчете их волной функции и перехода через потенциальный барьер с конечной высотой не приводит к заметной погрешности.

Определено, что размерно-квантованный энергетический спектр электронов неэквидистантен и зависит от их двумерного волнового вектора, направленного по интерфейсу гетероструктуры (рис.7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследования, проведенного по теме диссертации доктора философии (PhD) **“Нелинейное поглощение света, двухфотонный баллистический ток и размерное квантование в пьезоэлектриках”** сделаны следующие выводы:

1. Развита теория поляризационно-зависимых многофотонных оптических и фотогальванических эффектов для пьезокристаллов со сложной зонной структурой, обусловленная одновременным поглощением двух и трех фотонов.
2. Рассчитаны спектральные и температурные зависимости коэффициентов двух и трехфотонного поглощения света и построена количественная теория многофотонного линейно-циркулярного дихроизма в пьезокристаллах со сложной зоной, где учтено одновременное поглощение трех фотонов.
3. Приведена феноменологическая теория тока двухфотонного фотогальванического эффекта в пьезокристалле и на её основе теоретически проанализированы типы фотогальванических эффектов, возникающие в зависимости от симметрии образца.
4. Построена квантово-механическая теория двухфотонного баллистического фотогальванического эффекта в пьезокристалле со сложной зоной и созданы механизмы, обусловленные асимметрией вероятности оптических переходов, происходящих между подзонами валентной зоны.
5. Рассчитаны температурные зависимости поляризационно-зависимого однофотонного тока в пьезокристаллах симметрии тетраэдра в зависимости от типа оптических переходов и сопоставлены теоретические и экспериментальные результаты фототока.
6. Рассчитано спин-зависимое размерное квантование энергетического спектра электронов в пьезокристаллах тетраэдрической симметрии с простой зоной в приближении Дрессельхауза. Определено, что размерно-квантованный энергетический спектр электронов неэквидистантен и зависит от их двумерного волнового вектора, направленного по интерфейсу гетероструктуры.

**SCIENTIFIC COUNCIL PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 ON AWARD OF
PHYLOSOFY DOCTOR DEGREE AT THE FERGANA POLITECHNICAL
INSTITUTE OF UZBEKISTAN**

KOKAND STATE PEDAGOGICAL INSTUTUTE

SULTONOV RAVSHANJON RUSTAMOVICH

**NONLINEAR ABSORPTION OF LIGHT, TWO PHOTONIC BALLISTIC
CURRENT AND DIMENSIONAL QUANTIZATION IN PIEZOELECTRICS**

01.04.07 – Condensed matter physics

**DISSERTATION ABSTRACT
of the Doctor of Philosophy (PhD) on Physical and Mathematical Sciences**

Fergana – 2020

The theme of dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under No. B2020.2.PhD/FM487

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at the Kokand pedagogical institute.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of Scientific Council at www.ferpi.uz and on the website of «Ziyonet» informational and educational portal at www.ziyonet.uz.

Scientific supervisor: **Rasulov Voxob Rustamovich**
Doctor of Philosophy in Physics and Mathematics, docent

Official opponents: **Ayukhanov Rashid Axmetovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Sultonov Nomonjon Akramovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Leading organization: **Tashkent State Technical University named after I.Karimova**

The defense of the dissertation will be held on « 6 » 11 2020, at 14:00 at the meeting of Scientific Council No. PhD.03.27.02.2020.FM.106.01 at the Ferghana Polytechnical Institute (Address: 150107, Uzbekistan, Ferghana, 86 Ferghanskaya Str., Tel: (+99873) 241-13-03, (99873) 241-12-06; e-mail: ferpi_info@edu.uz).

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through in the Information-Resource Centre of the Ferghana Polytechnical Institute (registered under No. 0001-9) Address: 150107, Uzbekistan, Ferghana, 86 Ferghana str. Tel: (+99873) 241-13-03.

The abstract of the dissertation was distributed on « 24 » 10 2020
(Registry record No. 01 dated « 24 » 10 2020)



N.H.Yuldashev

Chairman of Scientific Council on award of PhD scientific degree, DSc in physics and mathematics, professor.

B.Z.Polvonov

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

R.Ya.Rasulov

Chairman of Scientific seminar at Scientific Council on award of PhD scientific degree, DSc in physics and mathematics, professor.

INTRODUCTION (annotation of PhD dissertation)

Topicality and relevance of the theme of the dissertation. At present, in the world piezoelectric crystals are becoming increasingly important in the intensive development of the field of bulk and low-dimensional semiconductor electronics, in particular, in nanoelectronics. This is due to the fact that the absorption of polarized radiation transfers the system of charge carriers into a nonequilibrium state, which is characterized by the alignment of the spins and momentum of electrons and holes with nonzero fluxes of quasiparticles and their spins. Deviations from equilibrium and kinetic processes responsible for relaxation to the ground state manifest themselves in optical effects in both bulk and low-dimensional semiconductor devices.

Achievements in piezoelectric crystal technology open up new possibilities for creating modern devices with specified parameters and properties. Among them, the ever-increasing interest, in particular, is attracting polarization-dependent photovoltaic phenomena observed in semiconductors. Advances in the implementation of holographic recording devices based on polarization photovoltaic effects in piezoelectric crystals have given an additional impetus to research in the field of semiconductor photonics, a recently formed area of solid state physics. One of the key tasks of photonics is to research the interaction of polarized radiation with current carriers in piezoelectric crystals with a complex valence band and in their nanostructures. In this regard, the investigation of the electronic, optical, and photovoltaic properties of piezoelectric crystals and their size-quantized structures not only open up new directions in nanoelectronics, photonics, and spintronics, but also lead to fundamental scientific research. Therefore, the research of the mechanisms of photonic-kinetic phenomena in piezoelectric crystals with a complex band structure and in their nanostructures, both with and without the effect of coherent saturation, is relevant and serves as the basis for solving the problems posed in the dissertation.

The theoretical researches carried out in this dissertation work correspond to the tasks provided for in the Decree of the President of the Republic of Uzbekistan No. UP-4947 "On the Strategy for the Further Development of the Republic of Uzbekistan for 2017-2021." dated February 7, 2017, Decrees of the President of the Republic of Uzbekistan No. PP-3682 "On measures to further improve the system of practical implementation of innovative ideas, technologies and projects" dated April 27, 2018, No. PP-3698 "On additional measures to improve the mechanisms for introducing innovations in industries and spheres of the economy" of May 7, 2018, as well as in other regulatory documents adopted in this direction.

Correspondence of the research to the priority directions of the development of science and technology of the republic. This dissertation work was carried out in accordance with the priority directions of development of science and technology of the Republic of Uzbekistan: "III. Development of the use of renewable energy sources".

The degree of knowledge of the problem. Researches of polarization-dependent optical and photovoltaic effects in bulk piezoelectric crystals and in their dimensional-quantized structures are carried out at universities and research centers in leading countries of the world. In particular, A.M. Glass (USA) and V.M. Fridkin (Moscow, Russia) experimentally observed anomalously high stationary photovoltage with a duration of several hours in a homogeneous ferroelectric under uniform illumination with polarized light. The charge transfer over several hours is so great that the possibility of explaining this phenomenon with the help of relaxation of fields in crystals is completely ruled out.

This phenomenon was experimentally investigated by K.H. Herman (Germany) and A.F. Gibson (USA) at *GaP*, G. Ribakovs and AA Gundzhian (Canada) and A.A. Rogachev (St. Petersburg, Russia) at Tellure, J.M. Doviak and S.Kotari (USA), S.D. Ganichev (Regensburg, Germany), A.V. Andrianov and I.D. Yaroshetsky (St. Petersburg, Russia) in *p-GaAs*.

A group of Russian scientists led by Academician of the Russian Academy of Sciences Yu.V. Kopaev, Corresponding Member of RAS E.L. Ivchenko, Professors G.E. Pikus, N.S. Averkiev, L.E. Golub, S.A. Tarasenko (St. Petersburg, Russia) and V.I. Belinicher, I.D. Sturman, L.I. Magarill and M.V. Entin (Novosibirsk, Russia) theoretically investigated the mechanisms of the circular and linear photovoltaic effect in semiconductors and ferroelectrics. It is shown that the appearance of the photo-emf in homogeneous environment without a center of symmetry is due to the asymmetry of the acts of scattering of current carriers by phonons, photons, or impurities.

At present, Uzbek scientists E.Z. Imamov and R. Ya. Rasulov theoretically researched a series of mechanisms of the polarization-dependent effect of photon drag and photovoltaic effect in semiconductors with a complex band structure, as well as the optical properties of dimensional-quantized semiconductors.

The connection of the topic of dissertation research with plans for research work of the research institution where the dissertation was completed. The dissertation was carried out within the framework of the OT-F2 (Physics and Astronomy) scientific project "Polarization optical effects in semiconductors and in a size-quantized well" (2007-2011), Foundation for the Support of Fundamental Research at the Presidium of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan (FSFR) 79-06 "Theoretical researches of the kinetic properties of semiconductors and semiconductor nanostructures with the participation of polarized photons" (2006-2010).

The aim of the research is to research of the mechanisms of two- and three-photon optical and linear photovoltaic effects in piezoelectric crystals when they are illuminated by polarized radiation, as well as spin-dependent dimensional quantization.

The tasks of the research:

investigation of the mechanisms of multiphoton optical and ballistic photovoltaic effects in piezoelectric crystals with a complex band;

researching of the mechanisms of two-photon ballistic linear photogalvanic effect (PGE) in piezoelectric crystals caused by asymmetric scattering of electrons by phonons;

comparison of theoretical calculations with experimental data on the spectral or temperature dependence of the current of the linear photogalvanic effect in piezosemiconductors;

researching of spin-dependent dimensional quantization of the energy spectrum of current carriers.

The objects of research work are two and three-dimensional piezoelectric crystals of hole conductivity with cubic symmetry.

The subjects of research are three and four photon linear-circular dichroism and two-photon ballistic PGE and spin-dependent dimensional quantization in piezosemiconductors.

Research methods: to solve the problems posed, the methods of calculating the quantum theory of solids and physical kinetics were used: the Keldysh diagram technique, the theory of transfer and density matrices, perturbation theory and the golden rule of quantum mechanics, as well as the Boltzmann kinetic equation.

The scientific novelty of the research is as follows:

for the first time, the spectral dependence of three- and four-photon linear-circular dichroism in piezoelectric crystals of cubic symmetry was calculated taking into account the simultaneous three-photon absorption of light, also the spectral and temperature dependences of the coefficients of two- and three-photon light absorption in piezoelectric crystals of tetrahedral symmetry were calculated;

for the first time, on the basis of the Keldysh diagram technique, a ballistic mechanism of the two-photon linear photovoltaic effect in piezoelectric crystals was created, taking into account the simultaneous absorption of two photons;

it is proved that the two-photon ballistic mechanism appears when the term in the effective Hamiltonian of holes is taken into account, which is linear, quadratic, and cubic in the wave vector;

the energy spectrum of current carriers is calculated taking into account the spin-dependent dimensional quantization in piezoelectric crystals.

The practical results of the research are as follows:

using the results of the research of two photonic optical and photovoltaic effects, the optical characteristics of devices for holographic recordings, storing and processing information, optoelectronic systems, are optimized;

methods for calculating size quantization and tunneling in multilayer semiconductors are used in a low-dimensional system of semiconductor current carriers;

methods for calculating physical kinetics in low-dimensional systems of current carriers and in crystals without an inversion center have been developed, which lay a solid foundation for the interpretation of experimental results on photon-kinetic effects.

The reliability of the research results.

It is substantiated by the coincidence of theoretical results with experimental data obtained by leading experts in photovoltaics, the correct choice of research objects, the rigor of mathematical calculations, where the methods of quantum statistical physics and physical kinetics are used, used in solid state theory, such as diagrammatic technique for non-equilibrium electronic systems.

Scientific and practical significance of the research results.

The scientific significance of the dissertation results lies in obtaining new data on the polarization, spectral and temperature dependences of the coefficient of multiphoton absorption of light and the current of the two-photon linear photovoltaic effect in piezosemiconductors, as well as data on the property of dimensional quantization in semiconductors.

The practical significance of the work lies in the application of photon-kinetic phenomena of polarization-dependent optical and photovoltaic effects for registration of radiation, allowing to expand the frequency range of photocells and to register not only in intensity, but also in polarization of light.

Implementation of the research results.

Based on the results of the research of nonlinear absorption of light, two photonic ballistic current and dimensional quantization in piezoelectrics:

the calculations carried out in the field of polarization-dependent optical and photoelectric phenomena in bulk semiconductors and size-quantized structures were used in grant OT-F2-07117 “Investigation of the effect of light on the current-voltage characteristic of the deformation p-n junction in the field of an ultrahigh-frequency electromagnetic field” to explain the effect electromagnetic wave on the stream of current carriers in semiconductor films (Reference No. 89-03-2653 of the Ministry of Higher and Secondary Specialized Education of the Republic of Uzbekistan from July 27, 2020). The use of scientific results made it possible to explain the physical properties of current transport in polycrystalline semiconductors depending on the electromagnetic field;

theoretical calculations of nonlinear one- and two-photon absorption of polarized light were used in the grant F2-OT-O-1594 “Improving the efficiency of LEDs, photocells and other optoelectronic devices based on researches of excitons, polarons and bipolarons in hetero and quantum dot nanosystems »When researching allowed and forbidden optical transitions in photovoltaic LEDs (Reference No. 89-03-2653 of the Ministry of Higher and Secondary Specialized Education of the Republic of Uzbekistan from July 27, 2020). The use of scientific results made it possible to theoretically research electron transitions in semiconductors with the participation of polarons and bipolarons.

Approbation of the results of the research. The main results of the dissertation were reported and discussed at 5 International and 4 Republican scientific conferences.

The publication of the results of the research.

On the topic of the dissertation, 18 scientific papers were published, 9 scientific articles of which 7 in international scientific journals recommended by

the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of the main scientific results of doctoral dissertations.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of introduction, four chapters, conclusion and list of used literature. The volume of the dissertation is 113 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. Расулов Р.Я., Расулов В.Р., Эшболтаев И.М., Мамадалиева Н.З., Султонов Р.Р. Однофотонное поглощение поляризованного излучения в *p-Te* (учет эффекта когерентного насыщения) // Известия высших учебных заведений. Физика, 2020. - Т. 63. - № 1. - С. 77-83. (№1, Web of Science, IF = 0.671).
2. Rasulov V.R., Rasulov R.Ya., Eshboltaev I.M., Sulstonov R.R., Muminov I. Matrix elements of two and three-photon absorption of polarized radiation in a cubic symmetry semiconductor // European Sciences review, ESR, 2020. - № 1-2. - С. 93 - 96. (Global impact factor =1.44. 05.00 00, № 3).
3. Rasulov V.R., Rasulov R.Ya., Eshboltaev I.M., Sulstonov R.R., Axmedov B.B. Phenomenology of two and three photon linear and circular dichroism of light absorption in p-GaAs // European Sciences review, ESR, 2020. - № 1-2. - С. 94 - 100. (Global impact factor =1.44. 05.00 00, № 3).
4. Rasulov V.R., Rasulov R.Ya., Karimov I.N., Abduxolikov A., Sulstonov R.R. Two quantum absorption of polarized radiation in n-GaP // European Sciences review. – Vienna, 2018. - № 11 – 12. Vol. 1. – Pp. 111 - 113. (Global impact factor =1.44. 05.00 00, №3)..
5. Rasulov R.Ya., Karimov I.N., Mamatova M., Sulstonov R.R. The linear circular dichroism of one photon absorption of polarization light in p-Te // European Sciences review, ESR. - Vienna, 2019. - № 1 - 2. - С. 163 - 166. (Global impact factor =1.44. 05.00 00, № 3).
6. Расулов Р.Я., Расулов В.Р., Эшболтаев И.М., Султонов Р.Р., Ахмедов Б.Б. Размерное квантование в полупроводниковой квантовой яме. Модель Дрессельхауза // Физика полупроводников и микроэлектроника. – Ташкент, 2019. - Т. 1. - Вып. 3. - С. 16 - 21. (01.00 00, № 16).
7. Расулов Р.Я., Расулов В.Р., Эшболтаев И., Р.Р.Султанов. Линейно-циркулярный дихроизм однофотонного поглощения поляризованного света в теллуре дырочной проводимости // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2020. – Т. 22. – № 1. – С. 16 - 19. (01.00 00, № 5).
8. Rasulov V.R., Rasulov R.Ya., Eshboltaev I.M., Sulstonov R.R. , Polvonov B.Z. On the theory of three photonic linear circular dichroism in a hole-conduction semiconductor // European Sciences review. – Vienna, 2020. - № 5 - 6. – Pp. 73 – 76. (Global impact factor =1.44. 05.00 00, № 3).
9. Rasulov V.R., Rasulov R.Ya., Eshboltaev I.M., Sulstonov R.R., Nosirov M.X. On the theory of four photonic linear circular dichroism in a hole-conduction semiconductor // European Sciences review. - Vienna, 2020. № 5 - 6. – 77 – 80. (Global impact factor =1.44. 05.00 00, №3).

II бўлим (II часть; II part)

10. Расулов Р.Я., Мамадалиев Б., Расулов В.Р., Султонов Р.Р. Линейный фотогальванический эффект в горбообразных полупроводниках с учетом эффекта Раби / Қўёш энергиясини ўзгартиришнинг фотоэлектрик ва иссиқлик-физикавий асослари. Республика илмий-техник конференция. ЎзР. Фарғона. - 2011. 20-21 май. – 78-79 б.
11. Расулов Р.Я., Султонов Р.Р., Омонова Х.Х., Худайбердиев А. Линейно-циркулярный дихроизм поглощения света в теллуре дырочный проводимости // Инновации в науке. Научный журнал. - Новосибирск: Изд. АНС «СибАК», 2019. – № 2 (90). - С. 30 - 33.
12. Расулов Р.Я., Султонов Р.Р., Мустафакулов Р.Р., Эшболтаева Д.А. Феноменология двух и трех-фотонного линейно-циркулярного дихроизма поглощения света р-GaAs // Материалы конференции “Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации”. – Пенза, 2020. –С. 41 - 44.
13. Расулов Р.Я., Расулов В.Р., А. Кодиров, Р.Р. Султонов. К теории многофотонного линейно-циркулярного дихроизма в полупроводниках кубической симметрии // Актуальные вопросы педагогики: сборник статей Международной научно-практической конференции. – Пенза, 2020. – С. 32-36.
14. Расулов Р.Я., Расулов В.Р., Эшболтаев И.М., Султонов Р.Р. Размерное квантование энергетического спектра спин-зависимых электронов в полупроводниковой квантовой яме / Сборник материалов III Международной научно-практической конференции “Приоритеты мировой науки: ученая дискуссия”. – Кемерово, 2019. – С. 39 – 42.
15. Расулов Р.Я., Расулов В.Р., Эшболтаев И.М., Султонов Р.Р. Линейно-циркулярный дихроизм однофотонного поглощения света в Те (учет эффекта когерентного насыщения) // “Физиканинг ҳозирги замон таълимидаги ўрни”. Республика илмий амалий анжумани. - Самарқанд, 13-14 декабрь, 2019. – Б. 301 - 303
16. Расулов Р.Я., Расулов В.Р., Султонов Р.Р., Кодиров Н., Муминов И. Двухфотонный фототок, определяемый диагональными матричными элементами матрицы плотности // Материалы Республиканской конференции (с участием ученых стран СНГ) «Современные проблемы физики полупроводников» СПФП - 20 ноября, 2019 г. – Нукус. – С. 146 - 149.
17. Расулов Р.Я., Расулов В.Р., Султонов Р.Р., Эшболтаев И.М. Спин-зависимое размерное квантование в полупроводниковой гетероструктуре // Материалы Республиканской конференции (с участием ученых стран СНГ) «Современные проблемы физики полупроводников» СПФП - 20 ноября. 2019 г. – Нукус. – С. 140 - 144.

The 5th International scientific and practical conference "Perspectives of world science and education" (January 29-31, 2020). - CPN Publishing Group, Osaka. - Japan, 2020. – P. 674 - 680.

Илмий раҳбар



В.Р.Расулов

Талабгор



Р.Р.Султонов

жонова У. Матричные элементы двух и трех-фотонного поглощения поляризованного излучения в полупроводнике кубической симметрии //

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари Фарғона политехника институти муассислигидаги “Scientific technical journal” журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди.
(23.10.2020й)

Босишга рухсат этилди. 2020 й. Нашриёт босма табағи – 13,75.

Шартли босма табағи – 6,875. Бичими 84x108 1/16.

Адади 100.

Баҳоси келишилган нархда

“Poligraf Super Servis”

150114, Фарғона вилояти, Фарғона шаҳар,

Авиасозлар кўчаси 2-уй.

