

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

ФАРҒОНА ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

МУМИНОВ ИСЛОМБЕК АРАББОЕВИЧ

**МУРАККАБ ЗОНАЛИ КРИСТАЛЛАРДА ЗОНАЛАРАРО КЎП
ФОТОНЛИ ЁРУҒЛИК ЮТИЛИШИНING СПЕКТРАЛ ТАДҚИҚИ**

01.04.07 – Конденсирланган ҳолат физикаси

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

Фарғона – 2021

**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**

Мўминов Исломбек Араббоевич

Мураккаб зонали кристалларда зоналараро кўп фотонли ёруғлик ютилишининг спектрал тадқиқи 3

Муминов Исломбек Араббоевич

Спектральное исследование межзонного монофотонного поглощения света в кристаллах со сложной зоной 24

Muminov Islombek Arabboyevich

Spectral research of interband multiphoton absorption of light in crystals with a complex zone..... 45

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works..... 52

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

ФАРҒОНА ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

МЎМИНОВ ИСЛОМБЕК АРАББОЕВИЧ

**МУРАККАБ ЗОНАЛИ КРИСТАЛЛАРДА ЗОНАЛАРАРО КЎП
ФОТОНЛИ ЁРУҒЛИК ЮТИЛИШИНING СПЕКТРАЛ ТАДҚИҚИ**

01.04.07 – Конденсирланган ҳолат физикаси

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

Фарғона – 2021

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2021.2.PhD/FM609 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Фарғона давлат университетида 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 Рустам Явқачович физика-математика фанлари доктори, профессор
Расмий оппонентлар:	Аюханов Рашид Аҳмедович физика-математика фанлари доктори Султонов Номонжон Акрамович физика-математика фанлари доктори, профессор.
Етакчи ташкилот:	Қорақалпоқ давлат университети

Диссертация ҳимояси Фарғона политехника институти ҳузуридаги фалсафа доктори илмий даражасини берувчи PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2021 йил «___» _____ соат _____ 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: uzferfizika@mail.ru, Фарғона политехника институти мажлислар зали.

Диссертация билан Фарғона политехника институтининг ахборот-ресурс маркази илмий-услубий бўлимида танишиш мумкин. (_____ рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 150107, Фарғона шаҳри, Фарғона кўчаси, 86-уй. Тел.: (99873) 241-13-03.

Диссертация автореферати 2021 йил «___» _____ куни тарқатилди.
(2021 йил «___» _____ даги _____ рақамли реестр 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.

С.Ф.Эргашев

Фалсафа доктори илмий даражасини берувчи
Илмий кенгаш қошидаги Илмий семинар
раисининг ўринбосари, т.ф.д., профессор.

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳон опто- ва фотоэлектроника соҳасида мураккаб зонали кристалларда кўп фотонли жараёнларни тадқиқ этиш етакчи ўринлардан бирини эгалламоқда. Бу соҳада олиб борилган назарий тадқиқот натижаларини юқори эффективли самаравий инфрақизил детекторлар, ёруғликнинг тўлқин узунлиги ёки интенсивлигига нисбатан ночизиқли оптик қурилмалар, ток ташувчилар спинларига боғлиқ каскадли лазерлар ва бошқа тур квант генераторлари бўйича амалиётга жорий этишни тақозо этади. Хусусан, кристалларда кўп фотонли жараёнлардан фойдаланиш кристалли гомо- ва гетероструктураларнинг фотоэлектр параметрларини ортиришга имкон беради: интеграл сезувчанлик 100 А/лм гача, ток кучайтириш коэффиценти 10^2 - 10^3 га ортади, коронгу токи ўнлаб нА дан ошмайди. Шу жиҳатдан, кристалларнинг оптик ва фотоэлектрик хусусиятларининг назарий тадқиқи илмий техника соҳасида муҳим аҳамиятга эга ҳисобланади.

Жаҳондаги етакчи илмий-тадқиқот марказларида асосий эътибор куб ва тетраэдр симметрияли кристалларда ёруғлик ютилишини унинг қутбланиш ҳолатига боғлиқ ҳолда тадқиқот олиб бориш, оптик ва фотоэлектрик қурилмаларнинг эффективлигини ошириш мақсадида қутбланган ёруғликнинг бир ва кўп фотонли ютилиш механизмларини ишлаб чиқишга оид муаммоларни ҳал этишга қаратилган. Хусусан, германий, кремний ва шунга ўхшаш кристалларда кечадиган ёруғликнинг интенсивлигига нисбатан ночизиқли оптик ўтишлар бўйича назарий ҳисоблаш методларини мукамаллаштири ва бундай тур ҳодисаларнинг физикавий табиатини янада чуқурроқ ўрганиш фотоника, опто- ва наноэлектроника соҳасида долзарб ва ечими қутилиётган вазифалардан бўлиб қолмоқда. Бунда мураккаб зонали кристалларнинг оптик ва фотоэлектрик табиатини ўрганишда унинг зонавий тузилишига, кўп фотонли оптик ўтишларда виртуал ҳолатларнинг табиатига ҳамда ёруғликнинг қутбланиш даражасига алоҳида эътибор бериш талаб этилади.

Республикамизда амалий ва фундаментал илмий тадқиқотларнинг долзарб устувор йўналишларига, хусусан Қуёш энергетикасидан фойдаланиш соҳасидаги инновацион ишланмалар яратишга алоҳида эътибор берилмоқда. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясига мувофиқ самаравий илмий-инновацион технологияларни яратиш бўйича муҳим вазифалар белгилаб берилган. Ушбу вазифаларини амалга оширишда, жумладан, Қуёш фото-ва оптоэлектроника соҳаларида ҳажмий ва паст ўлчамли кристалларнинг оптик ва фотоэлектрик параметрларини самаравийлигини орттириш методларини яратиш муҳим аҳамият касб этмоқда. Ушбу диссертация иши куб ва тетраэдр симметрияли кристалларда ночизиқли оптик ҳодисалар механизмларини, хусусан зоналараро кўп фотонли ютилишни, чизиқли циркуляр дихроизм спектрал боғланишининг ёруғлик қутбланиш даражасига боғлиқ бўлган янги

механизмларини тадқиқ этишга бағишланган бўлиб, унинг натижалари каттик жисмли оптик кучайтиргич, фотоқабул қилгичлар ва бошқа оптоэлектрон қурилмаларнинг оптик параметрларини оптималлаштиришга қаратилган.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг фармонлари ва қарорлари, жумладан, 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”ги Фармони¹, 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сонли “Фанлар академияси фаолияти, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги², 2018 йил 17 июлидаги ПҚ-3855-сонли “Илмий ва илмий-техникавий фаолият натижаларини тижоратлаштириш самарадорлигини ошириш бўйича қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида”ги³, 2018 йил 6 августдаги ПҚ-3899-сонли “Илмий ва инновацион фаолиятни интеграциялаш тизимининг самарадорлигини ошириш бўйича чора-тадбирлар тўғрисида”ги⁴, 2021 йил 19 мартдаги ПҚ-5032-сонли “Физика соҳасидаги таълим сифатини ошириш ва илмий тадқиқотларни ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги⁵ қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқотлари муаян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг Ўзбекистон республикаси фан ва технологиялар тараққиётининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур диссертация иши Республика фан ва технологиялар тараққиётининг III. Қайта тикланувчи энергия манбаларидан фойдаланишни ривожлантириш устувор йўналишига доир бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Ҳажмий кристалларда кўп фотонли оптик ва фотоэлектрик ҳодисаларга оид илмий тадқиқотлар жаҳоннинг илғор мамлакатларидаги илмий тадқиқот марказлари ва университетларида олиб борилмоқда. Хусусан, Ч.Таунс, П.Франкен, А.Форрестер, Р.Гудмундсен, П.Джонсон (АҚШ), W.Z.Shen (Хитой), М. Hiruoka, К.Stato (Япония) ва Л.В.Келдиш, Н.Г.Басов, А.М.Прохоров, Е.Л.Ивченко, Р.В.Хохлов, Л.Е.Голуб, С.А.Ахманов, Е.Ю.Перлин (Россия) томонидан конденсирланган муҳитларда ночизикли оптик ҳодисалар бўйича бажарилган назарий ва экспериментал тадқиқотлар натижасида квант генераторлари яратилган ва такомиллаштирилган. Бундай тур оптик ҳодисаларни тажрибада Jun He, Yingli Qu, Heping Li (Япония) *ZnO* ва *ZnS* да, Srinikrishnamurthy, Zhi Gang Yu (Сингапур) *GaAs*, *InP*, *GaInAs* ва *InAsP* да, С.Д.Ганичев (Регензбург, Германия), И.Д.Ярошецкий, Е.Б.Берегулин, В.А.Шалыгин (Санкт-Петербург, Россия) *Ge* да кузатишган.

¹ <https://lex.uz/docs/3107042>.

² <https://lex.uz/docs/3117025>.

³ <https://lex.uz/docs/3823583>.

⁴ <https://lex.uz/docs/3853858>.

⁵ <https://lex.uz/docs/5338558>.

Ҳажмий ва ўлчамли квантлашган кристалларда ёруғликнинг кутбланиш ҳолатига ҳамда ток ташувчилар спинларига боғлиқ бўлган оптик ҳодисалар механизмлари Россия ФАнинг 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 Н.Н.Герасименко, Ю.Н.Пархоменко (Москва, Россия) раҳбарлик қилган бир гуруҳ олимлар томонидан назарий ўрганилган. Ўзбекистон олимларидан Э.З.Имамов ва Р.Я.Расулов ҳамда уларнинг шогирдлари томонидан кристалл ва уларнинг паст ўлчамли тизимларида фотонли кинетик эффектларнинг қатор механизмлари назарий тадқиқ этилган.

Бироқ квант механикавий нуқтаи назаридан: а) Кейн моделига кўра кристалларда кўп фотонли ёруғлик ютилишининг ток ташувчилар гамилтониани зонавий параметрларига, шунингдек, электромагнит тўлқин кутбланиш даражаси ва интенсивлигига боғлиқ бўлган оптик ўтишлари; б) Кейн моделига кўра ток ташувчилар тўлқин векторининг ихтиёрий қийматлар соҳасида кутбланган ёруғликнинг зоналараро кўп фотонли ютилиши ҳамда уларга мос келувчи чизиқли-циркуляр дихроизм; в) мураккаб зонали кристалларда кечадиган ҳамда σ_+ (ўнг кутбланган) ёки σ_- (чап кутбланган) кутбланган фотонлар иштирокидаги зоналараро ўтишлар билан тавсифланувчи оптик ҳодисалар назарий ўрганилмаган. Шу сабабдан юқорида қайд қилинган соҳаларда илмий тадқиқотларни синчковлик билан олиб бориш талаб этилади ва ушбу диссертация бундай тур муаммоларни назарий тадқиқ этишга бағишланган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти ОТ-Ф2 (Физика ва астрономия) тартиб рақамли «Кристаллар ва уларнинг ўлчамли квантлашган ўраларида кутбий оптик самаралар» мавзусидаги (2007-2011 йй.) ҳамда ОТ-Ф2-66 тартиб рақамли «Яримўтказгичлар ва уларнинг наноструктураларида фотонли кинетик самараларнинг назарий тадқиқи» мавзусидаги (2017-2020 йй.) фундаментал тадқиқот грантлари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади мураккаб зонали кристалларда икки ва уч зонали Кейн моделига кўра кутбланган ёруғликнинг зоналараро кўп фотонли ютилиши ҳамда унинг чизиқли-циркуляр дихроизмининг механизмларини тадқиқ қилишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари кўп зонали Кейн модели ёрдамида:

куб симметрияли кристалларда ток ташувчиларнинг оғир ва енгил коваклар тармоғидан ўтказувчанлик зонасига ўтиш билан тавсифланувчи зоналараро кўп фотонли ютилиш механизмини аниқлаш;

ҳажмий кристалларда бошланғич ва виртуал ҳолатлари билан фарқ қилувчи уч фотонли зоналараро оптик ўтишларни табақалаштириш ҳамда уларга тегишли таркибий матрицавий элементларни ҳисоблашнинг физикавий моделини тавсия қилиш;

тавсия этилган моделга асосланган ҳолда ҳар бир оптик ўтишларга тегишли парциал ҳамда натижавий уч фотонли ёруғлик ютилиш коэффициентларининг частотавий боғланишларини аниқлаш;

кристалларда кутбланган ёруғликнинг бошланғич ва оралиқ ҳолатлари билан фарқ қилувчи уч фотонли ютилиш чизикли-циркуляр дихроизмининг спектрал боғланишини ҳисоблаш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида мураккаб зонали куб ва тетраэдр симметрияли, шунингдек, тор зонали кристаллар танланган.

Тадқиқотнинг предмети сифатида кўп зонали Кейн яқинлашишига кўра кристалларда содир бўладиган кутбланган ёруғликнинг зоналараро уч фотонли ютилиши ва унинг чизикли-циркуляр дихроизми танланган.

Тадқиқотнинг усуллари. Назарий ҳисоблашларда квант механикасининг олтин қоидаси ва қўзғалишлар назарияси, кристаллар физикасида қўлланиладиган квантлашган майдон назариясидан, хусусан, Фейнманнинг графиклар техникаси ҳамда Дирак функцияси методларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

илк марта куб симметрияли кристалларда бир вақтнинг ўзида икки фотонли ютилишни эътиборга олган ҳолда зоналараро оптик ўтишлардаги уч фотонли ютилишнинг чизикли-циркуляр дихроизми назарияси ривожлантирилган;

илк марта уч зонали Кейн яқинлашишида ташувчилар тўлқин векторларининг ихтиёрий қийматлар соҳасида парциал уч фотонли ютилиш коэффициентларининг спектрал боғланишлари ҳисобланган ҳамда InSb ва GaAs кристаллар учун миқдорий солиштирилган;

бошланғич ва виртуал ҳолатларнинг қайси зонада жойлашишдан қатъи назар частотанинг ортиши билан InSb ва GaAs кристалларда уч фотонли ютилиш коэффициентининг миқдоран орта бориб максимумга эришиши, сўнгра камайиши аниқланган ва миқдоран солиштирилган;

илк марта кўп зонали Кейн моделига кўра InSb ва GaAs ярим ўтказгичларда зоналараро уч фотонли чизикли-циркуляр дихроизм спектрал боғланишидаги частотанинг маълум бир соҳасида кескин ортиши ва энергиявий спектрда нопараболик ҳадларни эътиборга олиш билан унинг йўқолиши топилган;

зоналараро уч фотонли чизикли-циркуляр дихроизм ва ютилиш коэффициентининг спектрал боғланишига тегишли назарий ҳисоблашлар ZnS ва InSb кристалларида олинган экспериментал натижаларни 10% дан кичик хатолик билан тушунтирган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

куб симметрияли кристалларда зоналараро уч фотонли ютилиш ва чизикли-циркуляр дихроизм коэффициентининг спектрал боғланиши бўйича назарий ва эксперимент натижалари солиштирилган;

кутбланган ёруғликнинг уч фотонли чизикли-циркуляр дихроизми ва ютилишини тадқиқ қилиш натижаларидан фойдаланиш ҳисобига маълумотларни оптик ёзиш, хотирада сақлаш ва қайд қилиш тизимларининг,

паст инерцияли фото- ва оптоэлектроника қурилмаларининг хоссалари оптималлаштирилган;

зоналараро кўп фотонли оптик ўтишларга оид назарий ҳисоблаш усуллари ёрдамида ток ташувчилар энергиявий спектри Кейн моделига кўра ҳисобланган нафақат ҳажмий, балки паст ўлчамли кристаллардаги ночизикли оптик ҳодисаларни назарий тадқиқ этишга татбиқ қилинган;

кўп зонали Кейн яқинлашишда куб симметрияли кристалларда содир бўладиган кўп фотонли ва интенсивликка нисбатан ночизикли фотонли кинетик ҳодисаларнинг ҳисоблаш усуллари ривожлантирилган.

Олинган натижаларнинг ишончилиги назарий натижаларнинг ва тажриба натижаларининг мос тушиши, ҳисоблашларда қаттиқ жисмлар назарияси, квант статистик физика ва квантлашган майдонлар назарияси методларидан ижодий фойдаланилганлиги, микдорий-сонли ҳисоблашлар дастурий таъминотининг қатъилиги, кўп фотонли зоналараро оптик ўтишлар эҳтимоллигини Кейн моделига кўра ҳисоблашда қўзғалишлар назарияси, $\vec{k} \cdot \vec{p}$ -метод ҳамда диаграммалар техникасидан фойдаланилганлиги, тадқиқот объектининг тўғри танланганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти зонавий тузилиши Кейн моделига кўра ҳисобланган кристалларда оптик ўтишларни ток ташувчиларнинг бошланғич ва виртуал ҳолатларига боғлиқ ҳолда табақалаш, зоналараро уч фотонли ютилиш ва чизикли-циркуляр дихроизм коэффициентининг ҳамда оптик ўтишлар эҳтимоллигининг спектрал боғланиши ҳақида янги маълумотлар берилганлигида ўз ифодасини топади.

Ишнинг амалий аҳамияти ёруғликнинг кўп фотонли ва интенсивликка нисбатан ночизикли ютилишидан фойдаланилган кам инерцияли опто-ва фотоэлектрон қурилмаларида электромагнит тўлқин регистрациясининг ишчи спектрал соҳасини орттириш, маълумотларни оптик усулда қайд қилиш, ёзиш ва хотирада сақлаш қурилмаларида қутбланган ёруғликдан фойдаланишда ўз ифодасини топади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Кристалларда қутбланган ёруғликнинг зоналараро уч фотонли ютилиш механизмларини тадқиқ қилиш бўйича олинган натижалар асосида:

уч фотонли ютилиш коэффициентининг кўп зонали Кейн моделига кўра ҳисобланган спектрал боғланишлари Наманган муҳандислик-қурилиш институтининг «Физика» кафедрасида 2012-2016 йилларга мўлжалланган Ф2-21 «Яримўтказгич-диэлектрик чегарасидаги сирт ҳолатлар зичлигини аниқлашни математик моделлаштириш» мавзусидаги фундаментал лойиҳасида жорий этилган (Наманган муҳандислик-қурилиш институтининг 2021 йил 23-июнь 06/10-09/651-сон маълумотномаси). Натижада мураккаб зонали кристаллар асосида тайёрланган оптик қабул қилгичларнинг ишчи частоталар соҳасини 15 фоизга кенгайтириш имконияти яратилган;

мураккаб зонали кристалларда қутбланган ёруғликнинг интенсивлигига нисбатан ночизикли ютилишининг назарий ҳисоблашлари Наманган давлат университети «Физика» кафедрасида 2012-2016 йилларга мўлжалланган Ф2-

OT-O-15494 «Квант нуқтали гетеро- ва нанотузилмалардаги экситонларни, поляронларни, биполяронларни ва кўчиш ходисаларини тадқиқ этиш асосида нурлагичлар, фотоэлементлар ва бошқа турдаги оптоэлектрон асбобларнинг самарадорлигини яхшилаш» мавзусидаги фундаментал лойиҳада жорий этилган (Наманган давлат университетининг 2021 йил 23-июнь 277-04-сон маълумотномаси). Натижада, тор зонали ярим ўтказгичлардан тайёрланган паст инерцияли оптик қурилмаларнинг ишчи спектрал соҳаларни 1,2 марта орттириш имконияти яратилган;

уч фотонли чизикли-циркуляр дихроизм ва ютилиш коэффициентининг спектрал тадқиқот натижалари 2016-2018 йилларга мўлжалланган АҲР (F)-20/518-рақамли «The Mid Infrared LET and Photodiode pair for Gas Sensors» лойиҳасида яримўтказгичли фотодиодларнинг паст инерцияли хоссаларини тадқиқ қилишда жорий этилган (Улудағ университети (Туркия) 2021/20/518-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш яримўтказгичли фотоўзгартиргичларнинг ишлаш тезлигини 10 фоизга орттириш имконияти яратилган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишининг натижалари 6 та халқаро илмий конференцияларда маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 14 та илмий иш чоп этилган, шулардан 1 та монография, Ўзбекистон республикаси Олий Аттестация Комиссиясининг диссертацияларнинг асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий журналларда 6 та мақола, шундан 5 таси хорижий журналларда нашр этилган.

Диссертация тузилиши ва ҳажми. Диссертация иши кириш, тўрт боб, хулоса, 89 та адабиётлар рўйхатидан иборат, 34 та расм, 2 та жадвални ўз ичига олган 119 саҳифани ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Мазкур диссертация мураккаб зонали кристалларда қутбланган ёруғликнинг зоналараро оптик ўтишларга боғлиқ кўп фотонли ютилишини назарий 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 очиқ берилган, тадқиқот натижаларининг назарий ва амалий аҳамияти ҳамда уларнинг жорий қилиниши, нашр этилган ишлар ва диссертациянинг тузилиши бўйича маълумотлар берилган.

Диссертациянинг **“Мураккаб зонали кристалларда ёруғлик зоналараро кўп фотонли ютилишининг содда механизмлари”** деб

номланган биринчи бобда мураккаб зонали кристалларда содир бўладиган кутбланган ёруғликнинг зоналараро икки ва уч фотонли ютилишининг оддий назариясини Кейн модели бўйича тадқиқ қилишга бағишланган адабиётлар шарҳлари бажарилган.

1.1-параграфда қаттиқ жисмларда кутбланган ёруғликнинг ночизикли ютилиши, кутбланган ёруғликнинг кўп фотонли ютилиши механизмларининг назарий таҳлиллари бажарилган. 1.2-параграфда икки ва уч фотонли оптик ўтишлар учун асосий муносабатлар, 1.3-параграфда кўп фотонли оптик ўтишлар эҳтимоллиги учун квант механикаси олтин қоидасини қаноатлантирувчи ҳамда кутбланиш векторига боғлиқ ифодалари келтириб чиқарилган, тегишли механизмлари баён этилган. 1.4-параграфда ёруғликнинг “зона-киришма-зона” тур икки фотонли ютилишининг назарий таҳлиллари бажарилган.

1-бобда шарҳ этилган адабиётларда кутбланган ёруғлик икки ва уч фотонли ютилиши коэффиценти ҳисобланган бўлиб, уларда ёруғлик зоналараро кўп фотонли ютилишининг содда механизмлари таҳлил қилинган; бу механизмлар энергияларининг йиғиндиси тақрибан тақиқланган зона кенглигига тенг бўлган бир неча фотонларнинг Бриллюэн зонаси маркази атрофидаги ток ташувчилар иштирокидаги ютилишига асосланган. Бу ҳолда ток ташувчилар гамилтонианининг тўлқин вектор квадратига пропорционал бўлган ҳадлари иккинчи тартибли кичик ҳадлар бўлиб қолади. Натижада ҳисоблашларда уларни эътиборга олмасам ҳам бўлади. Шунингдек, ток ташувчилар энергетик спектрининг сферавий симметрияли ҳоллари қаралган. Албатта, бундай содда механизмлар икки фотонли ютилиш ёки унинг чизикли-циркуляр дихроизми бўйича ўтказилган тажриба натижаларини тўла-тўқис тушунтира олмайди. Бунинг учун ток ташувчилар тўлқин векторининг ихтиёрий қийматлар соҳасини эътиборга олишни ҳамда энергиявий спектрда нопараболик ҳадларни ҳам эътиборга олиш зарур. Бу ҳолга 2-, 3- ва 4-бобларда алоҳида эътибор қаратилган.

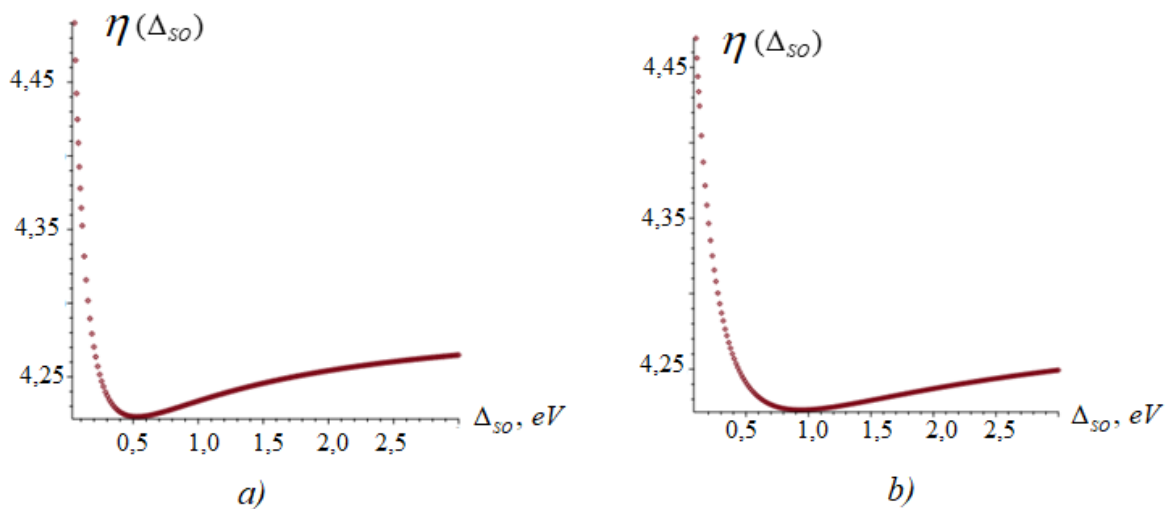
“Кейн моделида мураккаб зонали кристаллда оғир коваклар тармоғидан ўтказувчанлик зонасига уч фотонли оптик ўтишлар” номли иккинчи бобда ёруғликнинг кўп фотонли ютилиши физико-кимёвий хоссалари батафсил ўрганилган мураккаб зонали кристалларга нисбатан олиб борилган. Ушбу бобда мураккаб зонали кристалларда Кейн яқинлашишида уч фотонли кутбланган ёруғлик ютилиши коэффицентининг (2.1-§) ҳамда чизикли-циркуляр дихроизмининг (2.2-§) спектрал боғланишлари ҳисобланган бўлиб, бунда валент зонасининг оғир коваклар тармоғидан ўтказувчанлик зонасига оптик ўтишлар эътиборга олинган. Ҳисоблашларда дастлаб ток ташувчилар энергиявий спектрини сферик яқинлашишда танлаймиз. Сўнгра чизикли-циркуляр дихроизми коэффиценти спектрал боғланишининг миқдорий ҳисоблашларида энергиявий спектрдаги нопараболик ҳадни ҳам эътиборга оламиз, чунки бу ҳол спектрал боғланишдаги ўзига хосликка олиб келади.

Агар $3\hbar\omega \ll E_g \ll E_g + \Delta_{so}$ тенгсизлик қаноатлантирилса, у ҳолда битта зона ичида содир бўладиган оптик ўтишларнинг уч квантли жараёнга қўшадиган

хиссаси эътиборга олмайдиган даражада кичик бўлади ва уч фотонли матрицавий элементни тўлқин векторга боғлиқ эмас деб ҳисоблаш мумкин. Бу ерда E_g – кристаллнинг тақиқланган зонаси, Δ_{so} – спин-орбитал кенгайган зона кенглиги. Ҳисоблашларда ўтказувчанлик зонаси юқорисидаги зонанинг хиссаси эътиборга олинмаса, у ҳолда *InAs* ва *InSb* кристаллари учун чизикли-циркуляр дихроизми коэффициенти $\eta^{(2)}(\Delta_{so})$ нинг Δ_{so} катталиқка боғлиқлиги 1-расмда тасвирланган. 1-расмдан кўриняптики, биринчидан ёруғликнинг икки фотонли ютилиши Бриллюэн зонасига яқин соҳада содир бўладиган чизикли-циркуляр дихроизм тор зонали кристалларнинг спин-орбитал кенгайган зоналари кенгликлари (Δ_{so}) га боғлиқ ҳолда ўзгаради ва у *InSb* (*InAs*) кристалли учун 0.5 eV (0.9 eV) қийматда минимумга эришади.

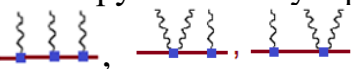
Иккинчидан, Δ_{so} катталиқнинг ортиши билан минимум ҳам катта энергиялар соҳасига интилади. Агар Δ_{so} миқдоран 0.5 eV (0.9 eV) қийматдан кичик танланса, у ҳолда чизикли-циркуляр дихроизм коэффицентининг камаювчи соҳасига нисбатан, аксинча-орта борувчи соҳасига нисбатан таҳлиллар олиб борилишига эътибор қаратиш зарур. Учинчидан кристаллда Δ_{so} қанчалик кичик қийматли бўлса, у ҳолда у кристаллда чизикли-циркуляр дихроизм шунчалик сезиларли кузатилади.




Шундай қилиб, битта мураккаб зонали кристалл учун тақиқланган зона кенглигининг аниқ бир қийматида спин-орбитал кенгайган зона кенглигининг



1-расм. *InAs* (a), *InAs* (b) ва *GaAs* (c) кристаллари Бриллюэн зонаси марказига яқин соҳада ёруғлик икки фотонли ютилиш чизикли-циркуляр дихроизмининг спин-орбитал кенгайган зона кенглигига боғлиқлиги.

миқдоран танланишига боғлиқ ҳолда назарий таҳлил ҳам ўзгаради. Аммо кенг зонали кристалл учун $\eta^{(2)}(\Delta_{so})$ боғланишда минимум кузатилмайди: Δ_{so} нинг ортиб бориши билан камая боради.

Ёруғликнинг уч фотонли ютилишига тегишли зоналараро оптик ўтишлар , диаграммалар ёрдамида тушунтирилиши мумкин, бу

ерда  - бир фотонли,  - кетма-кет ютилайтган икки фотонли,  -бир вақтда икки фотонли ютилишни тасвирлайди. У ҳолда валент зона тармоқларидан ($|V_l, m_l\rangle$) ўтказувчанлик зонасига ($|c, m'_l\rangle$) уч фотонли оптик ўтишлар, умуман олганда, олти хил табиатли бўлиб

$$\begin{aligned} &|V_{hh}, \pm 3/2\rangle \xrightarrow[\text{ютилиши}]{\text{уч фотонли}} |c, \pm 1/2\rangle, |V_{hh}, \pm 3/2\rangle \xrightarrow[\text{ютилиши}]{\text{уч фотонли}} |c, \mp 1/2\rangle, \\ &|V_{lh}, \pm 3/2\rangle \xrightarrow[\text{ютилиши}]{\text{уч фотонли}} |c, \pm 1/2\rangle, |V_{lh}, \pm 3/2\rangle \xrightarrow[\text{ютилиши}]{\text{уч фотонли}} |c, \mp 1/2\rangle, \\ &|SO, \pm 1/2\rangle \xrightarrow[\text{ютилиши}]{\text{уч фотонли}} |c, \pm 1/2\rangle, |SO, \pm 1/2\rangle \xrightarrow[\text{ютилиши}]{\text{уч фотонли}} |c, \mp 1/2\rangle, \end{aligned} \quad (1)$$

яъни уларнинг ҳар бири бир-биридан оптик ўтишларда иштирок этаётган ток ташувчиларнинг бошланғич, виртуал ва охириги ҳолатлари билан фарқ қилувчи ташкил этувчилар суммасидан иборат бўлади (2-расм): а) электронларнинг бошланғич ҳолатлари валент зонасининг оғир коваклар тармоғида бўлса, у ҳолда

$$\begin{aligned} &\sum_{m_l, m'_l = \pm 1/2, \pm 3/2} \{ |V_{hh}, \pm 3/2\rangle \Rightarrow |V_l, m_l\rangle \rightarrow |c, \pm 1/2\rangle + |V_{hh}, \pm 3/2\rangle \rightarrow |V_l, m_l\rangle \rightarrow |V_l, m'_l\rangle \rightarrow |c, \pm 1/2\rangle + \\ &+ |V_{hh}, \pm 3/2\rangle \rightarrow |c, m_l\rangle \rightarrow |c, m'_l\rangle \rightarrow |c, \pm 1/2\rangle + |V_{hh}, \pm 3/2\rangle \rightarrow |SO, m_l\rangle \rightarrow |SO, m'_l\rangle \rightarrow |c, \pm 1/2\rangle + \\ &+ |V_{hh}, \pm 3/2\rangle \rightarrow |V_l, m_l\rangle \rightarrow |c, m'_l\rangle \rightarrow |c, \pm 1/2\rangle + |V_{hh}, \pm 3/2\rangle \rightarrow |c, m_l\rangle \rightarrow |V_l, m'_l\rangle \rightarrow |c, \pm 1/2\rangle + \\ &+ |V_{hh}, \pm 3/2\rangle \rightarrow |V_l, m_l\rangle \rightarrow |SO, m'_l\rangle \rightarrow |c, \pm 1/2\rangle + |V_{hh}, \pm 3/2\rangle \rightarrow |SO, m_l\rangle \rightarrow |V_l, m'_l\rangle \rightarrow |c, \pm 1/2\rangle + \\ &+ |V_{hh}, \pm 3/2\rangle \rightarrow |c, m_l\rangle \rightarrow |SO, m'_l\rangle \rightarrow |c, \pm 1/2\rangle + |V_{hh}, \pm 3/2\rangle \rightarrow |SO, m_l\rangle \rightarrow |c, m'_l\rangle \rightarrow |c, \pm 1/2\rangle \}, \end{aligned} \quad (2)$$

бу ерда, \rightarrow -бир фотонли оптик ўтишни кўрсатади. Юқорида қайд қилинган ҳар бир сумманинг ҳар бири қолганларидан виртуал ҳолатининг тартиби билан фарқ қилади. Умуман олганда ток ташувчилар виртуал ҳолатлари валент зонасининг енгил ва оғир коваклар коваклар ($|V_l, m_l\rangle$), спин-орбитал кенгайган ($|SO, m'_l\rangle$) тармоқларида ҳамда ўтказувчанлик зонасида ($|c, m'_l\rangle$) бўлиши мумкин (2-расм), оғир коваклар учун $m_l, m'_l = \pm 3/2$ -енгил коваклар, спин-орбитал кенгайган тармоқлари ҳамда ўтказувчанлик зонаси учун $m_l, m'_l = \pm 1/2$, m_l ёки m'_l тўла момент операторининг хусусий қиймати. $|A, m_a\rangle \Rightarrow |B, m_b\rangle$ белгилаш бир вақтда икки фотонли $|A, m_a\rangle$ ҳолатдан $|B, m_b\rangle$ ҳолатга бир вақтда икки фотон ютилиши билан, $|A, m_a\rangle \rightarrow |B, m_b\rangle$ белгилаш юқорида қайд қилинган оптик ўтишнинг бир фотон иштирокида содир бўлишини англатади. Қолган оптик ўтишлар шу тариқа аниқланади.

Бриллюэн зонасининг марказига яқин соҳаларда зоналарнинг дисперсия қонуниятида параболик муносабат кузатилади. Хусусан, $8P^2k^2 \ll 3E_g^2$ шартда электрон ва ковакларнинг энергиявий спектрлари қуйидаги кўришга келади

$$E_{el}(k)|_{k \rightarrow 0} = E_c + \frac{2P^2}{3E_g}k^2 \equiv E_c + \frac{\hbar^2k^2}{2m}, \quad E_{lh}(k)|_{k \rightarrow 0} = E_c - E_g - \frac{2P^2}{3E_g}k^2 \equiv E_v - \frac{\hbar^2k^2}{2m}, \quad (3)$$

бу ерда $m = \frac{3\hbar^2E_g}{4P^2}$ - электроннинг эффектив массаси.

Таъкидлаш жоизки, енгил коваклар тармоғидан ўтказувчанлик зонасига оптик ўтишлар 16 та бўлиб, улар бир-биридан оралик ҳолатлари билан фарқ қилади. Шунинг учун оптик ўтишларни имкон даражасида алоҳида-алоҳида таҳлил қиламиз. Масалан, қуйидаги $|V, -3/2\rangle \Rightarrow |V, -3/2\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$, $|V, -3/2\rangle \Rightarrow |V, +1/2\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$, $|V, -3/2\rangle \Rightarrow |V, -1/2\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$

диаграммаларнинг суммаси билан аниқланган оптик ўтишнинг таркибий

матрицавий элементи
$$-\frac{iP_c B e'_+}{2\sqrt{2}} \left[\frac{2\left(\frac{A}{B}-1\right)}{-\hbar\omega} + \frac{|e'_-|^2 + 4e'_z{}^2}{E_{lh} - E_{hh} - 2\hbar\omega} \right]$$
 муносабат ёрдамида

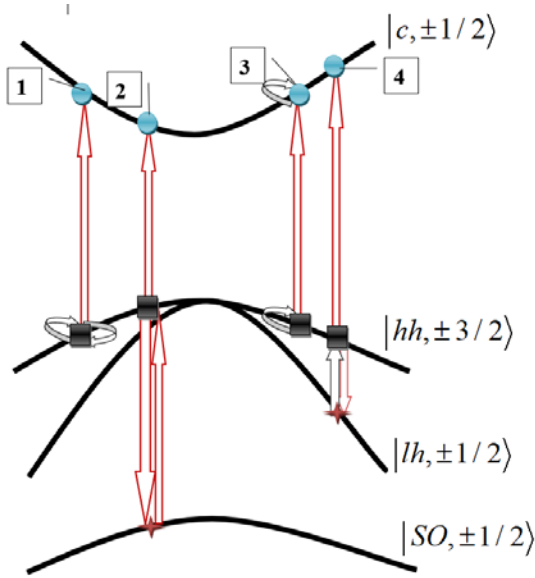
ифодаланади (*a* ҳол), $|V, -3/2\rangle \rightarrow |V, -3/2\rangle \rightarrow |V, -3/2\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$,
 $|V, -3/2\rangle \rightarrow |V, -3/2\rangle \rightarrow |V, -1/2\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$, $|V, -3/2\rangle \rightarrow |V, -1/2\rangle \rightarrow |V, -3/2\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$,
 $|V, -3/2\rangle \rightarrow |V, -1/2\rangle \rightarrow |V, -1/2\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$ диаграммаларнинг суммаси билан аниқланган оптик ўтишнинг (*b* ҳол) таркибий матрицавий элементи

$$\frac{i}{\sqrt{2}} P_c B^2 k^2 e'_+ \left\{ \frac{1}{(-2\hbar\omega)} \left[\frac{4\left(\frac{A}{B}-1\right)^2 e'_z{}^2}{(-\hbar\omega)} + \frac{3|e'_-|^2}{(E_{lh} - E_{hh} - \hbar\omega)} \right] + \frac{2e'_z{}^2}{(E_{lh} - E_{hh} - 2\hbar\omega)} \left[\frac{2\left(\frac{A}{B}-1\right)}{(-\hbar\omega)} + \frac{2\left(\frac{A}{B}+1\right)}{(E_{lh} - E_{hh} - \hbar\omega)} \right] \right\}.$$

Натижада ҳар бир матрицавий элемент модулининг квадрати чизикли кутбланган ва циркуляр кутбланган ёруғликлар учун алоҳида-алоҳида ҳисобланиб, сўнгра ток ташувчилар тўлқин векторининг бурчаклари бўйича ўрталаштириш олиб борилгач, қаралаётган оптик ўтишларга тегишли чизикли-циркуляр дихроизм коэффициенти $\eta(\omega)$ ҳисобланади. Бундай оптик ўтишларга мос келувчи чизикли-циркуляр дихроизм коэффицентининг спектрал боғланиши ($\eta(\omega)$) 3-расмда тасвирланган. Расмдан кўриняптики, $\eta(\omega)$ катталиқ спектрал боғланишининг табиати оптик ўтишларнинг турига боғлиқдир. Хусусан, биринчи тур оптик ўтишлар учун частотанинг ортиши билан $\eta(\omega)$ орта боради (3 *a*-расм), иккинчи оптик ўтишлар учун эса камайиб, минимумга эришиб, сўнгра орта боради (3 *b* -расм). Шунини таъкидлаш ўринлики, бир-биридан виртуал ҳолатлари билан фарқ қилувчи 16 хил оптик ўтишларга тегишли $\eta(\omega)$ боғланиш табитан ҳар хил бўлади: миқдоран доимий, бироқ бирга тенг, бирдан катта ёки бирдан кичик бўлиши мумкин. Назарий таҳлиллар шунини кўрсатадики, ҳар бир оптик ўтиш учун ҳисобланган $\eta(\omega)$ боғланишнинг физикавий табиати кристалларнинг тақиқланган ва спин-орбитал кенгайган зоналар кенгликларининг нисбатига боғлиқ эмас.

Юқорида қайд қилинган оптик ўтишларга нисбатан ёруғлик уч фотонли ютилиши коэффицентининг спектрал боғланишларини аниқлаш учун

$$K_{summ}^{(N)}(\omega, T) = \sum_{c, m'_c; \nu, m'_\nu} K_{c, m'_c; \nu, m'_\nu}^{(N)}(\omega, T) = \frac{N\hbar\omega}{I} \sum_{c, m'_c; \zeta, m'_\zeta; \nu, m'_\nu} W_{c, m'_c; \zeta, m'_\zeta; \nu, m'_\nu}^{(N)} \quad (4)$$



2-расм. Валент зонасининг оғир коваклар тармоғидан ўтказувчанлик зонасига уч фотонли оптик ўтишлар схемаси: тўртбурчак-бошланғич ҳолат, доира-охирги ҳолат, юлдузча-оралиқ ҳолатларни, тўғри кўрсаткичли чизиқлар-зоналараро ёки тармоқлараро, эгри кўрсаткичли чизиқлар битта зона ёки битта тармоқ ичида содир бўладиган оптик ўтишларни билдиради.

$|c, m'_c\rangle$ ($m'_c = \pm 1/2$) жойлашиши мумкин, $M_{c, m'_c; \zeta, m'_\zeta; V, m'_V}^{(N)}(\mathbf{k})$ -қаралаётган оптик ўтишнинг таркибий матрицавий элементи, $f_c(\mathbf{k})[f_{V_i}(\mathbf{k})]$ - ток ташувчиларнинг тақсимот функцияси, $E_c(\mathbf{k})[E_{V_i}(\mathbf{k})]$ -электрон (ковак) ларнинг энергетик спектри, m'_V - тўла ҳаракат миқдори моменти операторининг хусусий қиймати, $\nu = c, V_i, SO$, электрон-фотон ўзаро таъсир операторининг

матрицавий элементи $H_{\nu} = \frac{e}{im_0\omega} \left(\frac{2\pi I}{n_\omega c} \right)^{1/2} (\vec{e} \cdot \vec{p})_{\nu}$ каби аниқланади, \vec{p} - импульс

оператори, \vec{A} -электромагнит тўлқиннинг вектор потенциали, I - ёруғликнинг интенсивлиги, n_ω - кристаллнинг ω частотага мос келувчи синдириш кўрсаткичи.

Ёруғликнинг кўп фотонли ютилиш коэффициентини ҳисоблаш имконини берувчи кўп фотонли оптик ўтишлар эҳтимоллиги қуйидагича ифодаланади:

$$W_{c, m'_c; V, m'_V}^{(N)} = \frac{1}{\pi \hbar} \left(\frac{e}{m_0 \omega} \right)^{2N} \left(\frac{2\pi I}{nc} \right)^N \left(k_{c, m'_V}^{(N\omega)} \right)^3 (N\hbar\omega - E_g)^{-1} \left| \mathfrak{R}_{c, m'_c; V, m'_V}^{(N)} \left(k_{c, m'_V}^{(N\omega)} \right) \right|^2 \times$$

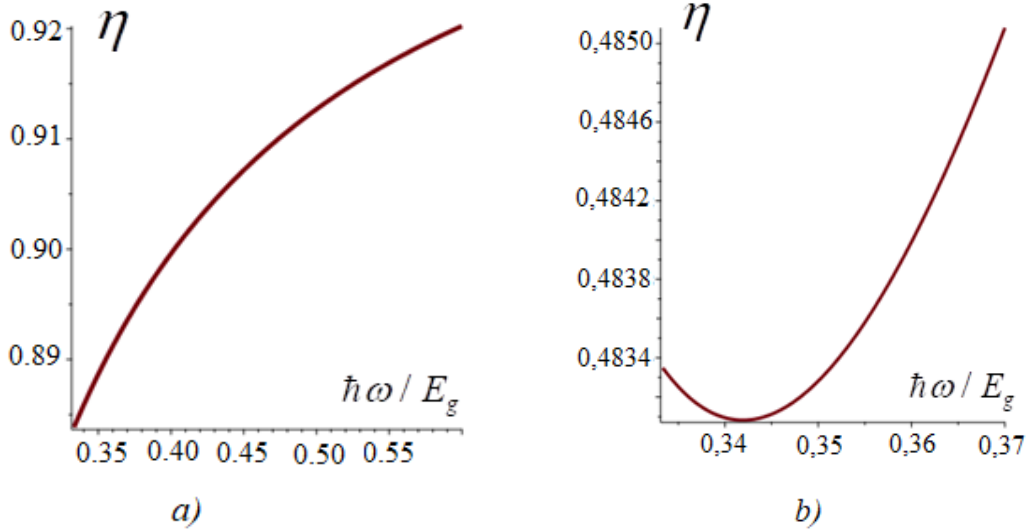
муносабатдан фойдаланамиз, бу ерда $K_{c, m'_c; V, m'_V}^{(N)}(\omega, T)$ - ёруғликнинг зоналараро N фотонли парциал ютилиш коэффициенти, $W_{c, m'_c; \zeta, m'_\zeta; V, m'_V}^{(N)}$ - оптик ўтишлар эҳтимоллиги бўлиб, уни ҳисоблашда оралиқ ҳолатлар ($|\zeta, m'_\zeta\rangle$) бўйича сумма олиш зарур. Бу ҳолда $W_{c, m'_c; \zeta, m'_\zeta; V, m'_V}^{(N)}$ -валент зонаси тармоқларидан ўтказувчанлик зонасига N фотонли оптик ўтишлар эҳтимоллиги қуйидагича ифодаланади:

$$W_{c, m'_c; \zeta, m'_\zeta; V, m'_V}^{(N)} = \frac{2\pi}{\hbar} \sum_{\zeta, m'_\zeta} \left| M_{c, m'_c; \zeta, m'_\zeta; V, m'_V}^{(N)}(\mathbf{k}) \right|^2 \times \left[f_c(\mathbf{k}) - f_{V_i}(\mathbf{k}) \right] \delta(E_c(\mathbf{k}) - E_{V_i}(\mathbf{k}) - N\hbar\omega), \quad (5)$$

бу ерда $|\zeta, m'_\zeta\rangle$ виртуал ҳолат валент зонаси тармоқларида, яъни оғир коваклар тармоғи $|V_{hh}, m'_{hh}\rangle$ ($m'_{hh} = \pm 3/2$) ёки энгил коваклар тармоғи $|V_{lh}, m'_{lh}\rangle$ ($m'_{lh} = \pm 1/2$), шунингдек, спин-орбитал кенгайган тармоғи $|SO, m'_{SO}\rangle$ ($m'_{SO} = \pm 1/2$) ҳамда ўтказувчанлик зонасида

$$\times \left[f \left(E_c \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right) - f \left(E_{V_l} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right) \right], \quad (6)$$

бу ерда N фотонли оптик ўтишга тегишли энергиянинг сақланиш қонунидан



3-расм. Куб симметрияли кристаллар учун матнда қайд қилинган икки хил зоналараро уч фотонли оптик ўтишларга тегишли чизикли-циркуляр дихроизм коэффициентининг спектрал боғланиши.

аниқланган $k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} = \left[\frac{2m_c m_{V_l}}{m_c + m_{V_l}} \right] (N\hbar\omega - E_g)$ тўлқин вектор, $m_c (m_{V_l})$ – ток ташувчилар

$c(V_l)$ зонадаги эффектив массалари, $\left| \mathfrak{R}_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(N)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right|^2$ – қуйидаги интеграл

билан аниқланади $\int_{-1}^1 d \cos(\theta) \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\infty k dk^2 \sum_{\zeta,m'_\zeta} \left| M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(N)} (k, \theta, \varphi) \right|^2$, $f_c \left(k_{c,m_{hh}}^{(N\omega)} \right) \left[f_{hh} \left(k_{c,m_{hh}}^{(N\omega)} \right) \right]$ –

N фотонли оптик ўтишда иштирок этаётган ток ташувчиларнинг тақсимот функцияси, ток ташувчилар энергияси: $E_c \left(k_{c,m_{hh}}^{(N\omega)} \right) \left[E_{hh} \left(k_{c,m_{hh}}^{(N\omega)} \right) \right]$. Энди конкрет

мисолларга эътибор қаратамиз. Айтайлик, натижавий таркибий матрицавий элемент $M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(N)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right)$ иккита ташкил этувчидан иборат, яъни

$M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(N)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) = M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(A)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) + M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(B)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right)$ бўлсин, бу ерда

$M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(A)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right)$ – "А" тур оптик ўтишлар матрицавий элементи,

$M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(B)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right)$ – "В" тур оптик ўтишлар матрицавий элементи. Оптик

ўтишлар эҳтимоллиги таркибий матрицавий элемент модулининг квадрати билан аниқланганлиги учун қуйидаги шакл алмаштиришдан фойдаланамиз:

$$\begin{aligned} \left| M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(N)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right|^2 &= \left| M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(A)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) + M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(B)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right|^2 = \\ &= \left| M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(A)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right|^2 + \left| M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(B)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right|^2 + \end{aligned} \quad (7)$$

$$+ \left[M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(A)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right]^* M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(B)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) + M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(A)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \left[M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(B)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right]^* .$$

Шундай илиб, ёруғликнинг натижавий кўп фотонли ютилиш коэффициентлари парциал кўп фотонли ютилиш коэффициентларининг йиғиндисидан иборат. Масалан, "A" ва "B" тур оптик ўтишларгагина тегишли парциал ютилиш коэффициентлари мос ҳолда $\left| M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(A)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right|^2$ ва $\left| M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(B)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right|^2$ катталиклар ёрдамида аниқланади. Ёруғликнинг натижавий ютилиш коэффициентларида $\left[M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(A)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right]^* M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(B)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right)$ кўпайтма билан аниқланувчи улуш ҳам мавжуд бўлади. Натижада ёруғликнинг кўп фотонли ютилиш коэффициентини куйидаги ифодалар билан аниқланувчи ютилиш коэффициентларининг йиғиндиси кўринишида қайд қилиш мумкин:

$$K_{c,m'_c;V,m'_V}^{(A,B,C)}(\omega, T) = \frac{N\hbar\omega}{I} W_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(A,B,C)} \quad (8)$$

бу ерда

$$W_{c,m'_c;V,m'_V}^{(A,B)} = \frac{1}{\pi\hbar} \left(\frac{e}{m_0\omega} \right)^{2N} \left(\frac{2\pi I}{nc} \right)^N \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right)^3 (N\hbar\omega - E_g)^{-1} \left| M_{c,m'_c;V,m'_V}^{(A,B)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right|^2 \times$$

$$\left[f \left(E_c \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right) - f \left(E_{V_l} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right) \right],$$

$$W_{c,m'_c;V,m'_V}^{(C)} = \frac{1}{\pi\hbar} \left(\frac{e}{m_0\omega} \right)^{2N} \left(\frac{2\pi I}{nc} \right)^N \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right)^3 (N\hbar\omega - E_g)^{-1} \left[f \left(E_c \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right) - f \left(E_{V_l} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right) \right] \times$$

$$\times \left[\left[M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(A)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right]^* M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(B)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) + M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(A)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \left[M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(B)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right]^* \right]^2 .$$

Бу улушларнинг ҳисоблашлари бажарилса, у ҳолда ҳар бир тур оптик ўтишларнинг натижавий ютилишга улушларини солиштириш имконияти яратилади. Шу сабабли ёруғликнинг натижавий уч фотонли ютилиш коэффициентини ҳисоблашда ҳар бир оптик ўтишга мос келувчи ютилиш коэффициент спектрал боғланишларини алоҳида-алоҳида ҳисоблаймиз. Масалан, куб симметрияли кристаллар учун $|V, -3/2\rangle \Rightarrow |V, -3/2\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$, $|V, -3/2\rangle \Rightarrow |V, +1/2\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$, $|V, -3/2\rangle \Rightarrow |V, -1/2\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$ оптик ўтишлар суммаси билан аниқланувчи ёруғликнинг уч фотонли ютилиши коэффициентини куйидаги кўринишда ифодаланади

$$K_{c,hh,1}^{(N=3)} = \frac{3}{4} K_g^{(3)}(0) \frac{m_c m_{hh}}{(m_c + m_{hh}) m_0} I^2 \frac{E_g^2}{B^2 k_g^4} \left[f_c \left(k_{c,m_{hh}}^{(3\omega)} \right) - f_{hh} \left(k_{c,m_{hh}}^{(3\omega)} \right) \right] x_\omega^{-5} r_{c,m_{hh}}^{(3\omega)} \times$$

$$\times \left[\left(\frac{2 \left(\frac{A}{B} - 1 \right)}{x_\omega} \right)^2 a_{c,hh,1}^{(N=3)} + 2 \frac{2 \left(\frac{A}{B} - 1 \right)}{-x_\omega} \frac{b_{c,hh,1}^{(N=3)}}{x_{lh} - x_{hh} - 2x_\omega} + \frac{c_{c,hh,1}^{(N=3)}}{(x_{lh} - x_{hh} - 2x_\omega)^2} \right], \quad (9)$$

куйидаги тур оптик ўтишлар учун эса $|V, -3/2\rangle \rightarrow |V, -3/2\rangle \rightarrow |V, -3/2\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$,
 $|V, -3/2\rangle \rightarrow |V, -3/2\rangle \rightarrow |V, -1/2\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$, $|V, -3/2\rangle \rightarrow |V, -1/2\rangle \rightarrow |V, -3/2\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$,
 $|V, -3/2\rangle \rightarrow \rightarrow |V, -1/2\rangle \rightarrow |V, -1/2\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$ куйидаги натижани оламиз

$$K_{c,hh,2}^{(N=3)} = 6K_g^{(3)}(0) \frac{m_c m_{hh} I^2 E_g^4}{(m_c + m_{hh}) m_0} \left[f_c(k_{c,m_{hh}}^{(3\omega)}) - f_{hh}(k_{c,m_{hh}}^{(3\omega)}) \right] \left(\frac{r_{c,m_{hh}}^{(3\omega)}}{x_\omega} \right)^5 \times \\ \times (a_{c,hh,2}^{(N=3)} \mathfrak{R}_1^2 + b_{c,hh,2}^{(N=3)} \mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_2 + c_{c,hh,2}^{(N=3)} \mathfrak{R}_2^2), \quad (10)$$

бу ерда k_ω - ток ташувчиларнинг $E_{lh}(k) - E_{hh}(k) - 3\hbar\omega = 0$ муносабатдан, яъни энергиянинг сақланиш қонунидан аниқланувчи тўлқин вектори,

$$r_{c,m_{hh}}^{(3\omega)} = \frac{2m_c m_{V_l}}{m_c + m_{V_l}} \frac{3\hbar\omega - E_g}{m_0 E_g}, \quad x_\omega = \hbar\omega / E_g, \quad K_g^{(3)}(0) = \pi m_0 \left(\frac{2\pi e^2}{n_\omega c \hbar} \right)^3 k_g^5 E_g^{-9} P_c^2 B^4, \quad x_l = E_l(k_\omega) / E_g,$$

$$l = lh, hh, SO, \quad \mathfrak{R}_1 = \frac{2(\frac{A}{B} - 1)^2}{(\hbar\omega)^2} - \frac{2(\frac{A}{B} - 1)}{(E_{lh} - E_{hh} - 2\hbar\omega)(\hbar\omega)} + \frac{(\frac{A}{B} + 1)}{(E_{lh} - E_{hh} - 2\hbar\omega)(E_{lh} - E_{hh} - \hbar\omega)},$$

$$\mathfrak{R}_2 = -\frac{3}{2\hbar\omega(E_{lh} - E_{hh} - \hbar\omega)}, \quad \text{чизикли кутбланган ёруғлик учун } a_{c,hh,1}^{(N=3)} = \frac{90}{135},$$

$$b_{c,hh,1}^{(N=3)} = \frac{180}{135}, \quad c_{c,hh,1}^{(N=3)} = \frac{488}{135}, \quad a_{c,hh,2}^{(N=3)} = \frac{1}{15}, \quad b_{c,hh,2}^{(N=3)} = c_{c,hh,2}^{(N=3)} = \frac{4}{27}, \quad \text{циркуляр кутбланган}$$

$$\text{ёруғлик учун } a_{c,hh,1}^{(N=3)} = \frac{70}{105}, \quad b_{c,hh,1}^{(N=3)} = \frac{133}{105}, \quad c_{c,hh,1}^{(N=3)} = \frac{396}{105}, \quad a_{c,hh,2}^{(N=3)} = \frac{8}{105}, \quad b_{c,hh,2}^{(N=3)} = \frac{13}{105},$$

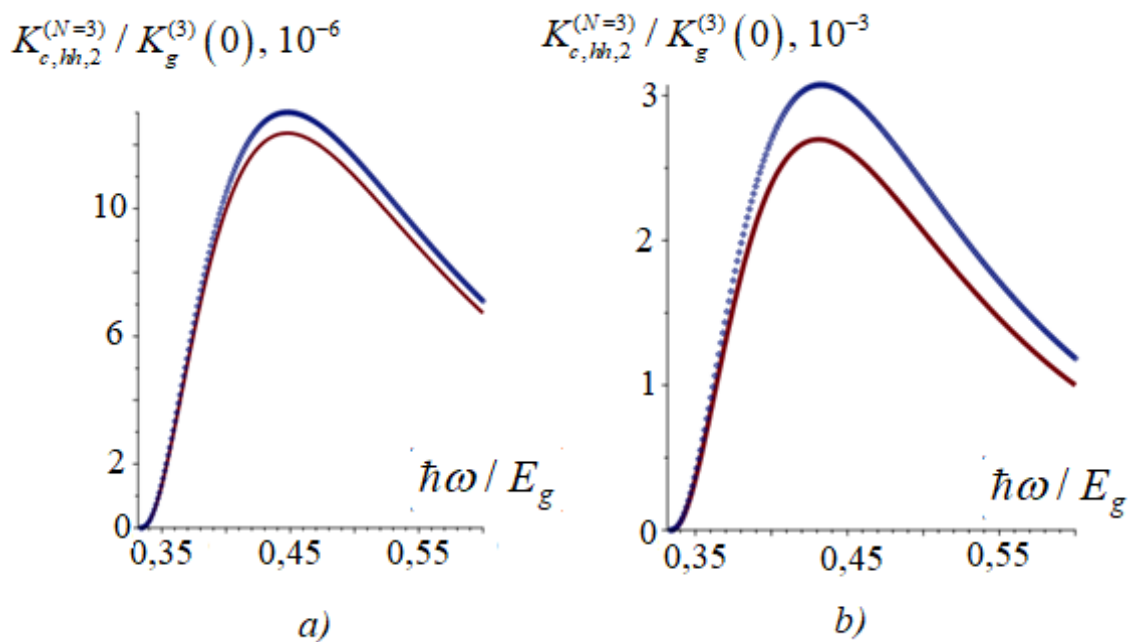
$$c_{c,hh,2}^{(N=3)} = \frac{18}{105}.$$

Юқорида қайд қилинган оптик ўтишлар ҳисобига содир бўладиган ёруғликнинг уч фотонли ютилиш коэффициенти ($K_{c,hh,2}^{(N=3)} / K_g^{(3)}(0)$) нинг спектрал боғланиши 4-расмда келтирилган. Ундан кўриняптики, $K_{c,hh,2}^{(N=3)} / K_g^{(3)}(0)$ нинг спектрал боғланишида частотанинг ортиши билан дастлаб орта борувчи, максимумга эришиб, сўнгра камаювчи соҳалар мавжуддир.

Спектрал боғланишнинг бундай табиатли бўлиши $K_{c,hh,2}^{(N=3)} / K_g^{(3)}(0)$ катталикнинг частотага икки хил табиатли боғланган иккита катталиклар кўпайтмаси эканлиги билан тушунтирилади. Буларнинг бири частоталар ортиши билан орта борувчи ҳолатлар зичлиги бўлса, иккинчиси частоталар ортиши билан камайиб борувчи матрицавий элемент квадратининг модулидир (чунки частотага тўғри пропорционал боғланган энергетик катталиклар касрнинг махражидадир). Таъкидлаш жоизки, юқорида қайд қилинган оптик ўтишлар учун биринчидан спектрал боғланишнинг максимуми ёруғликнинг кутбланиш ҳолати(даражаси)га деярли боғлиқ эмас; иккинчидан кристалл тақиқланган зона кенглигининг ортиши билан максимум катта частоталар соҳасига силжийди ва ёруғликнинг ютилиш коэффициенти микдоран орта боради. Масалан, $GaAs$ кристаллининг тақиқланган зона кенлиги $InSb$ кристалликидан тақрибан 5 марта катта, ёруғликнинг ютилиш коэффициенти

эса (қаралаётган частоталар соҳасига боғлиқ равишда) микдоран 40-50 марта кичикдир. Бундай таҳлилларни қолган оптик ўтишларга нисбатан ҳам шу тариха олиб борилади.

Шундай қилиб, ёруғлик уч фотонли ютилиши коэффицентининг спектрал боғланиши табиатан қаралаётган оптик ўтишларнинг турига боғлиқдир. Таъкидлаш ўринлики, $|V, -3/2\rangle \xrightarrow[\text{оптик ўтиши}]{\text{уч фотонли}} |c, +1/2\rangle$ ва $|V, +3/2\rangle \xrightarrow[\text{оптик ўтиши}]{\text{уч фотонли}} |c, -1/2\rangle$ оптик ўтишга нисбатан матрицавий элементлар



4-расм. Икки кристалл учун ёруғликнинг уч фотонли ютилиш коэффиценти $K_{c, hh, 2}^{(N=3)} / K_g^{(3)}(0)$ нинг спектрал боғланиши: a - InSb учун, b - GaAs учун.

бир-биридан мавҳум сон ёки ишораси билан фарқ қилиши мумкин, бироқ оптик ўтишлар аҳтимоллиги (ёки ёруғлик ютилиш коэффиценти) матрицавий элементлари модулининг квадрати билан аниқланганлиги туфайли ҳар икки оптик ўтишлар оптик катталикларга бир хил улуш беради.

“Кейн моделида мураккаб зонали кристаллда энгил коваклар тармоғидан ўтказувчанлик зонасига уч фотонли оптик ўтишлар” номли учинчи бобда мураккаб зонали кристалларда Кейн яқинлашишида уч фотонли кутбланган ёруғлик ютилиши коэффицентининг ҳамда чизиқли-циркуляр дихроизмининг спектрал боғланишлари ҳисобланган бўлиб, бунда валент зонасининг энгил коваклар тармоғидан ўтказувчанлик зонасига оптик ўтишлар эътиборга олинган. 3.1-§да уч зонали Кейн яқинлашишида кристалларда энгил коваклар иштирокида уч фотонли оптик ўтишларнинг матрицавий элементлари ҳамда уч фотонли чизиқли-циркуляр дихроизм спектрал боғланишларининг назарий таҳлиллари бажарилган. 3.2-§да эса Кейн яқинлашишида мураккаб зонали кристалларда зоналараро уч фотонли ютилиш коэффицентининг спектрал боғланишлари ҳисобланган.

Кристаллнинг ўтказувчанлик зонасидан валент зонасига оптик ўтишларда иштирок этаётган электронларнинг охири ҳолатидаги тўлқин вектори

$$k_{c,L}^{(3\omega)} = \sqrt{\frac{2\mu_+^{(c,L)}}{\hbar^2} (3\hbar\omega - E_g)}$$

ифода ёрдамида аниқланади, бу ерда m_c - электронларнинг ўтказувчанлик зонасидаги эффектив массаси, m_L - валент зонасининг L тартиб рақамли тармоғидаги ковакларнинг эффектив массаси,

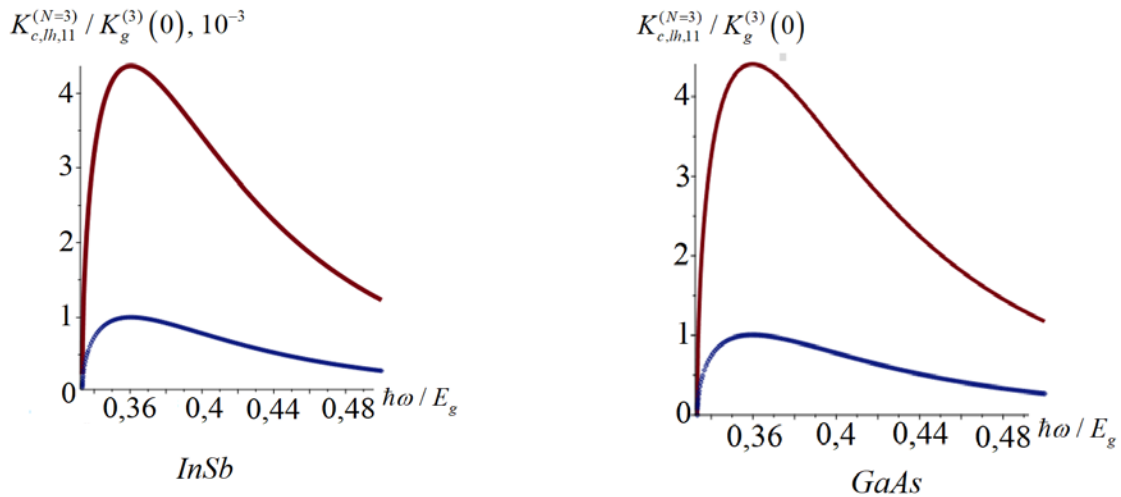
$$L = lh, \quad (L = hh) \text{ энгил (оғир) коваклар учун, } \mu_+^{(c,L)} = \frac{m_c m_L}{m_c + m_L} \text{ - ток}$$

ташувчиларнинг келтирилган эффектив массаси. Охири муносабатлардан энгил ва оғир ковакларнинг энергиялари учун қуйидаги мулоҳазалар ўринлидир: а) агар оптик ўтиш оғир коваклар тармоғидан кечса, у ҳолда

$$E_{hh}(k_{c,hh}^{(3\omega)}) = \frac{m_c}{m_c + m_{hh}} (3\hbar\omega - E_g), \quad E_{lh}(k_{c,lh}^{(3\omega)}) = \frac{m_c \cdot m_{hh}}{m_{lh} (m_c + m_{hh})} (3\hbar\omega - E_g);$$

б) агар оптик ўтиш энгил коваклар тармоғидан кечса, у ҳолда $E_{hh}(k_{c,hh}^{(3\omega)}) = \frac{m_c \cdot m_{lh}}{m_{hh} (m_c + m_{lh})} (3\hbar\omega - E_g),$

$$E_{lh}(k_{c,lh}^{(3\omega)}) = \frac{m_c}{m_c + m_{lh}} (3\hbar\omega - E_g). \quad E_{lh}(k_{c,lh}^{(3\omega)}) = \frac{m_c}{m_c + m_{lh}} (3\hbar\omega - E_g). \quad \text{Натижада таркибий}$$

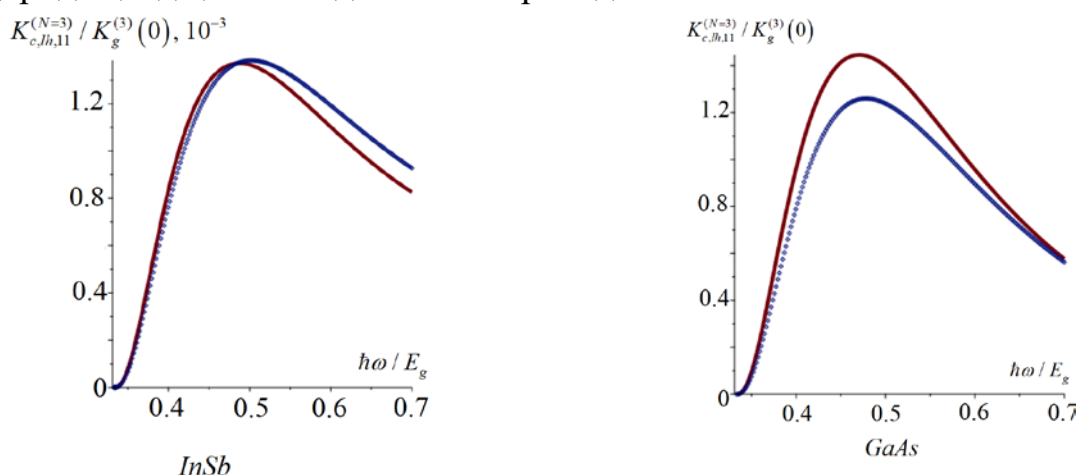


5-расм. Матнда қайд қилинган а) ҳолда $K_{c,hl}^{(N=3)} / K_g^{(3)}(0)$ катталиқнинг икки кристалл учун спектрал боғланиши.

матрицавий элементнинг ташкил этувчиларидаги энергиявий маҳражлар ёруғликнинг частотаси ҳамда кристаллнинг зонавий параметрларига боғлиқ ҳолда аниқланади.

Айталик, ток ташувчилар бошланғич ҳолатлари валент зонасининг энгил коваклар тармоғида, виртуал ҳолатлар эса валент зонасининг оғир ва энгил коваклар тармоғида жойлашсин. У ҳолда Кейн модели яқинлашишда $|V, -3/2\rangle \Rightarrow |m\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$ ва $|V, -1/2\rangle \rightarrow |V, m\rangle \rightarrow |c, m'\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$ оптик ўтишларга тегишли уч фотонли парциал ютилиш коэффициентининг спектрал боғланишлари 5- ва 6-расмда тасвирланди. Бу расмлардан кўриняптики, частотанинг ортиши билан дастлаб ортиб, максимумга эришиб, сўнгра камая

боради. Бундай кўринишли спектрал боғланишнинг физикавий таҳлиллари юқорида қайд қилингандек олиб борилади.



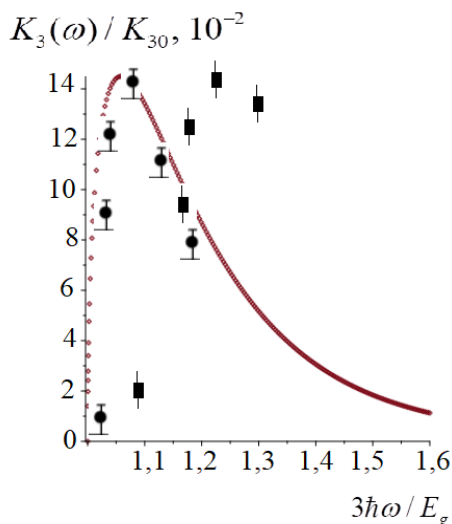
6-расм. Матнда қайд қилинган $a2$) ҳолда $K_{c,th,11}^{(N=3)}(\omega)$ катталикининг икки кристалл учун спектрал боғланиши.

“Мураккаб зонали кристалларда кутбланган ёруғликнинг зоналараро кўп фотонли ютилиши. Назария ва тажриба натижаларини солиштириш” номли тўртинчи бобда мураккаб зонали кристалларда ёруғликнинг кўп фотонли ютилиши ва уларнинг чизикли-циркуляр дихроизми спектрал боғланишлари ҳисоблашлари $\vec{k} \cdot \vec{p}$ ҳисоблаш методига асосланган ҳолда, яъни кристалларнинг зонавий тузилишига - Кейн моделига, 8×8 ўлчамли гамилтониан матричасига эътибор берган ҳолда олиб борилди.

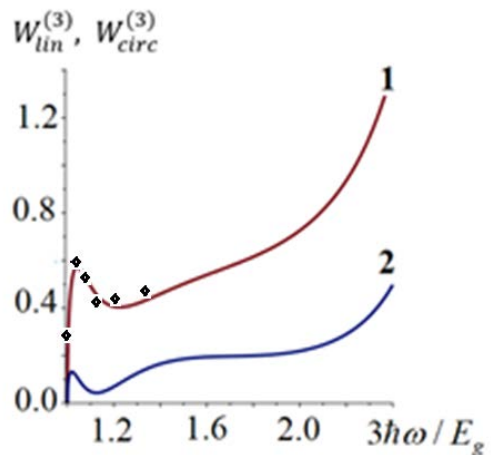
7-расмда $K^{(N=3)}(3\hbar\omega / E_g)$, 8-расмда $W_{lin}^{(3)}(\omega)$ ($W_{circ}^{(3)}(\omega)$) спектрал боғланишларнинг назарий ва *GaAs* ҳамда *ZnS* учун тажриба натижалари солиштирилди. Улардан кўриняптики, ёруғликнинг кўп фотонли ютилишида частотанинг ортиб бориши билан кўп фотонли ютилиш коэффициенти орта бориб ва максимумга эришиб сўнгра камайиб боради. Бу ҳол тор зонали кристалларда қўлланилган Кейн моделининг ўзига хослиги билан тушунтирилади. Хусусан, Кейн моделида импульс операторининг айрим нодиагонал матрицавий элементлари ток ташувчилар тўлқин векторига боғлиқ бўлмай қолади, Латтинжер-Кон яқинлашишда эса бу ҳол кузатилмайди. Шунингдек, Кейн моделида энергетик спектрда нопараболик ҳадларни ҳосил қилади. Буларни эътиборга олган ҳолда олиб борилган назарий таҳлиллар тажриба натижаларига мос келади: айниқса, *ZnS* учун тажриба натижалари билан назария жуда яхши мос келади.

ХУЛОСА

“Мураккаб зонали кристалларда зоналараро кўп фотонли ёруғлик ютилишининг спектрал тадқиқи” мавзусидаги фалсафа доктори (PhD) диссертация ишининг натижаларидан келиб чиққан ҳолда қуйидаги хулосалар тақдим этилади:



7-расм. Ёруғликнинг уч фотонли зоналараро ютилиш коэффициентининг $K^{(N=3)}(3\hbar\omega/E_g)/K_{30}$ спектрал боғланишининг назарий ва тажриба натижаларини солиштириш. Ромбли чизик назария, тўртбурчаклар *GaAs* учун [Jun He ва б., *Optics Express*. -2005] ва доиралар *ZnS* учун [Matthew Reicherta, ва б., *Proc. of SPIE*. -2016] экспериментал натижалар.



8-расм. *InSb* кристаллида уч фотонли оптик ўтишлар эҳтимоллиги спектрал боғланиши: 1 - чизикли, 2 - циркуляр кутбланган ёруғликка тегишли назарий, ромблар [Claudiu M. ва б., *Optics letters*. -2008.] ишдан олинган экспериментал натижалар.

1. Кейн модели яқинлашишда мураккаб зонали кристаллда валент зонасининг энгил ва оғир коваклар тармоғидан ўтказувчанлик зонасига оптик ўтишлар билан боғланган зоналараро уч фотонли ютилиш ва чизикли-циркуляр дихроизм коэффициентларининг спектрал боғланишлари ҳисобланган.
2. Ток ташувчиларнинг оралиқ ҳолатлари валент зонасининг нафақат энгил ковак, балки оғир ковак ва спин-орбитал кенгайган тармоқларида, шунингдек, ўтказувчанлик зонасида бўлишига эътибор қаратилган ҳолда зоналараро оптик ўтишлар табақалаштирилган.
3. Яримўтказгичли кристалларда $|V,+1/2\rangle \Rightarrow |V,m\rangle \rightarrow |c,-1/2\rangle$ тур оптик ўтишлар учун уч фотонли ютилиш коэффициентининг спектрал боғланишига валент зонасининг тармоқларидаги бир вақтнинг ўзида икки фотонли ютилиш жараёнининг асосий улуш бериши аниқланган.
4. $|V,+1/2\rangle \rightarrow |V,m\rangle \rightarrow |c,m'\rangle \rightarrow |c,-1/2\rangle$ оптик ўтишларда циркуляр кутбланган ёруғлик учун $K_{c,lm,1}^{(N=3)}(\omega)$ катталиқ чизикли кутбланган ёруғликка нисбатан миқдоран катта бўлиши ҳисобланган. Бу ҳол энгил коваклар тармоғидан ўтказувчанлик зонасига ўтиш жараёнидагина кузатилиши кўрсатилган.
5. $K^{(N=3)}(3\hbar\omega/E_g)$ боғланишининг назарий ҳисоблаш натижалари *GaAs* ҳамда *ZnS* учун тажриба натижалари билан солиштирилган. Зоналараро

- ўтишларнинг назарий ҳисоблашларида яккаланган уч фотонлар иштирок этган оптик ўтишлар эътиборга олинган.
6. Ёруғликнинг кўп фотонли ютилишида частотанинг ортиб бориши билан кўп фотонли ютилиш коэффиценти орта бориб ва максимумга эришиб сўнгра камайиб бориши тадқиқ қилинган. Бу спектрал боғланиш тор зонали кристалларда қўлланилган Кейн моделининг ўзига хослиги билан тушунтирилган.
 7. Миқдорий ҳисоблашлар ток ташувчилар энергетик спектрида нопараболик ҳадларни ҳам эътиборга олиб борилганида уч фотонли чизиқли-циркуляр дихроизм коэффицентининг назарий спектрал боғланиши ZnS учун бажарилган тажриба натижаларини 15 фоиздан ортиқ бўлмаган хатолик билан тушунтирилган.
 8. Ёруғликнинг қутбланган даражасига боғлиқ бўлган уч фотонли оптик ўтиш эҳтимоллигининг спектрал боғланиши бир неча қўшилувчилардан иборат бўлиб, частотанинг маълум бир қийматида бу қўшилувчиларнинг бирортаси махражидаги бошланғич ва оралик ҳолатлар энергиявий фарқи нолга тенг бўлса, у ҳолда резонанс ҳодисаси содир бўлиши аниқланган.
 9. Спектрал боғланишлардаги резонанснинг содир бўлмаслиги учун уч зонали Кейн моделидан фарқли ўлароқ ўтказувчанлик ва валент зоналардан узоқда жойлашган зоналар билан ўзаро таъсирини, яъни тўрт, олти, саккиз ва ҳк. зонали яқинлашишларни ҳам эътиборга олиш зарурлиги топилган.

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

ФЕРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

МУМИНОВ ИСЛОМБЕК АРАББОЕВИЧ

**СПЕКТРАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЖЗОННОГО
МНОГОФОТОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА В КРИСТАЛЛАХ СО
СЛОЖНОЙ ЗОНОЙ**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам

Фергана – 2021

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером В2021.2.PhD/FM609.

Диссертация выполнена в Ферганском государственном университете.

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

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

Официальные оппоненты: **Аюханов Рашид Ахмедович**
доктор физико-математических наук, профессор.

Султонов Номонжон Акрамоич
доктор физико-математических наук, профессор.

Ведущая организация: **Каракалпакский государственный университет**

Защита диссертации состоится на заседании Ученого совета по присуждению ученой степени доктора философии PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 Ферганского политехнического института в 2021 году в «___» _____ часов _____. Адрес: 150107, Узбекистан, г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел.: (+99873) 241-13-03; факс: (+99873) 241-12-06; e-mail: uzferfizika@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-методическом отделе Информационно-ресурсного центра Ферганского политехнического института (регистрационный номер _____). (Адрес: 150107, г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел.: (+99873) 241-13-03).

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2021 года.
(протокол рассылки № _____ от «___» _____ 2021 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.

С.Ф.Эргашев

Зам. председателя научного семинара при научном совете по присуждению ученой степени доктора философии, д.т.н., профессор.

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире опто- и фотоэлектроники изучение многофотонных процессов в кристаллах со сложной зонной структурой занимает одну из лидирующих позиций. Теоретические исследования в этой области требуют использования высокоэффективных инфракрасных детекторов, устройств нелинейной оптики относительно длины волны или интенсивности света, каскадных лазеров, связанных со спинами носителей тока, и других типов квантовых генераторов. В частности, использование многофотонных процессов в кристаллах позволяет повысить фотоэлектрические параметры кристаллических гомо- и гетероструктур: интегральная чувствительность до 100 А / мкм, усиление по току до 10^2 - 10^3 , темновой ток не превышает десятков нА. В связи с этим теоретическое исследование оптических и фотоэлектрических свойств кристаллов имеет важное значение в области науки и техники.

Ведущие мировые научно-исследовательские центры сосредоточены на исследовании нелинейного поглощения света в кристаллах кубической и тетраэдрической симметрии в зависимости от его степени поляризации света, а также на разработке механизмов одно- и многофотонного поглощения поляризованного излучения для повышения эффективности полупроводниковых оптических и фотоэлектрических устройств. В частности, усовершенствование теоретических методов расчета нелинейного по отношению интенсивности света оптических явлений в кристаллах типа германия, кремния и подобных им, а также более глубокое исследование физической природы таких явлений остаются актуальными и нерешенными задачами в области фотоники, опто- и наноэлектроники. При исследовании оптических и фотоэлектрических свойств кристаллов со сложной зонной особое внимание следует уделять на их зонной структуре, природе виртуальных состояний, участвующих в многофотонных оптических переходах, и степени поляризации света.

В последние годы в нашей Республике особое внимание уделяется актуальным и приоритетным направлениям прикладных и фундаментальных научных исследований, в частности, созданию инновационных разработок в области использования солнечной энергии. В соответствии со Стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан определены важные задачи по созданию эффективных научных и инновационных технологий⁶. В связи с этим очень важным является разработка методов повышения эффективности оптических и фотоэлектрических свойств объемных и низкоразмерных кристаллов, используемых в области солнечной фото- и оптоэлектроники.

⁶ Указ Президента Республики Узбекистан ПФ-4947 от 7 февраля 2017 года « О Стратегии действия по дальнейшему развитию Республики Узбекистан».

Настоящая диссертация посвящена исследованию механизмов нелинейно-оптических явлений в кристаллах кубической и тетраэдрической симметрии, в частности межзонному многофотонному поглощению, новых механизмов спектральной зависимости линейно-циркулярного дихроизма в зависимости от степени поляризации света, результаты которых служат для оптимизации оптических параметров твердотельных оптоэлектронных устройств, оптических усилителей и др. фотоэлектрических преобразователей.

Данное диссертационное исследование в определенной степени способствует 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 года⁷, в Постановлениях Президента № ПП-1442 “О приоритетных направлениях развития индустрии Республики Узбекистан на 2011-2015 гг.” от 15 декабря 2010 года⁸ и № ПП-2789 “О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности” от 17 февраля 2017 года⁹, а также № УП-3899 “О мерах по повышению эффективности системы интеграции научной и инновационной деятельности” от 6 августа 2018 г.¹⁰ и № ПП-5032 “О мерах по повышению качества образования и научных исследований в области физики” от 19 марта 2021 г.¹¹, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере и изложенных в соответствующих законодательных актах служит для выполнения задач, поставленных в других нормативных актах, связанных с данной деятельностью.

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

Степень изученности проблемы. Исследования многофотонных оптических и фотоэлектрических явлений в объемных кристаллах ведутся в исследовательских центрах и университетах передовых стран мира. В частности, в результате теоретических и экспериментальных исследований по нелинейным оптическим явлениям в конденсированных средах Ч. Таунса, П. Франкена, А. Форрестера, Р. Гудмундсена, П. Джонсона (США), W.Z.Shen (Китай), М. Хируока, К. Стато (Япония) и Л. В. Келдыша, Н. Г.Басова, А.М.Прохорова, Е.Л.Ивченко, Р.В.Хохлова, Л.Е. Голуба, С.А. Ахманова, Е.Ю. Перлина (Россия) созданы и усовершенствованы квантовые генераторы. Такие типы оптических явлений были экспериментально выполнены Джун Хе, Ингли Ку, Хепингом Ли (Япония) в ZnO и ZnS, Шрини Кришнамурти, Чжи Ганг Ю (Сингапур) в *GaAs*, *InP*, *GaInAs* и *InAsP*, С.Д. Ганичевым (Регензбург,

⁷ <https://lex.uz/docs/3107042>.

⁸ <https://lex.uz/docs/3117025>.

⁹ <https://lex.uz/docs/3823583>.

¹⁰ <https://lex.uz/docs/3853858>.

¹¹ <https://lex.uz/docs/5338558>.

Германия), И.Д.Ярошецким, Е.Б.Берегулиным (Санкт-Петербург, Россия) наблюдались в полупроводниках кубической симметрии.

Механизмы оптических явлений, связанных с состоянием поляризации света и спинов носителей тока в трех и низкоразмерных кристаллах теоретически исследованы членами-корреспондентами РАН Е.Л. Ивченко, М.М. Глазовым, профессорами Г.Е. Пикусом, Н.С. Аверкиевым, Л.Е. Голубом, С.А.Тарасенко (Санкт-Петербург, Россия) и Н.Н.Герасименко, Ю.Н. Пархоменко (Москва, Россия). Узбекскими учеными Э.З. Имамовым, Р.Я. Расуловым и их учениками теоретически изучен ряд механизмов фотонно-кинетических явлений в кристаллах и их низкоразмерных системах.

Однако с квантово-механической точки зрения теоретически не были исследованы: а) оптические переходы многофотонного поглощения света в кристаллах в модели Кейна в зависимости от зонных параметров гамильтониана носителей тока, а также от степени поляризации и интенсивности электромагнитного излучения; б) межзонное многофотонное поглощение и его линейно-циркулярный дихроизм в области произвольных значений волнового вектора носителей тока в модели Кейна; в) оптические явления, происходящие в кристаллах со сложной зоной и обусловленные межзонами переходами с участием σ_+ (правополяризованных) или σ_- (левополяризованных) поляризованных фотонов. По этой причине требуются тщательные исследования в вышеуказанных областях, к теоретическому исследованию которых посвящена данная диссертация.

Связь темы диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего учебного заведения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование проведено в рамках фундаментальных исследований гранта ОТ-Ф2 (Физика и Астрономия) Ферганского государственного университета на тему «Поляризованные оптические эффекты на кристаллах и в их размерно-квантованных ямах» (2007-2011 гг.), гранта ОТ-Ф2-66 Ферганского государственного университета на тему «Теоретическое исследование фотонно-кинетических явлений в полупроводниках и в их наноструктурах» (2017-2020 гг.).

Цель исследования - изучение механизмов межзонного многофотонного поглощения поляризованного света и линейно-циркулярного дихроизма в кристаллах сложной зоной в двух- и трехзонной модели Кейна.

Задачи исследования с использованием многозонной модели Кейна:

выявление механизма межзонного многофотонного поглощения, характеризующегося переходом носителей тока из подзоны тяжелых и легких дырок в зону проводимости в кристаллах кубической симметрии;

классификация трехфотонных межзонных оптических переходов в объемных кристаллах, различающихся начальными и виртуальными состояниями, а также рекомендация физической модели для расчета соответствующих им составных матричных элементов;

на основе предложенной модели определить частотные соотношения парциальных и результирующих коэффициентов трехфотонного поглощения света для каждого типа оптических переходов;

расчет спектральной зависимости межзонного линейно-циркулярного дихроизма трехфотонного поглощения света в кристаллах со сложной зоной в зависимости от начального и промежуточного состояний носителей тока.

Объектами исследования были выбраны кристаллы кубической и тетраэдрической симметрии, а также узкозонные кристаллы со сложной зоной.

Предметом исследования было межзонное трехфотонное поглощение поляризованного света и его линейный круговой дихроизм, происходящие в кристаллах с многозонным приближением Кейна.

Методы исследования. В теоретических расчетах использованы методы золотого правила квантовой механики и теории возмущений, квантовой теории поля, используемой в кристаллофизике, графической техники Фейнмана и функций Дирака.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые развита теория трехфотонного междузонного линейно-циркулярного дихроизма в кристаллах кубической симметрии, с учетом одновременного поглощения двух фотонов в подзонах валентной зоны;

впервые в трехзонном приближении Кейна рассчитаны спектральные зависимости парциальных коэффициентов межзонного трехфотонного поглощения света и проведено количественное сопоставление для кристаллов InSb и GaAs;

определено, что в кристаллах типа InSb и GaAs независимо от начального и виртуального состояний межзонных оптических переходов с ростом энергии фотонов коэффициент поглощения трех и более фотонов увеличивается и достигается до максимума, а затем уменьшается;

впервые выявлено, что в определенной области частот в спектральной зависимости межзонного трехфотонного линейно-циркулярного дихроизма происходит аномальный рост и он исчезает при учете непараболичности в энергетическом спектре носителей тока в многозонном приближении Кейна;

теоретические расчеты спектральной зависимости межзонного трехфотонного линейно-циркулярного дихроизма и коэффициента поглощения объяснили экспериментальные результаты, полученные в кристаллах ZnS и InSb, с погрешностью менее 10%.

Практические результаты исследования, следующие:

сопоставлены теоретические и экспериментальные результаты по спектральной зависимости коэффициента межзонного трехфотонного поглощения и линейно-циркулярного дихроизма в кристаллах кубической симметрии;

оптимизированы свойства малоинерционных фото- и оптоэлектронных устройств и оптических систем записи информации, а также сохранение их в памяти использованных результатов, полученных при исследовании межзонного трехфотонного поглощения света и линейно-циркулярного дихроизма;

применены теоретическо-вычислительные методы, использованные для межзонных многофотонных оптических переходов при теоретическом исследовании нелинейно-оптических явлений не только в объемных, но и в низкоразмерных кристаллах, где энергетический спектр носителей тока рассчитан в модели Кейна;

развиты методы расчетов многофотонных и нелинейных по интенсивности фотонно-кинетических явлений, происходящие в кристаллах кубической симметрии в многозонном приближении Кейна.

Достоверность полученных результатов обосновывается совпадением теоретических и экспериментальных результатов, творчески использованием методов теории твердого тела, квантовой статистической физики и квантовой теории поля, надежностью вычислительного программного обеспечения количественных расчетов, использованием $\vec{k} \cdot \vec{p}$ метода, метода теории возмущений и диаграммной техники, а также правильным выбором объекта исследования.

Научная и практическая значимость результатов исследования отражена в получении новых данных о классификации трехфотонных оптических переходов в зависимости от начальных и виртуальных состояний носителей тока в кристаллах, а также о спектральной зависимости коэффициентов межзонного трехфотонного поглощения и линейно-циркулярного дихроизма, рассчитанной в модели Кейна.

Практическая значимость работы выявлено в использовании многофотонного и нелинейного поглощения поляризованного света в малоинерционных оптических и фотоэлектрических устройствах, использующихся в области регистрации электромагнитных волн и в увеличении рабочей спектральной области оптической записи и хранения данных.

Внедрение результатов исследований. По результатам исследования оптических явлений, связанных с межзонными трехфотонными переходами в кристаллах, зонная структура которых описывается по многозонной модели Кейна:

расчеты спектральных зависимостей коэффициента межзонного трехфотонного поглощения света в кристаллах со сложной зоной, полученные по модели Кейна, были использованы для объяснения результатов исследований в области оптических явлений, происходящих в зависимости от поверхностных состояний в проекте Ф2-21 «Математическое моделирование определения плотности поверхностных состояний на границе полупроводник - диэлектрик» (Справка Наманганского инженерно-строительного института № 06/10-09/651 от 23 июня 2021 г.). Использование научных результатов позволяет расширить область рабочих частот оптических преобразователей, изготовленных из кристаллов со сложной зоной;

результаты теоретических расчетов по многофотонному и нелинейному по интенсивности поглощению поляризованного излучения в кристаллах со сложной зоной использовались при исследовании экситонных, поляронных, биполяронных, а также кинетических явлений в гетеро- и наноструктурах в

фундаментальном проекте Ф2-ОТ-О-15494 «Увеличение эффективности излучателей, фотоэлементов и других оптоэлектронных приборов на основе исследований экситонов, поляронов, биполяронов и кинетических явлений в гетеро- и наноструктурах с квантовыми точками» на 2012-2016 годы (Справка Наманганского государственного университета № 277-04 от 23 июня 2021 г.). Использование научных результатов позволяет продолжать исследования в области моделирования малоинерционных оптических устройств, а также расширить их эффективные рабочие частоты;

результаты спектрального исследования трехфотонного линейно-кругового дихроизма и коэффициента поглощения в кристаллах со сложной зоной использованы при исследовании малоинерционных свойств полупроводниковых фотодиодов в проекте АҲР (F)-20/518 «The Mid Infrared LET and Photodiode pair for Gas Sensors» на 2016-2018 годы (Справка Улудагского университета (Турция), № 2021/20/518). Использование научных результатов позволило увеличить быстродействие полупроводниковых фотопреобразователей.

Апробация результатов исследований. Результаты исследования докладывались и обсуждались на 6 международных научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, в том числе 6-научные статьи в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций, 5 из них в зарубежных научных журналах и 1 монография.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы из 89 названий, 34 рис., 2 таблиц. Объем диссертации составляет 119 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация посвящена исследованию многофотонного поглощения поляризованного света, обусловленного междозонными оптическими переходами носителей тока в кристаллах со сложной зонной структурой.

Во введении обоснована актуальность и перспективность 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, раскрыта степень изученности проблемы, сформулированы цели и задачи, приведены объекты, предметы и методы исследования, изложена научная новизна и практическая значимость исследования, приведены краткие сведения о внедрении результатов, апробации и публикации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе «**Простые механизмы межзонного многофотонного поглощения света в кристаллах со сложной зоной**» дается обзор

литературы по элементарной теории межзонного двух- и трехфотонного поглощения поляризованного света в кристаллах со сложной зоной в модели Кейна. В §1.1 проводится теоретический анализ нелинейного поглощения и механизмов многофотонного поглощения поляризованного света в твердых телах. В §1.2 описаны основные соотношения для двух- и трехфотонных оптических переходов, а в §1.3 проанализированы выражения для вероятностей многофотонных оптических переходов, которые удовлетворяют золотому правилу квантовой механики и зависящие от вектора поляризации света. В §1.4 проводится теоретический анализ двухфотонного поглощения света типа «зона-примесь-зона».

В литературе, прокомментированной в главе 1, рассчитаны коэффициенты двух- и трех фотонного поглощения поляризованного света, где рассматриваются простые механизмы межзонного многофотонного поглощения света. Эти механизмы основаны на поглощении нескольких фотонов, сумма энергий которых примерно равна ширине запрещенной зоны, где в оптических переходах участвуют носители тока, находящиеся вблизи центра зоны Бриллюэна. В этом случае члены гамильтониана, пропорциональные квадрату волнового вектора носителей тока, становятся малыми параметрами второго порядка. В результате ими можно пренебрегать при расчетах. Также рассматривается сферически симметричный энергетический спектр носителей тока. Конечно, такие простые механизмы не могут полностью объяснить экспериментальные результаты по двухфотонному поглощению или его линейно-циркулярному дихроизму. Для этого необходимо учитывать область произвольных значений волнового вектора носителей тока, а также непараболические слагаемые в энергетическом спектре. Эти случаи рассматриваются в главах 2, 3 и 4.

Во второй главе **«Трехфотонные оптические переходы из подзоны тяжелых дырок в зону проводимости в кристалле со сложной зоной в модели Кейна»** многофотонное поглощение света исследовано в кристаллах со сложной зоной, физико-химические свойства которых изучены более подробно. В этой главе рассчитываются спектральные зависимости коэффициента трехфотонного поглощения поляризованного света (§ 2.1) и линейно-циркулярного дихроизма (§ 2.2) в приближении Кейна в кристаллах со сложной зоной с учетом оптических переходов из подзоны тяжелых дырок валентной зоны в зону проводимости. В расчетах сначала выбирается энергетический спектр носителей тока в сферическом приближении. Затем при количественных расчетах спектральной зависимости коэффициента линейно-циркулярного дихроизма учитываются непараболические слагаемые в энергетическом спектре, учет которых приводит к своеобразности спектральной зависимости.

Если выполняется неравенство $3\hbar\omega \ll E_g \ll E_g + \Delta_{so}$, то вклад оптических переходов в трехквантовый процесс, происходящий внутри одной зоны, пренебрежимо мал, и при этом трехфотонный матричный элемент можно считать независимым от волнового вектора носителей тока. Здесь E_g – ширина

запрещенной зоны кристалла, Δ_{so} – ширина зоны спин-орбитального расщепления. Если в расчетах не учитывать вклад зон, находящиеся над зоной проводимости, то зависимость коэффициента линейно-циркулярного

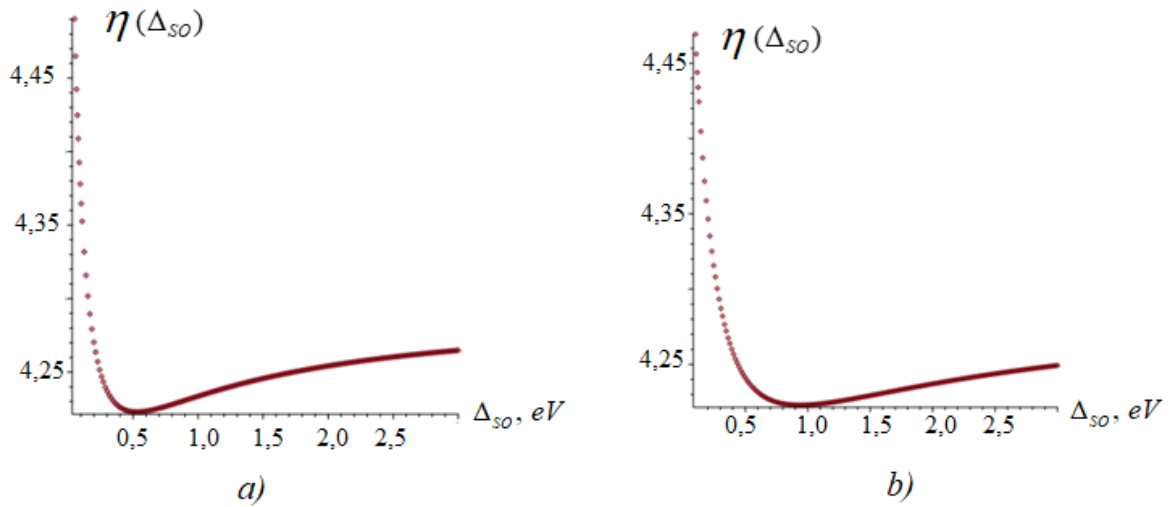
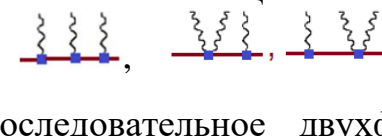





Рис.1. Зависимость двухфотонного коэффициента линейно-циркулярного дихроизма от ширины зоны спин-орбитального расщепления в кристаллах *InAs* (a), *InSb* (b) вблизи центра зоны Бриллюэна.

дихроизма $\eta^{(2)}(\Delta_{so})$ от величины Δ_{so} для кристаллов *InAs* и *InSb* имеет вид, показанный на рис. 1. Как видно из рис.1, во - первых линейно-циркулярный дихроизм, обусловленный двухфотонным поглощением света в области, которая находится вблизи центра зоны Бриллюэна, изменяется в зависимости от ширины спин-орбитального расщепления (Δ_{so}) и достигает минимума при 0,5 эВ (0,9 эВ) в кристалле *InSb* (*InAs*). Во-вторых, по мере увеличения величины Δ_{so} минимум смещается в область больших энергий.

Если величина Δ_{so} выбрана меньше чем 0,5 эВ (0,9 эВ), то сначала необходимо обратить внимание на анализ спектральной зависимости в области уменьшения коэффициента линейно-циркулярного дихроизма, а затем – в области его увлечения. В-третьих, в кристалле чем меньше значение Δ_{so} , тем ярче проявляется линейно-циркулярный дихроизм в этом кристалле.

Таким образом, в кристаллах со сложной зоной теоретический анализ также меняется в зависимости от выбора значения ширины спин-орбитального расщепления при фиксированном значении ширины запрещенной. Однако для широкозонного кристалла минимум зависимости $\eta^{(2)}(\Delta_{so})$ не наблюдается: он уменьшается с ростом Δ_{so} .

Трехфотонное межзонное поглощение света описывается с помощью следующих диаграмм , где  - показывает одно фотонное, а  - последовательное двухфотонное поглощение,  -

одновременного поглощения двух фотонов. Тогда, в общем случае, имеются шесть типов различных трехфотонных оптических переходов, происходящих между подзонами валентной зоны ($|V_l, m_l\rangle$) и зоны проводимости ($|c, m'_l\rangle$),

$$\begin{aligned} |V_{hh}, \pm 3/2\rangle &\xrightarrow{\text{трех фотонное поглощение}} |c, \pm 1/2\rangle, & |V_{hh}, \pm 3/2\rangle &\xrightarrow{\text{трех фотонное поглощение}} |c, \mp 1/2\rangle, \\ |V_{lh}, \pm 3/2\rangle &\xrightarrow{\text{трех фотонное поглощение}} |c, \pm 1/2\rangle, & |V_{lh}, \pm 3/2\rangle &\xrightarrow{\text{трех фотонное поглощение}} |c, \mp 1/2\rangle, \\ |SO, \pm 1/2\rangle &\xrightarrow{\text{трех фотонное поглощение}} |c, \pm 1/2\rangle, & |SO, \pm 1/2\rangle &\xrightarrow{\text{трех фотонное поглощение}} |c, \mp 1/2\rangle, \end{aligned} \quad (1)$$

т.е. каждый из них состоит из суммы составляющих, отличающихся друг от друга начальными, виртуальными и конечными состояниями (рис. 2): а) если начальные состояния находятся в подзоне тяжелых дырок валентной зоны, тогда

$$\begin{aligned} \sum_{m_l, m'_l = \pm 1/2, \pm 3/2} \{ & |V_{hh}, \pm 3/2\rangle \Rightarrow |V_l, m_l\rangle \rightarrow |c, \pm 1/2\rangle + |V_{hh}, \pm 3/2\rangle \rightarrow |V_l, m_l\rangle \rightarrow |V_l, m'_l\rangle \rightarrow |c, \pm 1/2\rangle + \\ & + |V_{hh}, \pm 3/2\rangle \rightarrow |c, m_l\rangle \rightarrow |c, m'_l\rangle \rightarrow |c, \pm 1/2\rangle + |V_{hh}, \pm 3/2\rangle \rightarrow |SO, m_l\rangle \rightarrow |SO, m'_l\rangle \rightarrow |c, \pm 1/2\rangle + \\ & + |V_{hh}, \pm 3/2\rangle \rightarrow |V_l, m_l\rangle \rightarrow |c, m'_l\rangle \rightarrow |c, \pm 1/2\rangle + |V_{hh}, \pm 3/2\rangle \rightarrow |c, m_l\rangle \rightarrow |V_l, m'_l\rangle \rightarrow |c, \pm 1/2\rangle + \\ & + |V_{hh}, \pm 3/2\rangle \rightarrow |V_l, m_l\rangle \rightarrow |SO, m'_l\rangle \rightarrow |c, \pm 1/2\rangle + |V_{hh}, \pm 3/2\rangle \rightarrow |SO, m_l\rangle \rightarrow |V_l, m'_l\rangle \rightarrow |c, \pm 1/2\rangle + \\ & + |V_{hh}, \pm 3/2\rangle \rightarrow |c, m_l\rangle \rightarrow |SO, m'_l\rangle \rightarrow |c, \pm 1/2\rangle + |V_{hh}, \pm 3/2\rangle \rightarrow |SO, m_l\rangle \rightarrow |c, m'_l\rangle \rightarrow |c, \pm 1/2\rangle \}, \end{aligned} \quad (2)$$

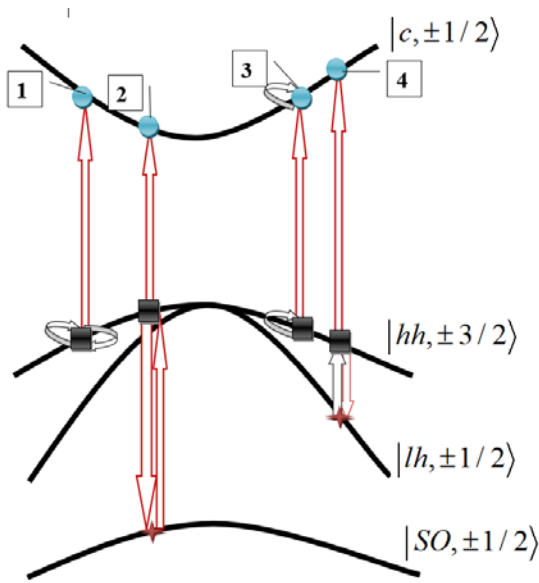


Рис.2. Схемы трех фотонных оптических переходов из подзоны тяжелых дырок валентной зоны в зону проводимости: четырехугольник-начальное состояние, круг-конечное состояние носителей тока, прямые стрелки- межзонные или межподзонные, а не прямые стрелки-внутризонные или внутриподзонные оптические переходы.

где m_l или m'_l собственное значение оператора полного момента \rightarrow показывает однофотонный переход. Каждая вышеприведенная сумма отличается от другой порядковым номером виртуальных состояний. В общем случае, виртуальные состояния могут находиться в подзонах легких и тяжелых дырок ($|V_l, m_l\rangle$), в подзоне спин-орбитального расщепления ($|SO, m'_l\rangle$) валентной зоны, а также в зоне проводимости ($|c, m'_l\rangle$) (рис.2), где $m_l, m'_l = \pm 3/2$ для тяжелых дырок, $m_l, m'_l = \pm 1/2$ для легких дырок и для электронов в зоне проводимости, а также в подзоне спин-орбитального расщепления. $|A, m_a\rangle \Rightarrow |B, m_b\rangle$

описывает переход из состояния $|A, m_a\rangle$ в $|B, m_b\rangle$ с одновременным поглощением двух фотонов,

$|A, m_a\rangle \rightarrow |B, m_b\rangle$ означает одно фотонный оптический переход. Остальные оптические переходы определяются аналогичным образом.

В областях, близких к центру зоны Бриллюэна, в законе дисперсии зон наблюдается параболическая зависимость (Рис.2). В частности, энергетические спектры электронов и дырок имеют следующий вид:

$$E_{el}(k)|_{k \rightarrow 0} = E_c + \frac{2P^2}{3E_g}k^2 \equiv E_c + \frac{\hbar^2 k^2}{2m}, \quad E_{lh}(k)|_{k \rightarrow 0} = E_c - E_g - \frac{2P^2}{3E_g}k^2 \equiv E_v - \frac{\hbar^2 k^2}{2m}, \quad (3)$$

где $m = \frac{3\hbar^2 E_g}{4P^2}$ - эффективная масса электрона.

Следует отметить, что количество оптических переходов из подзоны легких дырок в зону прозрачности составляет 16, которые отличаются друг от друга промежуточными состояниями. Поэтому проанализируем оптические переходы, по возможности, отдельно. Например составные матричные элементы оптических переходов, определяемых суммой следующих диаграмм

$$|V, -3/2\rangle \Rightarrow |V, -3/2\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle, \quad |V, -3/2\rangle \Rightarrow |V, +1/2\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle, \quad |V, -3/2\rangle \Rightarrow |V, -1/2\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$$

описываются выражением
$$-\frac{iP_c B e'_+}{2\sqrt{2}} \left[\frac{2\left(\frac{A}{B}-1\right)}{-\hbar\omega} + \frac{|e'_-|^2 + 4e'_z{}^2}{E_{lh} - E_{hh} - 2\hbar\omega} \right]$$

(случай *a*), а составные матричные элементы оптических переходов, определяемых суммой следующих диаграмм $|V, -3/2\rangle \rightarrow |V, -3/2\rangle \rightarrow |V, -3/2\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$, $|V, -3/2\rangle \rightarrow |V, -3/2\rangle \rightarrow |V, -1/2\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$, $|V, -3/2\rangle \rightarrow |V, -1/2\rangle \rightarrow |V, -3/2\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$, $|V, -3/2\rangle \rightarrow |V, -1/2\rangle \rightarrow |V, -1/2\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$ выражаются как (случай *b*)

$$\frac{i}{\sqrt{2}} P_c B^2 k^2 e'_+ \left\{ \frac{1}{(-2\hbar\omega)} \left[\frac{4\left(\frac{A}{B}-1\right)^2 e'_z{}^2}{(-\hbar\omega)} + \frac{3|e'_-|^2}{(E_{lh} - E_{hh} - \hbar\omega)} \right] + \frac{2e'_z{}^2}{(E_{lh} - E_{hh} - 2\hbar\omega)} \left[\frac{2\left(\frac{A}{B}-1\right)}{(-\hbar\omega)} + \frac{2\left(\frac{A}{B}+1\right)}{(E_{lh} - E_{hh} - \hbar\omega)} \right] \right\}.$$

В результате квадрат модуля каждого матричного элемента, с помощью которого определяется коэффициент линейного циркулярного дихроизма $\eta(\omega)$ для рассматриваемого оптического перехода вычисляется по отдельности, а затем необходимо произвести усреднение по телесным углам волнового вектора носителей тока. Спектральная зависимость коэффициента линейно циркулярного дихроизма ($\eta(\omega)$), соответствующего этим оптическим переходам, представлена на рис.3. Как видно из рис.3, характер спектральной зависимости $\eta(\omega)$ зависит от типа оптических переходов. В частности, для первого типа оптических переходов $\eta(\omega)$ увеличивается с ростом частоты (рис. 3, а), а для второго типа оптических переходов она уменьшается до минимума, достигает минимума, а затем увеличивается (рис. 3, б). Стоит отметить, что зависимость $\eta(\omega)$, рассчитанная для 16 различных оптических переходов, отличающихся друг от друга своими виртуальными

состояниями, имеет различный характер: постоянная по величине, равная единице, меньше или больше единицы. Теоретический анализ показывает, что физическая природа зависимости $\eta(\omega)$, рассчитанная для каждого оптического перехода, не зависит от отношения

$$K_{sum}^{(N)}(\omega, T) = \sum_{c, m'_c; \nu, m'_\nu} K_{c, m'_c; \nu, m'_\nu}^{(N)}(\omega, T) = \frac{N\hbar\omega}{I} \sum_{c, m'_c; \zeta, m'_\zeta; \nu, m'_\nu} W_{c, m'_c; \zeta, m'_\zeta; \nu, m'_\nu}^{(N)}, \quad (4)$$

где $K_{c, m'_c; \nu, m'_\nu}^{(N)}(\omega, T)$ - межзонный парциальный коэффициент N фотонного поглощения света, $W_{c, m'_c; \zeta, m'_\zeta; \nu, m'_\nu}^{(N)}$ - вероятность оптических переходов, при расчете которых необходимо брать сумму по промежуточным состояниям ($|\zeta, m'_\zeta\rangle$). В этом случае вероятность N фотонных оптических переходов, происходящих из валентной зона в зону проводимости определяется как

$$W_{c, m'_c; \zeta, m'_\zeta; \nu, m'_\nu}^{(N)} = \frac{2\pi}{\hbar} \sum_{\zeta, m'_\zeta} \left| M_{c, m'_c; \zeta, m'_\zeta; \nu, m'_\nu}^{(N)}(\mathbf{k}) \right|^2 \cdot [f_c(\mathbf{k}) - f_{\nu}(\mathbf{k})] \cdot \delta(E_c(\mathbf{k}) - E_{\nu}(\mathbf{k}) - N\hbar\omega), \quad (5)$$

где $|\zeta, m'_\zeta\rangle$ виртуальные состояния могут быть расположены в подзонах валентной зоны, то есть или в подзоне тяжелых дырок $|V_{hh}, m'_{hh}\rangle$ ($m'_{hh} = \pm 3/2$), или в подзоне легких дырок $|V_{lh}, m'_{lh}\rangle$ ($m'_{lh} = \pm 1/2$), а также в подзоне спин-орбитального расщепления $|SO, m'_{SO}\rangle$ ($m'_{SO} = \pm 1/2$), $M_{c, m'_c; \zeta, m'_\zeta; \nu, m'_\nu}^{(N)}(\mathbf{k})$ - составной матричный элемент рассматриваемого оптического перехода, $f_c(\mathbf{k})$ [$f_{\nu}(\mathbf{k})$] - функция распределения носителей тока, $E_c(\mathbf{k})$ [$E_{\nu}(\mathbf{k})$] - энергетический спектр электронов (дырок), m'_ν - собственное значение оператора полного момента импульса, $\nu = c, V_l, SO$. матричный элемент оператора электрон-фотонного

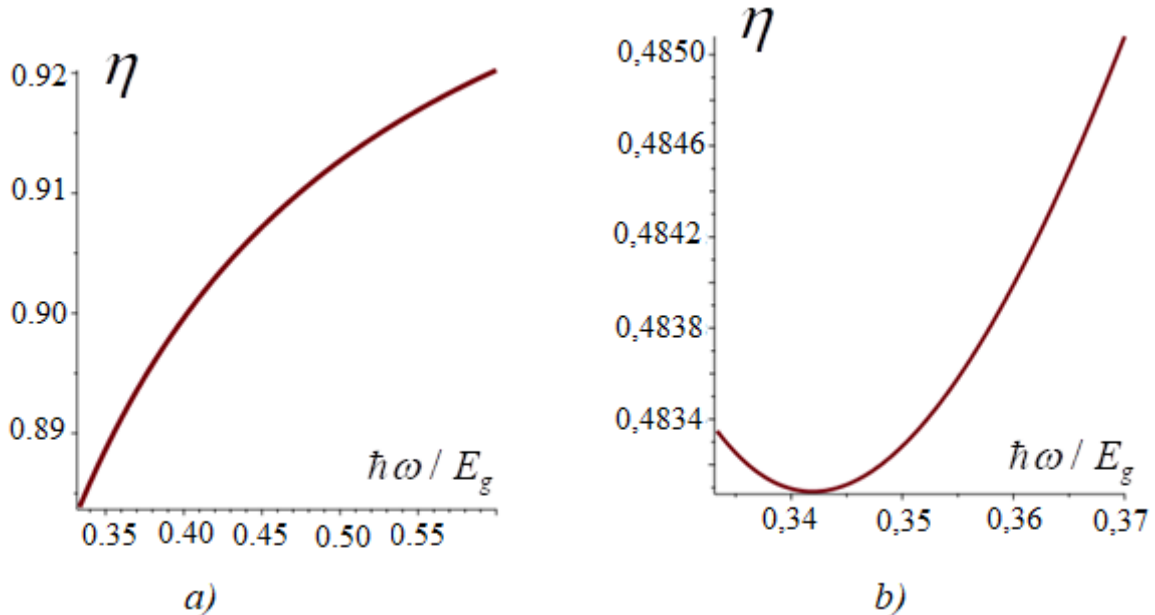


Рис.3. Спектральная зависимость межзонного трехфотонного линейно-циркулярного дихроизма для двух оптических переходов, представленных в тексте.

взаимодействия определяется как $H_{II'} = \frac{e}{im_0\omega} \left(\frac{2\pi I}{n_\omega c} \right)^{1/2} (\vec{e} \cdot \vec{p})_{II'}$, \vec{p} - оператор импульса, \vec{A} - векторный потенциал электромагнитной волны, I - интенсивность света, n_ω - показатель преломления кристалла на частоте ω .

Вероятность многофотонных оптических переходов, позволяющая рассчитать коэффициент многофотонного поглощения света выражается следующим образом

$$W_{c,m'_c;V,m'_V}^{(N)} = \frac{1}{\pi\hbar} \left(\frac{e}{m_0\omega} \right)^{2N} \left(\frac{2\pi I}{nc} \right)^N \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right)^3 (N\hbar\omega - E_g)^{-1} \left| \mathfrak{R}_{c,m'_c;V,m'_V}^{(N)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right|^2 \times \\ \times \left[f \left(E_c \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right) - f \left(E_{V_l} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right) \right], \quad (6)$$

здесь $k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} = \left[\frac{2m_c m_{V_l}}{m_c + m_{V_l}} \right] (N\hbar\omega - E_g)$ - волновой вектор, определяемый из закона

сохранения энергии для N фотонного оптического перехода, $m_c (m_{V_l})$ - эффективная масса носителей тока в зоне $c (V_l)$, $\left| \mathfrak{R}_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(N)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right|^2$ -

определяется с помощью интеграла $\int_{-1}^1 d \cos(\theta) \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\infty k dk^2 \sum_{\zeta,m'_\zeta} \left| M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(N)} (k, \theta, \varphi) \right|^2$,

$f_c \left(k_{c,m_{hh}}^{(N\omega)} \right) \left[f_{hh} \left(k_{c,m_{hh}}^{(N\omega)} \right) \right]$ - функция распределения носителей тока, участвующего в N фотонном оптическом переходе, $E_c \left(k_{c,m_{hh}}^{(N\omega)} \right) \left[E_{hh} \left(k_{c,m_{hh}}^{(N\omega)} \right) \right]$ - их энергия. Обратимся

теперь к конкретным примерам. Допустим, что результирующий составной матричный элемент $M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(N)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right)$ состоит из двух составляющих, а именно

$M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(N)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) = M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(A)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) + M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(B)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right)$, где $M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(A)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right)$ - матричный элемент оптических переходов типа "A", $M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(B)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right)$ -

матричный элемент типа оптических переходов типа "B". Поскольку вероятность оптических переходов определяется квадратом модуля составного матричного элемента, поэтому в расчетах используем следующее преобразование

$$\left| M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(N)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right|^2 = \left| M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(A)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) + M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(B)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right|^2 = \\ = \left| M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(A)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right|^2 + \left| M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(B)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right|^2 + \\ + \left[M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(A)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right]^* M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(B)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) + M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(A)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \left[M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(B)} \left(k_{c,m_{V_l}}^{(N\omega)} \right) \right]^*. \quad (7)$$

Таким образом, результирующий коэффициент многофотонного поглощения света является суммой коэффициентов парциальных многофотонных поглощений. Например, парциальные коэффициенты поглощения света, соответствующие только оптическим переходам типов "A"

и "B", определяются величинами $\left| M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(A)} \left(k_{c,m_{V_1}}^{(N\omega)} \right) \right|^2$ и $\left| M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(B)} \left(k_{c,m_{V_1}}^{(N\omega)} \right) \right|^2$ соответственно. В выражении результирующего коэффициента поглощения света также существует слагаемое, которое определяется произведением $\left[M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(A)} \left(k_{c,m_{V_1}}^{(N\omega)} \right) \right]^* M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(B)} \left(k_{c,m_{V_1}}^{(N\omega)} \right)$. В результате коэффициент многофотонного поглощения света можно выразить как сумму коэффициентов поглощения, определяемых следующими соотношениями

$$K_{c,m'_c;V,m'_V}^{(A,B,C)}(\omega, T) = \frac{N\hbar\omega}{I} W_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(A,B,C)}, \quad (8)$$

где

$$W_{c,m'_c;V,m'_V}^{(A,B)} = \frac{1}{\pi\hbar} \left(\frac{e}{m_0\omega} \right)^{2N} \left(\frac{2\pi I}{nc} \right)^N \left(k_{c,m_{V_1}}^{(N\omega)} \right)^3 (N\hbar\omega - E_g)^{-1} \left| M_{c,m'_c;V,m'_V}^{(A,B)} \left(k_{c,m_{V_1}}^{(N\omega)} \right) \right|^2 \times \\ \times \left[f \left(E_c \left(k_{c,m_{V_1}}^{(N\omega)} \right) \right) - f \left(E_{V_1} \left(k_{c,m_{V_1}}^{(N\omega)} \right) \right) \right], \\ W_{c,m'_c;V,m'_V}^{(C)} = \frac{1}{\pi\hbar} \left(\frac{e}{m_0\omega} \right)^{2N} \left(\frac{2\pi I}{nc} \right)^N \left(k_{c,m_{V_1}}^{(N\omega)} \right)^3 (N\hbar\omega - E_g)^{-1} \left[f \left(E_c \left(k_{c,m_{V_1}}^{(N\omega)} \right) \right) - f \left(E_{V_1} \left(k_{c,m_{V_1}}^{(N\omega)} \right) \right) \right] \times \\ \times \left[\left| M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(A)} \left(k_{c,m_{V_1}}^{(N\omega)} \right) \right|^* M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(B)} \left(k_{c,m_{V_1}}^{(N\omega)} \right) + M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(A)} \left(k_{c,m_{V_1}}^{(N\omega)} \right) \left| M_{c,m'_c;\zeta,m'_\zeta;V,m'_V}^{(B)} \left(k_{c,m_{V_1}}^{(N\omega)} \right) \right|^* \right]^2$$

Если произвести расчеты этих вкладов в коэффициент поглощения света по отдельности, тогда можно будет сравнить доли каждого типа оптических переходов на результирующее поглощение. Поэтому при расчете результирующего коэффициента трехфотонного поглощения света будем вычислять спектральные зависимости коэффициентов поглощения, соответствующие каждому оптическому переходу по отдельности. Например, для кристаллов кубической симметрии коэффициент трехфотонного поглощения света, определяемый суммой оптических переходов $|V, -3/2\rangle \Rightarrow |V, -3/2\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$, $|V, -3/2\rangle \Rightarrow |V, +1/2\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$, $|V, -3/2\rangle \Rightarrow |V, -1/2\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$, выражается как

$$K_{c,hh,1}^{(N=3)} = \frac{3}{4} K_g^{(3)}(0) \frac{m_c m_{hh}}{(m_c + m_{hh}) m_0} I^2 \frac{E_g^2}{B^2 k_g^4} \left[f_c \left(k_{c,m_{hh}}^{(3\omega)} \right) - f_{hh} \left(k_{c,m_{hh}}^{(3\omega)} \right) \right] x_\omega^{-5} r_{c,m_{hh}}^{(3\omega)} \times \\ \times \left[\left(\frac{2 \left(\frac{A}{B} - 1 \right)}{x_\omega} \right)^2 a_{c,hh,1}^{(N=3)} + 2 \frac{2 \left(\frac{A}{B} - 1 \right)}{-x_\omega} \frac{b_{c,hh,1}^{(N=3)}}{x_{lh} - x_{hh} - 2x_\omega} + \frac{c_{c,hh,1}^{(N=3)}}{(x_{lh} - x_{hh} - 2x_\omega)^2} \right], \quad (9)$$

для следующих оптических перехода типа $|V, -3/2\rangle \rightarrow |V, -3/2\rangle \rightarrow |V, -3/2\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$, $|V, -3/2\rangle \rightarrow |V, -3/2\rangle \rightarrow |V, -1/2\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$, $|V, -3/2\rangle \rightarrow |V, -1/2\rangle \rightarrow |V, -3/2\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$, $|V, -3/2\rangle \rightarrow |V, -1/2\rangle \rightarrow |V, -1/2\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$ получим выражение

$$K_{c,hh,2}^{(N=3)} = 6K_g^{(3)}(0) \frac{m_c m_{hh} I^2 E_g^4}{(m_c + m_{hh}) m_0} \left[f_c(k_{c,m_{hh}}^{(3\omega)}) - f_{hh}(k_{c,m_{hh}}^{(3\omega)}) \right] \left(\frac{r_{c,m_{hh}}^{(3\omega)}}{x_\omega} \right)^5 \times \\ \times \left(a_{c,hh,2}^{(N=3)} \mathfrak{R}_1^2 + b_{c,hh,2}^{(N=3)} \mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_2 + c_{c,hh,2}^{(N=3)} \mathfrak{R}_2^2 \right), \quad (10)$$

где k_ω - волновой вектор носителей тока, определяемый соотношением

$$E_{lh}(k) - E_{hh}(k) - 3\hbar\omega = 0, \text{ т.е. законом сохранения энергии, } r_{c,m_{hh}}^{(3\omega)} = \frac{2m_c m_{V_l}}{m_c + m_{V_l}} \frac{3\hbar\omega - E_g}{m_0 E_g},$$

$$x_\omega = \hbar\omega / E_g, \quad K_g^{(3)}(0) = \pi m_0 \left(\frac{2\pi e^2}{n_\omega c \hbar} \right)^3 k_g^5 E_g^{-9} P_c^2 B^4, \quad x_l = E_l(k_\omega) / E_g, \quad l = lh, hh, SO,$$

$$\mathfrak{R}_1 = \frac{2\left(\frac{A}{B}-1\right)^2}{(\hbar\omega)^2} - \frac{2\left(\frac{A}{B}-1\right)}{(E_{lh}-E_{hh}-2\hbar\omega)(\hbar\omega)} + \frac{\left(\frac{A}{B}+1\right)}{(E_{lh}-E_{hh}-2\hbar\omega)(E_{lh}-E_{hh}-\hbar\omega)},$$

$$\mathfrak{R}_2 = -\frac{3}{2\hbar\omega(E_{lh}-E_{hh}-\hbar\omega)}, \quad a_{c,hh,1}^{(N=3)} = \frac{90}{135}, \quad b_{c,hh,1}^{(N=3)} = \frac{180}{135}, \quad c_{c,hh,1}^{(N=3)} = \frac{488}{135}, \quad a_{c,hh,2}^{(N=3)} = \frac{1}{15},$$

$$b_{c,hh,2}^{(N=3)} = c_{c,hh,2}^{(N=3)} = \frac{4}{27} \quad \text{для линейно поляризованного света,} \quad a_{c,hh,1}^{(N=3)} = \frac{70}{105},$$

$$b_{c,hh,1}^{(N=3)} = \frac{133}{105}, \quad c_{c,hh,1}^{(N=3)} = \frac{396}{105}, \quad a_{c,hh,2}^{(N=3)} = \frac{8}{105}, \quad b_{c,hh,2}^{(N=3)} = \frac{13}{105}, \quad c_{c,hh,2}^{(N=3)} = \frac{18}{105} \quad \text{для циркулярно}$$

поляризованного света.

Спектральная зависимость коэффициента трехфотонного поглощения света $(K_{c,hh,2}^{(N=3)} / K_g^{(3)}(0))$, происходящего за счет оптических переходов, отмеченных выше, показана на рисунке 4. Видно, что с ростом частоты спектральная зависимость $K_{c,hh,2}^{(N=3)} / K_g^{(3)}(0)$ сначала увеличивается и достигает максимума, затем уменьшается. Такой характер спектральной зависимости объясняется тем фактом, что величина $K_{c,hh,2}^{(N=3)} / K_g^{(3)}(0)$ описывается произведением двух величин, которые имеют две различные зависимости от частоты. Одна из них – плотность состояния носителей тока, которая увеличивается с ростом энергии носителей тока (частоты), а модуль квадрата матричного элемента уменьшается с ростом частоты (поскольку энергетические знаменатели прямо пропорциональны частоте, находятся в знаменателе дроби).

Следует отметить, что для вышеупомянутых оптических переходов во первых положение максимума спектральной зависимости практически не зависит от состояния (степени) поляризации света; во-вторых, с ростом ширины запрещенной зоны кристалла максимум смещается в область больших частот и коэффициент поглощения света увеличивается количественно. Например, ширина запрещенной зоны кристалла *GaAs* примерно в 5 раз больше, чем у кристалла *InSb*, а коэффициент поглощения света (в зависимости от области рассматриваемых частот) в 40-50 раз меньше. Аналогичный анализ можно провести в отношении остальных оптических переходов.

Таким образом, спектральная зависимость коэффициента трехфотонного поглощения света по своей природе зависит от типа рассматриваемых оптических переходов. Следует отметить, что матричные элементы следующих оптических переходов $|V, -3/2\rangle \xrightarrow[\text{оптический переход}]{\text{трих фотонные}} |c, +1/2\rangle$ и $|V, +3/2\rangle \xrightarrow[\text{оптический переход}]{\text{трих фотонные}} |c, -1/2\rangle$ могут отличаться друг от друга либо мнимым числом, либо со знаком, но поскольку вероятность оптических переходов (или коэффициент поглощения света) определяется квадратом модуля матричных элементов, то доли каждого из вышеуказанных оптических переходов в оптические величины будут одинаковыми.

В третьей главе «Трехфотонные оптические переходы от подзоны легких дырок в зону проводимости в кристалле со сложной зоной» рассчитаны спектральные зависимости коэффициентов трехфотонного поглощения поляризованного света и линейно-циркулярного дихроизма в приближении Кейна в кристаллах со сложной зоной с учетом оптических переходов из подзоны легких дырок валентной зоны в зону проводимости. В §. 3.1 проведен теоретический анализ матричных элементов трехфотонных оптических переходов и спектральных зависимостей трехфотонного линейно-циркулярного дихроизма при участии легких дырок в кристаллах в трехзонном приближении Кейна. В §.3.2 рассчитаны спектральные

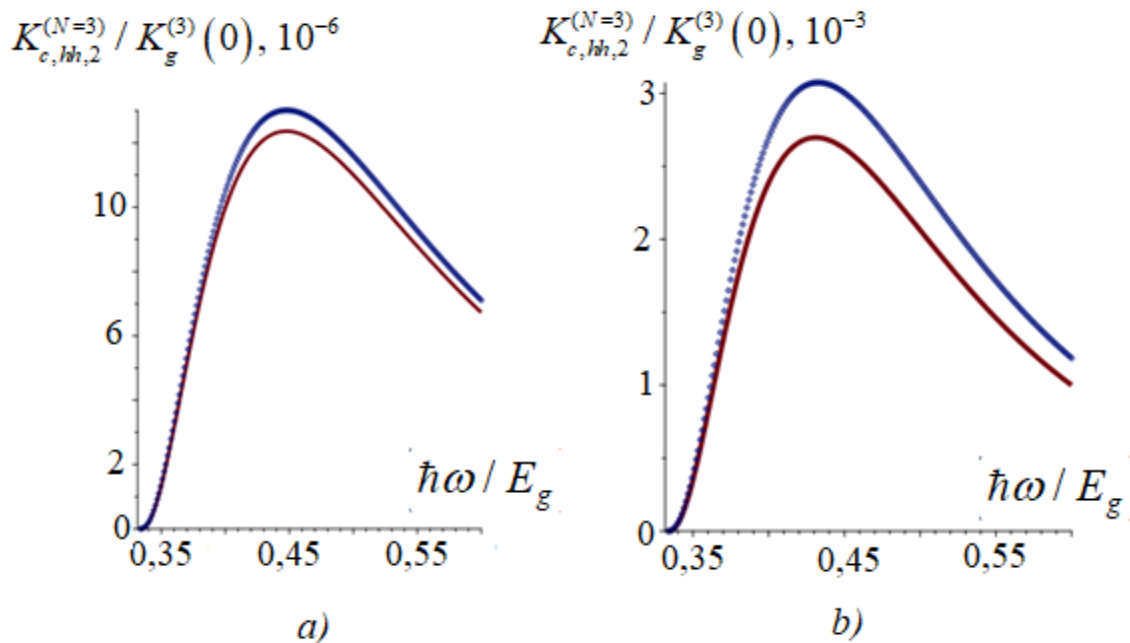


Рис.4. Спектральная зависимость коэффициента трехфотонного поглощения света $K_{c, hh, 2}^{(N=3)} / K_g^{(3)}(0)$ для двух кристаллов: *a)* для *InSb*; *b)* для *GaAs*.

зависимости коэффициента межзонного трехфотонного поглощения в кристаллах со сложной зоной в модели Кейна.

Волновой вектор в конечном состоянии электронов, участвующих в оптических переходах из зоны проводимости кристалла в валентную зону,

определяется выражением $k_{c,L}^{(3\omega)} = \sqrt{\frac{2\mu_+^{(c,L)}}{\hbar^2}(3\hbar\omega - E_g)}$, где m_c - эффективная масса электронов в зоне проводимости, m_L - эффективная масса дырок в подзоне L валентной зоны, $\mu_+^{(c,L)} = \frac{m_c m_L}{m_c + m_L}$ - приведенная эффективная масса электронов и дырок. Из последнего соотношения уместны следующие соображения для энергий легких и тяжелых дырок: а) если оптический переход происходит из подзоны тяжелых дырок, то $E_{hh}(k_{c,hh}^{(3\omega)}) = \frac{m_c}{m_c + m_{hh}}(3\hbar\omega - E_g)$, $E_{lh}(k_{c,hh}^{(3\omega)}) = \frac{m_c \cdot m_{hh}}{m_{lh}(m_c + m_{hh})}(3\hbar\omega - E_g)$; б) если оптический переход происходит из подзоны легких дырок, то $E_{hh}(k_{c,lh}^{(3\omega)}) = \frac{m_c \cdot m_{lh}}{m_{hh}(m_c + m_{lh})}(3\hbar\omega - E_g)$, $E_{lh}(k_{c,lh}^{(3\omega)}) = \frac{m_c}{m_c + m_{lh}}(3\hbar\omega - E_g)$. В результате определяются энергии, находящиеся в знаменателе составного матричного элемента в зависимости от частоты света и зонных параметров кристалла.

Предположим, что начальные состояния носителей тока расположены в подзоне легких дырок, а виртуальные состояния расположены в подзоне тяжелых и легких дырок валентной зоны. Для этого случая спектральные зависимости парциального коэффициента трехфотонного поглощения для оптических переходов $|V, -3/2\rangle \Rightarrow |m\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$ и $|V, -1/2\rangle \rightarrow |V, m\rangle \rightarrow |c, m'\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$, рассчитанные в приближении Кейна, показаны на рисунках 5 и 6 ниже.

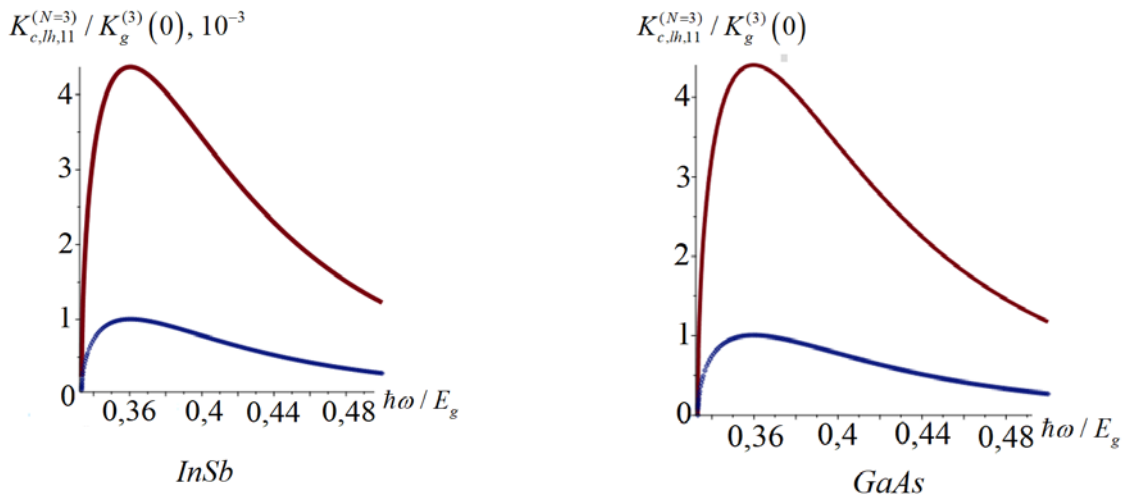


Рис.5. Спектральная зависимость величины $K_{c,lh}^{(N=3)} / K_g^{(3)}(0)$ для двух кристаллов в случае а), приведенная в тексте.

Из рисунка видно, что по мере увеличения частоты она сначала увеличивается, достигает максимума, а затем уменьшается. Физический анализ таких спектральных зависимостей производится так, как указано выше.

В четвертой главе «Межзонное многофотонное поглощение поляризованного света в кристаллах со сложной зоной. Сравнение теоретических и экспериментальных результатов» расчеты спектральной зависимости многофотонного поглощения света и линейно-циркулярного дихроизма в кристаллах со сложной зоной проведены на основе $\vec{k} \cdot \vec{p}$ -метода расчета, т.е. с учетом зонной структуры кристалла - модели Кейна, где эффективный гамильтониан представлен в виде матрицы с размерностью 8×8 . На рис. 7 сопоставлены теоретические и экспериментальные результаты для спектральной зависимости $K^{(N=3)}(3\hbar\omega / E_g)$, а на рис. 8 сопоставлены $W_{lin}^{(3)}(\omega)$ ($W_{circ}^{(3)}(\omega)$) для *GaAs* и *ZnS*. Из них видно, что с ростом частоты коэффициент многофотонного поглощения света сначала растет, затем достигая до максимума уменьшается. Это объясняется спецификой модели Кейна, используемой в узкозонных кристаллах. В частности, в модели Кейна некоторые недиагональные матричные элементы оператора импульса не зависят от волнового вектора носителей тока, чего не происходит в приближении Латтинжера-Кона. А также в модели Кейна появляется непараболическое слагаемое в энергетическом спектре. Учет последних

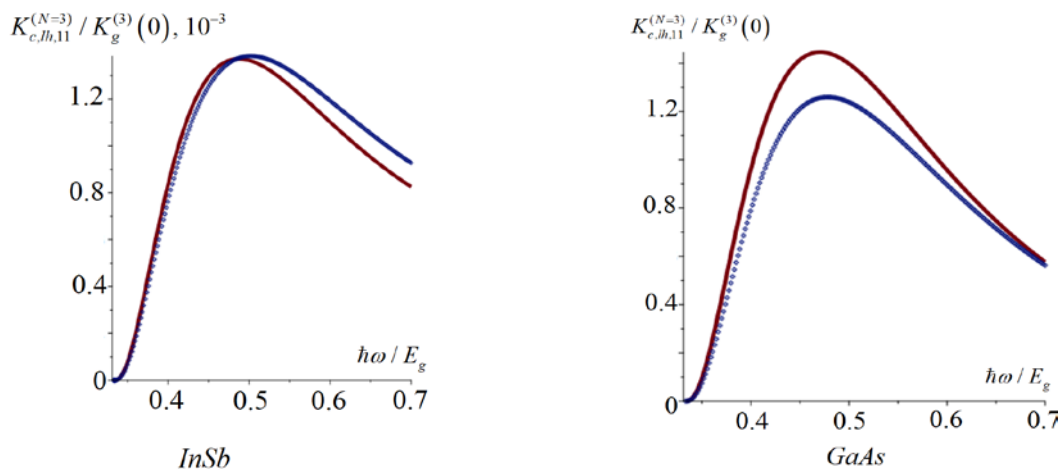


Рис.6. Спектральная зависимость величины $K_{c, lh, 11}^{(N=3)}(\omega)$ для двух кристаллов и для случая *a2*), приведенного в тексте.

приводит к тому, что такой теоретический анализ согласуется с экспериментальными результатами: теория очень хорошо описывает экспериментальные результаты, особенно для *ZnS*.

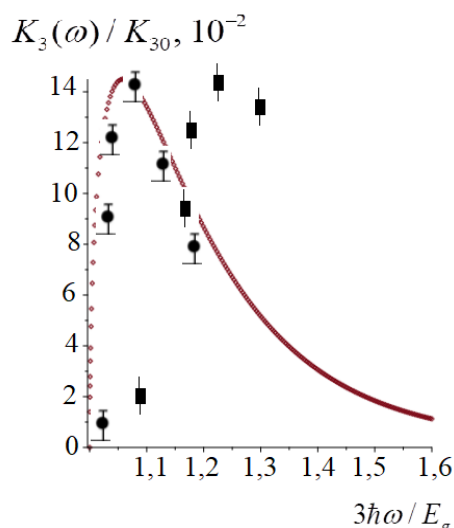


Рис. 7. Сравнение теоретических и экспериментальных результатов по спектральной зависимости коэффициента трехфотонного межзонного поглощения света. Теория- ромбическая линия, прямоугольники для *GaAs* [Jun He et al., *Optics Express*. 2005] и кружки для *ZnS* [Matthew Reicherta, et al., *Proc. SPIE*. -2016] экспериментальные результаты.

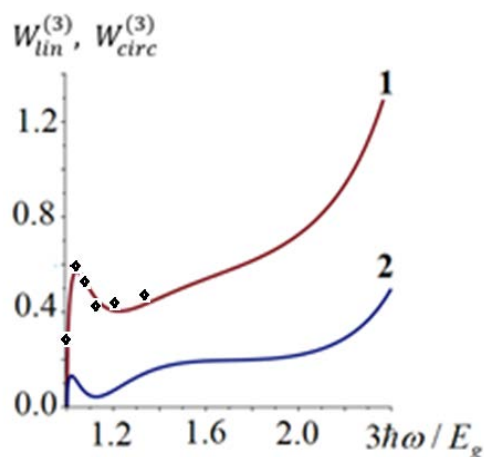


Рис. 8. Спектральная зависимость вероятностей трехфотонных оптических переходов в кристалле *InSb*: 1- для линейной, 2-для циркулярной поляризации (теория), ромбы- экспериментальные результаты, полученные в [Claudiu M. et al., *Optics letter*. - 2008.].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам диссертации доктора философии (PhD) «Спектральное исследование межзонного многофотонного поглощения света в кристаллах со сложной зоной» сделаны следующие выводы:

1. Рассчитаны спектральные зависимости коэффициентов межзонного трехфотонного поглощения и линейно-циркулярного дихроизма, связанного с оптическими переходами между зоной проводимости и подзонами легких и тяжелых дырок валентной зоны кристалла в приближении модели Кейна.
2. Классифицированы межзонные оптические переходы с учетом того, что промежуточные состояния носителей тока расположены не только в подзоне легких дырок, но и в подзонах тяжелых дырок и спин-орбитального расщепления, а также в зоне проводимости.
3. Определено, что для оптических переходов типа $|V, +1/2\rangle \Rightarrow |V, m\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$ основной вклад в спектральную зависимость коэффициента трехфотонного поглощения дают оптические переходы,

происходящие с одновременным поглощением двух фотонов в подзонах валентной зоны полупроводниковых кристаллов.

4. Рассчитано, что при оптических переходах типа $|V, +1/2\rangle \rightarrow |V, m\rangle \rightarrow |c, m'\rangle \rightarrow |c, -1/2\rangle$ величина $K_{c, lh, 11}^{(N=3)}(\omega)$ для циркулярно поляризованного света количественно больше, чем для линейно поляризованного света. Этот случай наблюдается только при переходах от подзоны легких дырок в зону проводимости.
5. Сопоставлены теоретические и экспериментальные результаты по зависимости $K^{(N=3)}(3\hbar\omega / E_g)$ для *GaAs* и *ZnS*. При теоретических расчетах межзонных переходов учтены оптические переходы, происходящие с участием трех изолированных фотонов.
6. При многофотонном поглощении света с ростом частоты коэффициент многофотонного поглощения сначала увеличивается и достигает максимума, а затем уменьшается. Такая спектральная зависимость объясняется спецификой модели Кейна, используемой в узкозонных кристаллах.
7. Теоретическая спектральная зависимость коэффициента трехфотонного линейно-циркулярного дихроизма объясняет экспериментальные результаты, выполненные для *ZnS*, с погрешностью не более 15%, где при количественных расчетах учтена непараболичность в энергетическом спектре носителей тока.
8. Выявлено, что резонансное явление в спектральной зависимости вероятности трехфотонного оптического перехода в определенном значении частоты наблюдается тогда, когда разность энергий начального и промежуточного состояний в знаменателе любого из компонентов составного матричного элемента обращается в ноль.
9. Определено, что для погашения резонанса в спектральных зависимостях необходимо учитывать, в отличие от трехзонной модели Кейна, взаимодействие зоны проводимости и валентной зоны с зонами, удаленными от них, то есть четырех, шести, восьми и т. д. зонных приближения.

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

FERGHANA STATE UNIVERSITY

MUMINOV ISLOM ARABBOYEVICH

**SPECTRAL RESEARCH OF INTERBAND MULTIPHOTON
ABSORPTION OF LIGHT IN CRYSTALS WITH A COMPLEX ZONE**

01.04.07 – Condensed matter physics

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

Ferghana – 2021

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. B2021.2.PhD/FM609

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at the Ferghana state university.

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 Rustam Yavkochevich Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor.
Official opponents:	Ayukxanov Rashid Akhmedovich Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor. Sultonov Nomonjon Akramovich Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor.
Leading organization:	Karakalpak State University

The defense of the dissertation will take place at the meeting of the Scientific Council for the award of the scientific degree of Doctor of Philosophy PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 of the Ferghana Polytechnic Institute in 2021 at "___" _____ hours _____. Address: 150107, Uzbekistan, Ferghana, 86 Ferghana Str., Tel: (+99873) 241-13-03, (99873) 241-12-06; e-mail: uzferfizika@mail.ru.

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

The abstract of the dissertation was distributed on «___» _____ 2021
(Registry record No. _____ dated «___» _____ 2021)

N.Kh.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.

S.F.Ergashev

Vice Chairman of Scientific seminar at Scientific Council on award of PhD scientific degree, doctor of technical sciences, professor.

INTRODUCTION (annotation of PhD dissertation)

Topicality and relevance of the theme of the dissertation. Research in the field of nonlinear optics and photovoltaics today requires both theoretical and experimental studies of multiphoton absorption of light by crystals and gases, depending on the properties of the medium, such as the band gap, refractive index and frequency of light. This led to the creation of crystalline infrared detectors, nonlinear with respect to the wavelength or light intensity of optical devices, lasers and other quantum generators based on the interaction of light with the spin of current carriers. In particular, one of a number of priority directions in the field of quantum electronics is inextricably linked with scientific research in the field of nonlinear light intensity and multiphoton optics occurring in crystals.

At present, the process of nonlinear absorption of light in condensed (crystalline) bodies is widely used in practice, in particular in the field of optical converters, limiters and probing. Investigation of the mechanisms of absorption of polarized light in crystals with a complex zone makes it possible to expand the working spectral range of such photodetectors based on bulk or dimensionally quantized crystals. The creation of lasers and masers has opened up new aspects of interactions associated with multiphoton absorption of light polarized in crystals. In addition, non-linear optical phenomena can cause failure of solid-state optical devices such as telecommunications systems. In this context, the research of multiphoton phenomena is relevant both from a physical and a technological point of view, and such optical phenomena serve as the basis for the research work selected in the dissertation.

During the years of independence of the Republic of Uzbekistan in priority areas of science, including “Development of renewable energy sources”, significant results have been obtained in the research of photon-kinetic phenomena occurring in bulk crystals, depending on the degree of polarization of light.

According to the Action Strategy for the further development of the republic, special attention is paid to solving problems associated with the use of effective mechanisms for the implementation of scientific and innovative achievements in practice.

This dissertation research follows the responsible implementation of the tasks provided for in a number of decrees and resolutions of the President of the country, including Presidential Decree No. UP-4947 “On measures for further implementation of the Action Strategy for the Development of the Republic of Uzbekistan in 2017-2021” dated February 7, 2017, in the Resolutions of the President No. PP-1442 On the priority directions of development of the industry of the Republic of Uzbekistan for 2011-2015. of December 15, 2010 and No. PP-2789 “On measures to further improve the activities of the Academy of Sciences, organization, management and financing of research activities” dated February 17, 2017, as well as No. UP-3899 “On measures to improve the efficiency of the integration system scientific and innovative activities” dated August 6, 2018 and No. PP-5032 “On measures to improve the quality of education and scientific research

in the field of physics” dated March 19, 2021, as well as in other regulatory documents adopted in this area and set forth in the relevant legislative acts serves to fulfill the tasks set in the regulations of scientific research.

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. Investigations of multiphoton optical and photoelectric phenomena in bulk crystals are carried out in research centers and universities in leading countries of the world. In particular, as a result of theoretical and experimental researches on nonlinear optical phenomena in condensed media by C. Townes, P. Franken, A. Forrester, R. Gudmundsen, P. Johnson (USA), W.Z. Shen (China), M. Hyruoka, K. Stato (Japan) and L.V. Keldysh, N.G. Basov, A.M. Prokhorova, E.L. Ivchenko, R.V. Khokhlova, L.E. Goluba, S.A. Akhmanova, E.Yu. Perlina (Russia) created and improved quantum generators. These types of optical phenomena were experimentally performed by Jun Hye, Ingi Ku, Heping Lee (Japan) in ZnO and ZnS, Srini Krishnamurti, Zhi Gang Yu (Singapore) in GaAs, InP, GaInAs and InAsP, S.D. Ganichev (Regensburg, Germany), I.D. Yaroshetskiy, E.B. Beregulin (St. Petersburg, Russia) were observed in semiconductors of cubic symmetry.

The mechanisms of optical phenomena associated with the state of polarization of light and the spins of current carriers in three and low-dimensional crystals were theoretically investigated by Corresponding Members of the RAS E.L. Ivchenko, M.M. Glazov, professors G.E. Pikus, N.S. Averkiev, L.E. Golub, S.A. Tarasenko (Saint Petersburg, Russia) and N.N. Gerasimenko, Yu.N. Parkhomenko (Moscow, Russia). Uzbek scientists E.Z. Imamov, R.Ya. Rasulov and their students theoretically researched a number of mechanisms of photon-kinetic phenomena in crystals and their low-dimensional systems.

However, from the quantum - mechanical point of view, the following have not been theoretically investigated: a) optical transitions of multiphoton absorption of light in crystals in the Kane model depending on the band parameters of the Hamiltonian of current carriers, as well as on the degree of polarization and intensity of electromagnetic radiation; b) interband multiphoton absorption and its linear-circular dichroism in the region of arbitrary values of the wave vector of current carriers in the Kane model; c) optical phenomena occurring in crystals with a complex band and caused by interband transitions with the participation of (right-handed) or (left-handed) polarized photons. For this reason, careful research is required in the above areas, to the theoretical research of which this dissertation is devoted.

The connection of the topic of dissertation research with plans for research work of the research institution where the dissertation was completed. The dissertation research was carried out within the framework of fundamental research of the grant OT-F2 (Physics and Astronomy) of Ferghana State University on the

topic “Polarized optical effects on crystals and in their size-quantized wells” (2007-2011), grant OT-F2-66 of Ferghana State University on the topic “Theoretical research of photonic-kinetic phenomena in semiconductors and in their nanostructures” (2017-2020).

The aim of the research is to research the mechanisms of interband multiphoton absorption of polarized light and linear-circular dichroism in crystals by a complex band in the two- and three-band Kane model.

The tasks of the research using the multi-zone Kane model:

revealing the mechanism of interband multiphoton absorption, characterized by the transition of current carriers from the subband of heavy and light holes to the conduction band in crystals of cubic symmetry;

classification of three-photon interband optical transitions in bulk crystals differing in initial and virtual states, as well as recommendation of a physical model for calculating the corresponding composite matrix elements;

on the basis of the proposed model, determine the frequency ratios of the partial and resulting coefficients of three-photon absorption of light for each type of optical transitions;

calculation of the spectral dependence of the interband linear-circular dichroism of three-photon absorption of light in crystals with a complex band depending on the initial and intermediate states of current carriers.

The objects of research work are crystals of cubic and tetrahedral symmetry, as well as narrow-gap crystals with a complex band.

The subjects of research is the interband three-photon absorption of polarized light and its linear circular dichroism, occurring in crystals with the multiband Kane approximation.

Research methods. The theoretical calculations used the methods of the golden rule of quantum mechanics and perturbation theory, quantum field theory used in crystal physics, Feynman's graphic technique and Dirac functions.

The scientific novelty of the research is as follows. With Kane's multi-zone approach:

the theory of three-photon interband linear-circular dichroism in crystals of cubic symmetry was developed for the first time, taking into account the simultaneous absorption of two photons in the subbands of the valence band;

for the first time the spectral dependences of the partial coefficients of interband three-photon absorption of light were calculated and a quantitative comparison was carried out for narrow- and wide-gap crystals;

it was determined that in crystals of cubic symmetry, regardless of the initial and virtual states of interband optical transitions, with an increase in the photon energy, the absorption coefficient of three or more photons increases and is reached to a maximum, and then decreases;

for the first time it was revealed that in a certain frequency range in the spectral dependence of the interband three-photon linear-circular dichroism anomalous growth occurs and it disappears when nonparabolicity in the energy spectrum of current carriers is taken into account;

theoretical calculations of the spectral dependence of the interband three-photon linear-circular dichroism and the absorption coefficient explained the experimental results obtained in ZnS and InSb crystals, with an error of less than 10%.

The practical results of the research are as follows:

the theoretical and experimental results on the spectral dependence of the coefficient of interband three-photon absorption and linear-circular dichroism in crystals of cubic symmetry are compared;

the properties of low-inertia photo- and optoelectronic devices and optical systems for recording information are optimized, as well as their storage in the memory of the results used, obtained in the research of interband three-photon absorption of light and linear-circular dichroism;

applied theoretical and computational methods used for interband multiphoton optical transitions in the theoretical research of nonlinear optical phenomena not only in bulk, but also in low-dimensional crystals, where the energy spectrum of current carriers is calculated in the Kane model;

methods are developed for calculating multiphoton and nonlinear in intensity photon-kinetic phenomena occurring in crystals of cubic symmetry in the multiband Kane approximation.

The reliability of the research results obtained is substantiated by the coincidence of theoretical and experimental results, creative use of the methods of solid state theory, quantum statistical physics and quantum field theory, the reliability of the computer software for quantitative calculations, the use of the method, the method of perturbation theory and diagrammatic technique, as well as the correct choice object of research.

Scientific and practical significance of the research results is reflected in obtaining new data on the classification of three-photon optical transitions depending on the initial and virtual states of charge carriers in crystals, as well as on the spectral dependence of the coefficients of interband three-photon absorption and linear-circular dichroism calculated in the Kane model.

The practical significance of the work was revealed in the use of multiphoton and nonlinear absorption of polarized light in low-inertia optical and photoelectric devices used in the field of recording electromagnetic waves and in increasing the working spectral range of optical recording and data storage.

Implementation of the research results. According to the results of researching optical phenomena associated with interband three-photon transitions in crystals, the band structure of which is described by the multiband Kane model:

calculations of the spectral dependences of the coefficient of interband three-photon absorption of light in crystals with a complex band, obtained according to the Kane model, were used to explain the results of studies in the field of optical phenomena occurring depending on surface states in the project F2-21 “Mathematical modeling of determining the density of surface states at the boundary semiconductor – dielectric” (Certificate of the Namangan Civil Engineering Institute No. 06 / 10-09 / 651 dated June 23, 2021). The use of scientific results makes it

possible to expand the range of operating frequencies of optical converters made of crystals with a complex zone;

the results of theoretical calculations on multiphoton and nonlinear in intensity absorption of polarized radiation in crystals with a complex band were used to research excitonic, polaron, bipolaron, as well as kinetic phenomena in hetero- and nanostructures in the fundamental project F2-OT-O-15494 “Increasing the efficiency of emitters, photocells and other optoelectronic devices based on studies of excitons, polarons, bipolarons and kinetic phenomena in hetero- and nanostructures with quantum dots” for 2012-2016 (Certificate of Namangan State University No. 277-04 dated June 23, 2021, Certificate of the Ministry of Higher and Secondary special education of the Republic of Uzbekistan November 4, 2020 89-03-4404). The use of scientific results allows one to continue research in the field of modeling low-inertia optical devices, as well as to expand their effective operating frequencies;

the results of a spectral study of three-photon linear-circular dichroism and absorption coefficient in crystals with a complex band were used to study the low-inertia properties of semiconductor photodiodes in the AYP (F) -20/518 project “The Mid Infrared LET and Photodiode pair for Gas Sensors” for 2016-2018 (Reference from Uludag University (Turkey), No. 2021/20/518). The use of scientific results has made it possible to increase the speed of semiconductor photoconverters.

Approbation of the results of the research. The research results were reported and discussed at 6 international scientific and practical conferences.

The publication of the results of the research. On the topic of the dissertation, 14 scientific works were published, including 6 scientific articles in publications recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of the main scientific results of dissertations, 5 of them in foreign scientific journals and 1 monograph.

The structure and volume of the dissertation. The thesis consists of an introduction, 4 chapters, a conclusion, a bibliography of 89 titles, 34 figures, 2 tables. The volume of the thesis is 119 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Мўминов И.А. Тор зонали кристалларда икки фотонли ютилиш // Монография, Фарғона -2021. -188 б. Poligraf Super Servis. МСНЖ. UDK:539.122 КБК: 22.37. R 25.
2. Rasulov V.R., Rasulov R.Ya., Axmedov B.B., Muminov I.A., Nematov H. Two-photon linear-circular dichroism in narrow-zone semiconductors // European Sciences Review. – Vienna, 2020. No. 7 - 8. – Pp. 54-59. (Global impact factor =1.44. 05.00 00, №3).
3. Rasulov V.R., Rasulov R.Ya., Kasimov F., Muminov I.A., Qo'chqorov M.X. Theoretical analysis of multiphoton interband absorption of polarized light in crystals with a complex zone (part 1) // European Sciences Review. – Vienna, 2021. -No. 3 - 4. – Pp. 48 - 51. (Global impact factor =1.44. 05.00 00, №3).
4. Rasulov V.R., Rasulov R.Ya., Muminov I.A., Eshboltayev I., Qo'chqorov M.X. Linear-circular dichroism of interband three-photon absorption in crystals (part 1) // European Sciences Review. – Vienna, 2021. No. 5 - 6. – Pp. 42 - 46. (Global impact factor =1.44. 05.00 00, №3).
5. Rasulov R.Ya., Rasulov V.R., Muminov I.A., Qo'chqorov M.X., Kodirov N.U. Interband three-photon absorption in crystals in the three-band Kane model (part 2) // European Sciences Review. – Vienna, 2021. No. 5 - 6. – Pp. 47 - 50. (Global impact factor =1.44. 05.00 00, №3).
6. Rasulov V.R., Rasulov R.Ya., Muminov I.A., Qo'chqorov M.X., Kodirov N.U. Theoretical analysis of multiphoton interband absorption of polarized light in crystals with a complex zone (part 2) // European Sciences Review. – Vienna, 2021. -No. 3 - 4. – Pp. 52 - 56. (Global impact factor =1.44. 05.00 00, №3).
7. Rasulov R.Ya., Rasulov V.R., Akhmedov B.B., Muminov I.A. Interband one- and two-photon absorption of polarized light in narrow-gap crystals // Scientific-technical journal (STJ) FerPI. – Ferghana, 2021. – Vol. 4. – Iss. 1. – Pp. 28 - 39. (05.00.00, №20).

II бўлим (II часть; II part)

1. Rasulov R.Ya., Rasulov V.R., Mamatova M.A., Muminov I.A. About the photon mechanism of linear photovoltaic effect in p-GaAs// European Applied Sciences: Stuttgart, Germany, 2014. – Iss.10. – Pp. 80-85.
2. Расулов В.Р., Муминов И.А., Ташходжаев Т.Т., Салимов Х.И. Междузонный двухфотонный линейно-циркулярный дихроизм в модели Кейна // Сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума. – Москва, 2021. – С. 167-173.
3. Расулов Р.Я., Расулов В.Р., Муминов И.А., Эшболтаев И.М., Насиров М. Линейно циркулярный дихроизм поглощения света в пьезоэлектрических

- полупроводниках. Учет эффекта когерентного насыщения // American Scientific Journal. 2016. -Vol.7. –№ 7. – Pp. 44 – 47.
4. Muminov I.A., Qo'chqorov M.X. The multiphoton interband absorption of light in crystals with a complex zone // Theoretical approaches of fundamental sciences. theory, practice and prospects. Abstracts of XI International Scientific and Practical Conference. – Geneva, Switzerland, 2021. – Pp. 190 - 194.
 5. Расулов Р.Я., Муминов И.А., Ташходжаев Т.Т., Салимов Х.И. Междузонный двухфотонный линейно-циркулярный дихроизм в модели Кейна // Сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума Наука и инновации – современные концепции. – Москва, 2021. – С. 167 - 173.
 6. Расулов Р.Я., Муминов И.А., Эшболтаев И.М., Кучкаров М.Х., Султонов Р.Р. Трехфотонное межзонное поглощение в кристаллах в трехзонном приближении // Тенденции развития физики конденсированных сред: Тезисы докладов Международной научной конференции. – Фергана, 2021. –С. 66 - 69.
 7. Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Эшболтаев И.М., Муминов И.А., Кучкаров М.Х. Междузонное трехфотонное поглощение в InSb// Сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума Наука и инновации – современные концепции. – Москва, 2021. – С. 143 - 148.

Илмий раҳбар

Р.Я.Расулов

Талабгор

И.А.Муминов

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари
Фарғона политехника институти муассислигидаги “**Scientific technical
journal**” журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди.
(11.10.2021 й.)

Босишга рухсат этилди: 2021 й. Нашриёт босма табағи–3,5.
рақамли босма усули. Times гарнитураси.
Шартли босма табағи–1,75. Бичими 64x108 1/16. Адади 100.

“Poligraf Super Servis” МЧЖ
150100. Фарғона шаҳар, Авиасозлар кўчаси 2-уй