

ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.30.05.2018.FM./T.34.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ПЕДАГОГИКА УНИВЕРСИТЕТИ

МУРАТОВ ТЕМУР ТАШКАБАЕВИЧ

ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАРДА ЗАРЯД ТАШУВЧИЛАРНИНГ
КИРИШМАВИЙ СОЧИЛИШ ЭФФЕКТЛАРИ:
КИНЕТИК ПАРАМЕТРЛАРНИ ҲИСОБЛАШНИ
АСИМПТОТИК УСУЛЛАРИНИ ИШЛАБ ЧИҚИШ

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2020

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

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

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

Муратов Темур Ташкабаевич

Яримўтказгичларда заряд ташувчиларнинг киришмавий сочилиш
эфектлари: кинетик параметрларни ҳисоблашни асимптотик
усулларини ишлаб чиқиш 3

Муратов Темур Ташкабаевич

Эффекты примесного рассеяния носителей заряда в полупроводниках:
разработка асимптотических методов расчета кинетических
параметров 19

Muratov Temur Tashkabayevich

The effects of impurity scattering of charge carriers in semiconductors:
development of an asymptotic methods of calculation of the kinetic
parameters 35

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 41

ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.30.05.2018.FM./T.34.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ПЕДАГОГИКА УНИВЕРСИТЕТИ

МУРАТОВ ТЕМУР ТАШКАБАЕВИЧ

ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАРДА ЗАРЯД ТАШУВЧИЛАРНИНГ
КИРИШМАВИЙ СОЧИЛИШ ЭФФЕКТЛАРИ:
КИНЕТИК ПАРАМЕТРЛАРНИ ҲИСОБЛАШНИ
АСИМПТОТИК УСУЛЛАРИНИ ИШЛАБ ЧИҚИШ

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2020

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2019.3.PhD/FM417 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Тошкент Давлат педагогика университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасига (www.fti.uz) ва «ZiyoNet» Ахборот-таълим порталига (www.ziyounet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Насриддинов Комилжон Рахматович
физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Гулямов Абдурасул Гафурович
физика-математика фанлари доктори

Абдулхаев Ойбек Абдуллазизович
физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори

Етакчи ташкилот:

Ўзбекистон Миллий университети

Диссертация ҳимояси Физика-техника институти ҳузуридаги DSc.30.05.2018.FM./Т.34.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2020 йил «___» _____ соат _____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Чингиз Айтматов кўчаси, 2Б-уй. Тел./факс: (+99871) 235-42-91, e-mail: ftikans@uzsci.net, Физика-техника институти мажлислар зали).

Диссертация билан Физика-техника институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (___ рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Чингиз Айтматов кўчаси, 2Б-уй. Физика-техника институти. Тел./факс: (+99871) 235-30-41.

Диссертация автореферати 2020 йил «___» _____ куни тарқатилди.

(2020 йил «___» _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси)

Н.Р. Авезова

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш раиси, т.ф.д., етакчи илмий ходим

А.Ғ. Комилов

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш илмий котиби, техника фанлари номзоди

А.В. Каримов

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси, физика-математика фанлари доктори, профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Бугунги кунда дунёда яримўтказгичлар физикаси ва техникаси ривожда саёз киришмалар билан легирланган германий, кремний ва $A^{III}B^V$ турдаги ковалент яримўтказгичлар муҳим аҳамият касб этмоқда. Саёз киришмалар сатҳлари иштирокидаги ўтишлар асосида ишлайдиган терагерц соҳада нурловчи детекторлар ва манбаларни яратиш, яримўтказгичли асбобларни ўтказувчанлик тури ва миқдорини аниқлаш, когерент фононлар акусто-оптик квант генераторини яратиш мақсадида тўғри бўлмаган зонали яримўтказгичларда икки квантли фотон-фонон ўтишларни рағбатлантириш каби долзарб амалий муаммоларни ҳал этишда заряд ташувчиларнинг киришмавий сочилиш эффектлари муҳим ўрин тутди. Бундан ташқари, жуда паст ҳароратларда (бир неча Кельвинлар атрофида), юқорида келтирилган яримўтказгичларнинг айрим физик ҳоссалари заряд ташувчиларнинг киришмавий сочилишининг хусусиятларига боғлиқдир. Шу муносабат билан, мазкур соҳада заряд ташувчиларнинг киришмавий сочилиш эффектларини назарий тадқиқ этиш долзарб масалалардан бири ҳисобланади.

Ҳозирги кунга келиб, дунёда, яримўтказгичли лазер асбобларни деградацияга учраши муаммолари билан боғлиқ равишда, тадқиқ этилаётган намуналарга радиациявий қайта ишлов бериш натижасида, уларда ҳосил бўлувчи саёз ва чуқур киришмаларнинг спектрларини ўрганишга катта эътибор қаратилмоқда. Яримўтказгичлар физикаси ва лазер физикаси кесишмасида комплекс илмий тадқиқотларни амалга оширишда, қуйидаги йўналишларда мақсадли тадқиқот ишларини ўтказиш муҳим аҳамият касб этади: ковалент яримўтказгичларнинг электрофизик ҳоссаларини сезиларли даражада белгиловчи саёз киришмаларни атомар водород томонидан сустлаштириш жараёнларини ўрганиш; яримўтказгичларда мавжуд киришмавий ҳолатларни ҳисоб-китоб қилишни янги назарий усулларини ишлаб чиқиш ва амалиётга жорий этиш; ўта паст ҳароратли қаттиқ жисмли фотоэлектроника ва лазер физикаси учун аҳамият касб этган, янги турдаги яримўтказгичли моддаларнинг ҳоссаларини башорат қилиш, шулар жумласидандир.

Республикамизда яримўтказгичларда заряд ташувчиларнинг сочилиш назариясини ривожига хусусан, заряд ташувчиларнинг киришмавий сочилиш назариясига катта эътибор берилмоқда. Жумладан, кремний ва германийдаги мавжуд чуқур ва саёз киришмаларнинг спектрини ўрганишда салмоқли натижаларга эришилди. Ўзбекистон Республикасини 2017-2021 йилларда ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида қуйидаги вазифалар белгилаб берилган «принципиал жиҳатдан янги маҳсулот ва технология турларини ўзлаштириш, шу асосида ички ва ташқи бозорларда миллий товарларнинг рақобатбардошлигини таъминлаш». Бу борада ташқи таъсирларга ўта сезгир бўлган янги яримўтказгичли моддаларни излаш ва улар асосида юқори технологик кўрсаткичларга эга бўлган яримўтказгичли тузилмалар ва асбоблар яратиш долзарб масалалардан биридир. Шу аснода, ковалент

яримўтказгичларда заряд ташувчиларнинг киришмавий сочилишини тавсифлайдиган параметрларни ҳисоб-китоб қилишни янгича назарий ёндашув ва усулларини ишлаб чиқиш жуда муҳим вазифа ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2019 йил 30 майдаги ПҚ-4348-сон «Электротехника саноатини янада ривожлантириш учун қулай шарт-шароитлар яратиш ва тармоқнинг инвестициявий ҳамда экспорт салоҳиятини ошириш бўйича кўшимча чора-тадбирлар тўғрисида»ги ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон «Фанлар академияси фаолияти, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарори, ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг II. «Энергетика, энергия ва ресурс тежамкорлиги» устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Яримўтказгичларда заряд ташувчиларнинг киришмавий сочилиш назарияси соҳаси бўйича илмий тадқиқотлар дунёнинг бир қанча илмий марказларида олиб борилмоқда. Биринчи навбатда, Россия Фанлар Академияси Микротузилмалар физикаси институтида (Нижний Новгород) яримўтказгичлардаги киришма резонанс сатҳларни назарий ўрганишга бағишланган тадқиқотларни келтириш мумкин. Мазкур тадқиқотларда квант ўрадаги киришманинг ҳар хил вазиятлари учун икки ўлчамли электрон газнинг энергетик спектри ва тўлқин функциялари аниқланган¹. Шу қаторда, А.Ф. Иоффе номидаги Физика-техника институти (Санкт-Петербург) назариётчи олимлари ва амалий тадқиқотчилар гуруҳи томонидан $A^{III}B^V$ турдаги яримўтказгичларнинг хоссаларини тадқиқ этишга бағишланган илмий-тадқиқот ишлар мажмуини ҳам келтириш лозим. Ушбу ишларда $A^{III}B^V$ турдаги яримўтказгичларда заряд ташувчиларнинг киришмавий сочилиш эффектлари ҳам назарий, ҳам амалий жиҳатдан ўрганилган². АҚШ да юпқа ковалент яримўтказгичларда заряд ташувчиларнинг киришмавий сочилиш эффектларини ўрганиш бўйича тадқиқотлар Индиана штати Нотр-Дам университетининг электротехника факультетида олиб борилмоқда³.

ЎзР ФА Физика-техника институтининг олимлари Р.А. Мўминов ва Э.З. Имамовлар томонидан наноструктурали киришмалар билан бойитилган қуёш фотоэлементларининг самарадорлигини ошириш йўллари ишлаб

¹Алешкин В.Я., Гавриленко Л.В., Одноблюдов М.А., Ясиевич И.Н. Примесные резонансные состояния в полупроводниках (Обзор) // Физика и техника полупроводников. – Санкт – Петербург, 2008. – Т. 42. – № 8. – С. 899-922.

² Михайлова М.П., Моисеев К.Д., Яковлев Ю.П. Открытие полупроводников $A^{III}B^V$: физические свойства и применение (Обзор) // Физика и техника полупроводников. – Санкт – Петербург, 2019. – Т. 53. – № 3. – С. 291- 308.

³ N. Ma, D. Jena. Charge Scattering and Mobility in Atomically Thin Semiconductors // Physical Review. – New York, 2014. – Vol. 10. – № 4. – P. 011043-1– 011043-9.

чиқишга бағишланган илк тадқиқотлар бажарилган⁴. Кремнийда лантан ва гафний киришмалари ҳосил қиладиган чуқур сатхларни ўрганиш мобайнида, муҳим тажрибавий натижалар Х.С. Далиев, Ш.Б. Утамурадова ва Э.Қ. Қаландаровлар томонидан қайд этилган (Ўзбекистон Миллий университети)⁵.

Ҳозирги вақтга қадар, заряд ташувчиларнинг киришмавий сочилиш эффектларини назарий ҳисоб-китоб қилиш билан боғлиқ бўлган бир неча хал этилмаган масалалар мавжуд. Жумладан, ханузгача, илмий адабиётларда, ўта паст ҳароратлар соҳасида заряд ташувчиларнинг киришмавий сочилишини тавсифловчи кинетик параметрларни ҳисоблашни ҳартомонлама мақбул усули мавжуд эмас.

Мазкур диссертация тадқиқот иши айнан шу масалани, яъни ярим-ўтказгичларнинг кинетик параметрларини ҳисоблашни назарий жиҳатдан ҳартомонлама мақбул усулини ишлаб чиқишга бағишланган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация иши Тошкент давлат педагогика университети илмий тадқиқотлари режасига мувофиқ бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади ўта паст ҳароратларда, яримўтказгичлар ҳажмида ва сиртида кечадиган заряд ташувчиларнинг киришмавий сочилиши ва рекомбинация жараёнларини тавсифловчи кинетик параметрларни ҳисоблашни ҳартомонлама мақбул асимптотик усулини ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

Ge, Si ва $A^{III}B^V$ турдаги яримўтказгичларда мавжуд саёз киришмаларда заряд ташувчиларнинг резонанс сочилиши жараёнларига «кучсиз» магнит майдоннинг таъсирини тадқиқ этишни ҳартомонлама мақбул асимптотик усулини ишлаб чиқиш;

ҳажмий ва икки ўлчамли бўлган Ge, Si ва $A^{III}B^V$ турдаги яримўтказгичларда циклотрон резонанс (ЦР) ютилиш эгри чизигининг ёйилиб кетишига заряд ташувчиларнинг резонанс сочилишини кўшган нисбий улушини аниқлаш;

Ge, Si ва $A^{III}B^V$ турдаги яримўтказгичларда мавжуд зарядланган киришмаларда заряд ташувчиларнинг сочилишини тавсифловчи транспорт кесимининг миқдорига локал тузатмаларни аниқлаш;

экранлашган зарядли марказларга заряд ташувчиларни поғонали илиб олиниш динамикасига, классик ва квантловчи магнит майдоннинг таъсирини тадқиқ этиш;

кучли айниган яримўтказгичли кристаллнинг сиртида электронларнинг кучли локализацияланиш эффектини тавсифлайдиган критерийсига аниқлик киритиш;

⁴ Imamov E.Z., Djalalov T.A., Muminov R.A., Rakhimov R.K. Analysis of the role of nano-object in the cheaper silicon solar cells // Computational nanotechnology. – Moscow, 2017. – № 3. – P. 14-17.

⁵ Утамурадова Ш.Б., Далиев Х.С., Каландаров Э.Қ., Далиев Ш.Х. Об особенностях поведения атомов лантана и гафния в кремнии // Письма в Журнал технической физики. – Санкт - Петербург, 2006. – Т. 32. – №. 11. – С. 11-15.

Si:B легирланган яримўтказгичда, заряд ташувчиларнинг саёз сатҳлар орқали амалга ошадиган рекомбинация жараёнига резонанс сочилиш механизмининг таъсирини тадқиқ этиш.

Тадқиқотнинг объекти бор киришмаси билан легирланган кремний, учинчи ва бешинчи гуруҳга таълуқли киришмалар билан легирланган германий, ҳамда $A^{III}B^V$ турдаги яримўтказгичлар.

Тадқиқотнинг предмети заряд ташувчиларнинг яримўтказгичларда мавжуд саёз киришмавий сатҳлар орқали амалга ошадиган рекомбинация ва сочилиш механизмларидан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Юқорида кўрсатилган масалаларни хал қилишда физик кинетика ва квант механика усулларидан, хусусан, сочилишнинг квант назарияси, Фоккер-Планк кинетик тенгламаси, релаксация вақти тақрибий усулларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

заряд ташувчиларнинг киришмавий сочилиши ва рекомбинация жараёнларини тавсифловчи кинетик параметрларни ҳисоблашни ҳартомонлама мақбул асимптотик усули ишлаб чиқилган ва унинг асосида кремнийда бор киришмаси (Si:B) ҳосил қилган саёзли 3s-сатҳ (боғланиш энергияси 5 мэВ), резонанс сатҳ эканлиги аниқланган;

ишлаб чиқилган асимптотик усул асосида «кучсиз» магнит майдонида ($H \sim 100$ Гс) киритилган яримўтказгичда ($A^{III}B^V$) электронларнинг ҳаракатчанлиги, уларнинг киришма нейтрал атомларида резонанс сочилиши шароитида ва 1 К ҳарорат атрофида, максимал қийматга эришиши кўрсатилган;

электронларнинг нейтрал атомларда резонанс сочилиши шароитида, классик циклотрон резонанс ютилиш спектрининг контурини ёйилиб кетишини ифодалайдиган асимптотик формулалар келтириб чиқарилган, ҳамда, улар асосида заряд ташувчиларнинг киришма ионларда сочилишини тавсифлайдиган транспорт кесимига тузатмалар аниқланган;

ҳарорат $T \rightarrow 0$ интилганда, кучли легирланган яримўтказгичнинг сиртида икки ўлчамли (2D) электрон газнинг сезиларли даражада тўпланиб қолиш критерийси учун ҳисоблаш ифодалари олинган, ҳамда, тўпланиб қолиш эффекти ўртача ҳисобда 60 % бажарилиши кўрсатилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

заряд ташувчиларнинг киришмавий сочилиш кинетик параметрларини ҳисоблашни ҳар хил назарий усулларини оптималлаш натижасида, ҳисоб-китоб қилишни энг қулай назарий моделини ишлаб чиқиш имкони яратилган;

ҳилма хил релаксация ва рекомбинация жараёнларни тавсифлайдиган ($< 16,7$ К) кинетик параметрларни (ёки коэффициентларни) ҳисоблашда $L(z) \approx 1/z - 2/z^2 + \dots$ асимптотик ёйилмани амалий аҳамияти очиб берилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги масалани ечишнинг асосланган ва ишонарли усулларидан фойдаланиш, назарий усул билан олинган натижаларни тажриба натижалари билан мос келиши билан таъминланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти шундаки, яримўтказгичларда заряд ташувчиларнинг киришмавий сочилиш механизмларини тавсифлашни янги назарий ёндашуви яратилганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти олинган натижалардан синтезлаш йўли билан олинган янги яримўтказгичли материалларнинг ҳоссаларини башорат қилишда, фото- ва ёруғлик диодларнинг ишлаш диапазонини оптималлашда, яримўтказгичларда рекомбинация жараёнларни рағбатлантиришда фойдаланиш мумкинлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалиётга жорий қилиниши. Яримўтказгичларда заряд ташувчиларнинг киришмавий эффектлари: кинетик параметрларни ҳисоблашни асимптотик усуллари ишлаб чиқиш асосида:

заряд ташувчиларнинг киришмавий эффектларини тавсифловчи кинетик параметрларни ҳисоблаш учун ишлаб чиқилган асимптотик усул Ф2-ОТ-О-15494 рақамли «Юқори самарали фотодетекторларни яратиш мақсадида экситонларни, поляронларни ва квант нуқтали наноўлчамли гетеротузилмаларда кўчиш ходисаларни ўрганиш» (2012-2016 йй) фундаментал лойиҳасида квант ўрадаги киришмавий ҳолатларнинг қисқа тўлқинли асимптотикасини аниқлашда қўлланилган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2019 йил 4 сентябрдаги 89-03-3312-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш ковалент яримўтказгичларнинг электр ўтказувчанлиги, иссиқлик ўтказувчанлиги, Холл коэффициенти ва термо-э.ю.к. ҳисоблаб чиқариш имконини берган;

заряд ташувчиларнинг киришма ионларда сочилишини тавсифлайдиган транспорт кесимига тузатмалар учун олинган аналитик ифодалар Пермь давлат университети назарий физика кафедрасида янги турдаги яримўтказгичли моддаларнинг ҳоссаларини олдиндан айтиб бериш бўйича олиб бориладиган тадқиқот ишларида қўлланилган (Пермь давлат миллий тадқиқот университетининг 2019 йил 10 апрелдаги 125-3/1704 -сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш янги турдаги яримўтказгичли материалларнинг кинетик ҳоссаларини башоратлаш ва оптималлаш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишининг асосий натижалари 2 та халқаро ва 2 та республика илмий-амалий конференцияларида баён этилган ва муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича 15 илмий мақола чоп этилган бўлиб, улардан 4 таси Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссияси тавсия қилган чет эллардаги халқаро журналларда ва 2 таси республика миқёсидаги журналларда.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, учта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертация 104 та матнли саҳифада баён этилган бўлиб, 12 расмни ўз ичига олган.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Диссертациянинг **кириш қисмида** ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурияти асослаб берилган. Тадқиқотларнинг республикадаги фан ва технологияларини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари билан боғлиқлиги кўрсатилган. Муаммонинг ўрганилганлик даражаси келтирилган, мақсад ва вазифалари шакллантирилган, тадқиқотнинг объектлари, предметлари ва усуллари аниқланган. Илмий янгилик баён қилинган, олинган натижаларнинг ишончлилиги асослаб берилган. Натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган. Ишнинг апробацияси, диссертациянинг ҳажми ва тузилиши ҳақида қисқача маълумотлар келтирилган.

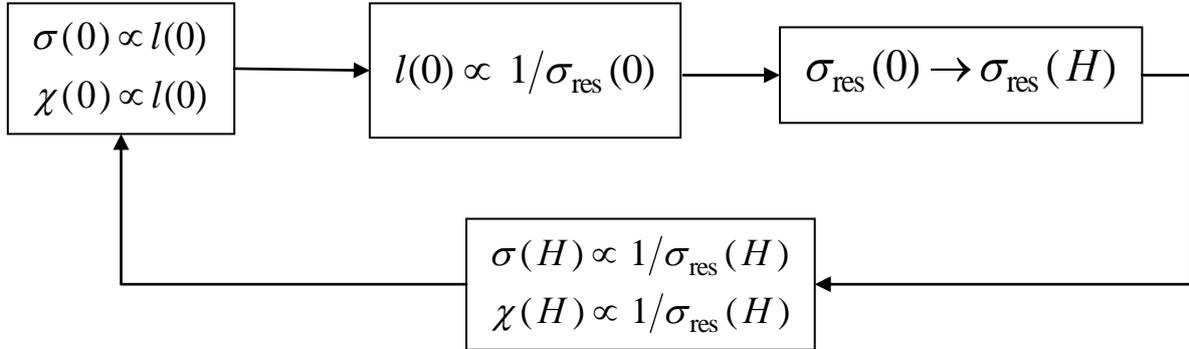
Диссертациянинг **«Яримўтказгичлар ва яримўтказгичли тузилмаларда заряд ташувчиларнинг киришмавий сочилиши бўйича назарий ва экспериментал ишларнинг ҳолати»** деб номланган биринчи бобида, яримўтказгичлар ва яримўтказгичли тузилмаларда заряд ташувчиларнинг киришмавий сочишиш механизми тадқиқ қилишга бағишланган назарий ва экспериментал ишлар тўғрисида қисқача маълумот келтирилган. Яримўтказгичларда заряд ташувчиларнинг киришмавий сочишишининг ҳар хил механизми таҳлил қилинган. Неутрал ва зарядланган киришмаларда заряд ташувчиларнинг резонанс, поғонали, кулон туридаги сочишишларини ўзига хос хусусиятлари очиб берилган. Мавжуд назарий ва экспериментал ишларни таҳлил қилиш асосида, диссертация ишининг масалалар қўйилиши шакллантирилган.

Диссертациянинг **« $D^-(A^+)$ – марказлар «магнетокесимлари» концепцияси»** деб номланган иккинчи бобида яримўтказгичларда кечадиган кинетик эффектларни тадқиқ этишнинг янгича услуби ишлаб чиқилган. Ишлаб чиқилган ёндашувнинг физик моҳияти шундан иборатки, кинетик эффектларга «кучсиз» магнит майдоннинг таъсири, хусусан, заряд ташувчиларнинг резонанс сочишиш эффектига ҳам, берилган сочувчи марказнинг эффектив кўндаланг кесимини виртуал чўзилиши сифатида қаралади. Бунда сочувчи марказнинг конкрет физик хусусияти, умуман олганда, аҳамиятсиздир. Мазкур ёндашувнинг ўзига хос хусусияти шундан иборатки, яримўтказгичларда содир бўладиган кинетик эффектларга H – майдоннинг таъсири икки босқичда инобатга олинади. Биринчи босқичда, магнит майдони бўлмаганида яримўтказгичнинг кинетик коэффициентлари ҳисобланади: электр ўтказувчанлиги, иссиқлик ўтказувчанлиги, термо-э.ю.к. Магнит майдон таъсири иккинчи босқичда, сочувчи марказнинг кўндаланг кесимини виртуал (фикран) чўзиш орқали, инобатга олинади ⁶. Шунини алоҳида таъкидлаб ўтиш

⁶ Бу етарлича эҳтимолдан йироқ эмас, чунки «кучсиз» магнит майдон маълум даражада зарядланган зарраларнинг эркин югуриш йўлини l қисқартириш эвазига, уларни сочувчиси сифатида таъсир ўтказади. Эркин югуриш йўлини эффектив кўндаланг кесим σ_{res} билан боғланишини ҳисобга олсак ($l = 1/(n_0 \sigma_{res})$), у ҳолда унинг қисқариши, эффектив кўндаланг кесимини орттиришига (чўзилишига) мутаносибдир. Бу маънода «кучсиз» магнит майдон заряд ташувчининг эркин югуриш йўлини арзимас кичрайишини билдиради, шу қўшимча чеклаш биланки, сочувчи марказнинг эквивалент равишдаги эффектив кўндаланг кесимини (радиусини) орттириши, марказнинг ўз эффектив кесимидан анча кичик бўлсин.

жоизки, аслида $D^-(A^+)$ – марказнинг эффе́ктив кесими ҳеч қандай ўзгаришга дучор бўлмайди, мазкур ёндашув, яъни $D^-(A^+)$ – марказлар «магнетокесимлари» концепцияси» методик жиҳатдан қулайдир.

Кинетик коэффи́циентларни ҳисоблаш алгоритми қуйидаги схема бўйича амалга оширилади (1-расм):



1-расм. Ҳисоблаш жараённинг блок-схемаси.

Келтирилган схемада: $\sigma(0)$ – магнит майдони бўлмаганда яримўтказгичнинг электр ўтказувчанлиги, $\chi(0)$ – магнит майдони бўлмаганда яримўтказгичнинг иссиқлик ўтказувчанлиги, $l(0)$ – магнит майдони бўлмаганда заряд ташувчиларнинг ўртача эркин югуриш йўли, $\sigma_{\text{res}}(0)$ – магнит майдони бўлмаганда резонанс сочилишнинг кесими, $\sigma_{\text{res}}(H)$ – магнит майдони мавжуд бўлганда резонанс сочилишнинг кесими; $\sigma(H)$ – «кучсиз» магнит майдонидаги яримўтказгичнинг электр ўтказувчанлиги, $\chi(H)$ – «кучсиз» магнит майдонидаги яримўтказгичнинг иссиқлик ўтказувчанлиги. Диққатга сазовор томони шундаки, бундай вазиятда Видеман-Франц қонуни талаб даражасида етарлича аниқликда бажарилади: $\chi(0)/\sigma(0) \approx \chi(H)/\sigma(H)$.

$\sigma(0)$, $\chi(0)$, $l(0)$ кинетик коэффи́циентлар учун:

$$\sigma(0) \approx \frac{8 e^2 n \varepsilon \sqrt{m^*}}{3 \sqrt{2} \pi^{3/2} \hbar^2 n_o \sqrt{k_B T}}, \quad (\mu = \sigma / en), \quad (1)$$

$$\chi(0) \approx \frac{16 n \varepsilon k_B \sqrt{k_B T} \sqrt{m^*}}{3 \sqrt{2} \pi^{3/2} n_o \hbar^2}, \quad (2)$$

$$l(0) \approx 2 m^* \varepsilon / (\pi \hbar^2 n_o), \quad (3)$$

асимптотик формулалар келтириб чиқарилган.

Бу ерда μ – заряд ташувчиларнинг ҳаракатчанлиги, e – электрон заряди, k_B – Больцман доимийси, n – электронлар концентрацияси, ε – $D^-(A^+)$ - марказнинг боғланиш энергияси (киришма атомнинг мЭВ тартибидаги резонанс энергияси), m^* – электроннинг эффе́ктив массаси, n_o – нейтрал атомларнинг концентрацияси. $\sigma_{\text{res}}(0) \rightarrow \sigma_{\text{res}}(H)$ формал ўзгартириш асосида

$$\overline{\sigma_{\text{eff}}(H)} = \overline{\sigma_{\text{res}}(0)} \cdot \left(1 + \frac{4 - \pi}{4} \frac{\overline{E_k}}{k_B T} \right) \quad (4)$$

муносабат келиб чиқади, бу ерда $\overline{\sigma_{\text{res}}}(0) = 2\pi\hbar^2/m^*\varepsilon$ – резонанс сочилишнинг ўртача кесими, $\overline{E}_k = m^*(\omega_c \bar{l}_{\text{res}})^2/2$ – циклотрон орбитасининг кичик қисмидаги заряд ташувчининг ўртача кинетик энергияси, $\omega_c = eH/m^*c$ – циклотрон частота, \bar{l}_{res} катталик (3) формула билан аниқланади.

(4) формуладан равшанки $\sigma_{\text{res}}(H) = \sigma_{\text{res}}(0) + \Delta\sigma_{\text{res}}(H)$, ($\Delta\sigma_{\text{res}}(H) \ll \sigma_{\text{res}}(H)$).

У ҳолда (1)-(4) формулалардан қуйидаги:

$$\sigma(H) = \sigma(0) \cdot \left(1 - \frac{4 - \pi}{4} \frac{\overline{E}_k}{k_B T}\right), \quad \rho(H) = \frac{1}{\sigma(H)}, \quad (5)$$

$$\chi(H) \sim n v_T \bar{l}(H) \sim \frac{v_T}{\sigma_{\text{res}}(H)} \sim \sqrt{\frac{T}{m^*}} \cdot \frac{1}{\sigma_{\text{res}}(H)} \cdot \left(1 - \frac{\overline{E}_k}{k_B T}\right), \quad (6)$$

$$\chi(H) = \chi(0) \cdot \left(1 - \frac{4 - \pi}{4} \frac{\overline{E}_k}{k_B T}\right), \quad \left(\frac{\Delta\rho}{\rho(0)}\right)_{\perp} \approx \frac{4 - \pi}{4} \frac{\overline{E}_k}{k_B T}, \quad (7)$$

муносабатлар келиб чиқади.

Мазкур (5) – (7) муносабатларни стандарт усуллар асосида ҳам олиш мумкин⁷, лекин ҳисоб-китобларнинг ҳажми кескин равишда ошиб кетади. Ишлаб чиқилган усулда эса, худди шу муносабатлар $\sigma_{\text{res}}(0) \rightarrow \sigma_{\text{res}}(H)$ алмаштириш эвазига, соддароқ йўл билан олинади. Ифодали қилиб айтганда, $D^-(A^+)$ – марказ артофи, «кучсиз» H – майдони ($H \sim 100$ Гс) таъсири туфайли гўёки «қабариб» чиқади: $\mu_{\text{max}} \sim 1/H$.

Бундан кейин, яримўтказгичларда циклотрон резонанс ходисасига $D^-(A^+)$ - марказларни таъсири кўриб чиқилган. Таҳлил шуни кўрсатдики, заряд ташувчиларнинг нейтрал атомларда резонанс сочилиши шароитида, икки ўлчамли намуналарда циклотрон резонанс, ҳажмий намуналардаги циклотрон резонансга қараганда, кучсизроқ намоён бўлар экан (2 ва 3 расмлар).

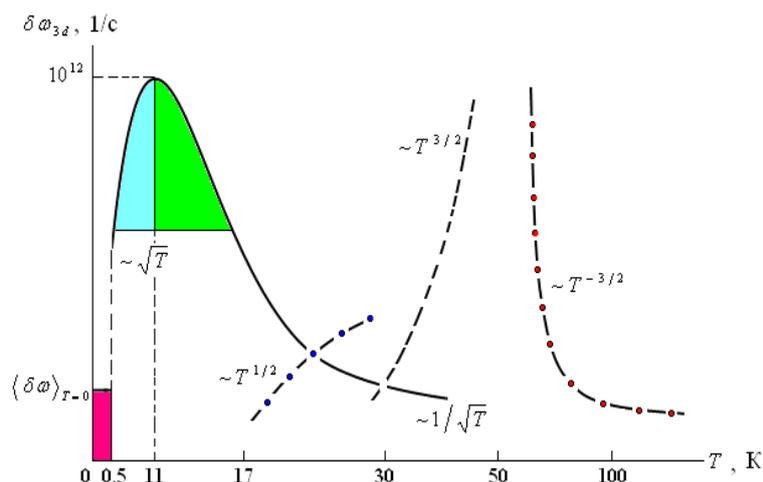
Бунинг физик сабаби шуки, икки ўлчамли ҳолда, уч ўлчамли ҳолатдан фарқли ўлароқ, характланиш суръати паст электронларнинг сочилиш кесими σ энергия камайиши билан, ортиб боради⁸. Шу сабабдан, резонанс чуқурликларга мос паст ҳароратда, икки ўлчовли электрон тизимлардаги электронларнинг $D^-(A^+)$ – ўраларда релаксация вақти τ жуда кучли қисқариши керак ($\tau \propto 1/\sigma$), ва натижада, циклотрон резонанс спектрининг ёйилиши ($\delta\omega \sim 1/\tau$) икки ўлчамли ҳолда, уч ўлчамли ҳолга қараганда, ноаниқроқ бўлади.

Ўта паст ҳароратларда (≤ 1 К), кенг тарқалган $\delta\omega \sim T^{-1/2}$ боғланишдан⁹ фарқли ўралок, $\delta\omega \sim T^{1/2}$ ўзгача асимптотик режим вужудга келиши кўрсатилган.

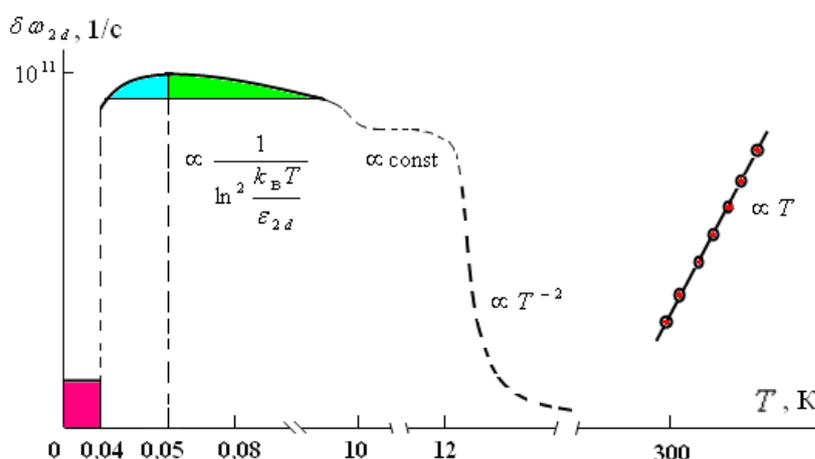
⁷ Биккин Х.М., Ляпилин И.И. Физика конденсированных сред. Неравновесная термодинамика и физическая кинетика. – Екатеринбург, 2009. – Т.1. – 500 с.

⁸ Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Квантовая механика (нерелятивистская теория). – М.: 1989. – Т.3. – 768 с.

⁹ Павлова Т.В. Магнитопримесные состояния частицы в структурах различной размерности и их роль в кинетических явлениях в полупроводниках.: Автореф. дис. канд. физ. – мат. наук. – М.: МИФИ. 2006. – 21 с.



2-расм. Ҳажмий намунада заряд ташувчиларнинг ҳар хил сочилиш механизмларида циклотрон резонанс ютилиш эгри чизиғининг ярим кенглигини ҳарорат бўйича ўзгариши.



3-расм. Икки ўлчамли намунада заряд ташувчиларнинг ҳар хил сочилиш механизмларида циклотрон резонанс ютилиш эгри чизиғининг ярим кенглигини ҳарорат бўйича ўзгариши.

Зарядланган киришмада заряд ташувчиларнинг сочилиш кесими микдорига $\delta\sigma$ локал тузатмаларни ҳисоблаш методикаси ишлаб чиқилган. Мазкур тузатмалар «иккиламчи» мультиполь хусусиятга эга бошқа зарядланган комплекслар таъсирида юзага келган. Тақдим этилган ҳисоблаш методикасини назарий пойдевори асослаган. У Конуэлл-Вайскопф моделига асосланади. Тузатмалар ҳисоблашни квант усули алоҳида кўриб чиқилган. Ушбу усул, ўта паст ҳароратлар соҳасида, классик усулни тўлдиради ва такомиллаштиради. Вариацион процедура асосида $\delta\sigma$ учун ҳисоблаш формулалари олинган:

$$\sigma_{tr} = 2\pi \int (1 - \cos \theta) \rho(\theta) \left| \frac{d\rho(\theta)}{d\theta} \right| d\theta = \pi \left(\frac{\alpha}{2E} \right)^2 \int_0^\pi (1 - \cos \theta) \frac{\cos(\theta/2)}{\sin^3(\theta/2)} d\theta =$$

$$= \left[\begin{array}{l} \pi \rightarrow \pi - \theta_{\min} \\ 0 \rightarrow \theta_{\min} \end{array} \right] \Rightarrow 2\pi \left(\frac{\alpha}{2E} \right)^2 \int_{\theta_{\min}}^{\pi - \theta_{\min}} \text{ctg} \frac{\theta}{2} d\theta, \quad (\alpha = \pm \frac{Ze^2}{\varepsilon}). \quad (8)$$

σ_{tr} катталикни $y = y_0 \operatorname{ctg}(\theta/2)$ функциясининг функционали сифатида вариациялаш натижаси, куйидаги ифодани беради:

$$\begin{aligned} \delta\sigma_{tr}[y] &= 2\pi \left(\frac{\alpha}{2E}\right)^2 \delta \int_{\theta_{\min}}^{\pi-\theta_{\min}} \operatorname{ctg}\frac{\theta}{2} d\theta = 2\pi \left(\frac{\alpha}{2E}\right)^2 \int_{\theta_{\min}}^{\pi-\theta_{\min}} \delta \operatorname{ctg}\frac{\theta}{2} d\theta = \\ &= -\pi \left(\frac{\alpha}{2E}\right)^2 \int_{\theta_{\min}}^{\pi-\theta_{\min}} \frac{\delta\theta(\theta)}{\sin^2(\theta/2)} d\theta, \end{aligned} \quad (9)$$

бу ерда $\rho = \frac{|\alpha|}{2E} \cdot \operatorname{ctg}\frac{\theta}{2}$ – нишонга олиш масофаси, $E = E_\infty$ – электроннинг чексизликдаги кинетик энергияси, θ – ион киришманинг майдонида электроннинг оғиш бурчаги (асосий кулон майдони). Бунда $\delta\sigma_{tr}$ тузатмани ҳисоблаш $\delta\theta$ аниқлашга келиб тақалади¹⁰:

$$\delta\theta(\rho) = -\frac{1}{E} \frac{\partial}{\partial\rho} \int_{r_{\min}}^{\infty} \frac{\delta U(r) dr}{\sqrt{1 - \frac{\rho^2}{r^2} - \frac{U(r)}{E}}}, \quad (10)$$

бу ерда $\delta U(r) \sim r^{-n}$ (иккиламчи майдонлар асимптотикаси), $U(r) \sim \pm r^{-1}$ – бирламчи (асосий) майдон асимптотикаси.

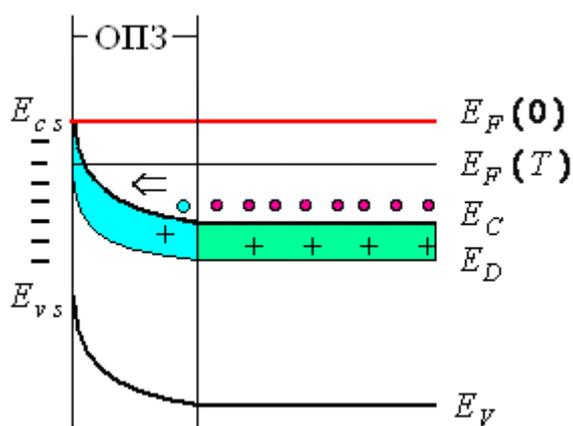
(8)-(10) формулаларни тадбиқ этиш чегараси $\delta\theta > \hbar/(\rho\bar{p})$ тенгсизлик билан белгиланади, бунда $\bar{p} = \sqrt{m^* k_B T}$ – электроннинг квазиимпульси. (8)-(10) асосида баҳолалар шуни кўрсатадики $\langle\sigma_{tr}\rangle/\langle\delta\sigma_{tr}\rangle \sim (1-10) \ln \Lambda$, бунда $\ln \Lambda$ – кулон логарифми. Барча тузатмалардан кўшилган натижавий улуш, резонанс сочилиш кесимининг микдорига тенглашиши ($\sigma_{res} \approx 10^{-12} \text{ см}^2$), эҳтимолдан йироқ эмас.

Диссертациянинг «**Яримўтказгичларда электронларнинг кучли локализацияланиш эффектлари**» деб номланган учинчи боби, айниган яримўтказгичнинг сиртида, электронларнинг кучли локализацияланиш эффектларига бағишланган. Тажрибада электрон зичликнинг кучли локализация ҳодисаси *n*-InGaN (0001) яримўтказгич сиртида кузатилган¹¹. Мазкур эффект $k \rightarrow 0$ асимптотик яқинлашишда яримўтказгичнинг сирт электрон холатлар назарияси нуқтаи назаридан, катта аҳамият касб этади. Гап шундаки, сирт зонасининг туби яқинида электронларнинг кинетик энергияси нолга тенг ($k=0$, $\hbar^2 k^2/2m^* = 0$). Кучли айниган квази-икки ўлчамли электрон газда электронларнинг ўртача кинетик энергияси деярли Ферми энергиясига

¹⁰ Коткин Г.Л., Сербо В.Г. Сборник задач по классической механике. – М.: Регулярная и хаотическая динамика, 2001. – 352 с.

¹¹ Бенеманская Г.В., Жмерик В.Н., Лапушкин М.Н., Тимошнев С.Н. Аккумуляционный нанослой – 2D-электронный канал ультратонких интерфейсов Cs/*n*-InGaN // Физика твердого тела. – Санкт-Петербург, 2009. – Т.51. – № 2. – С. 372-376.

тенг, бу деганики, $T = 0$ К да Ферми сатҳи сирт зонаси тубида маҳкамланади, зоналар тилида айтганда бу $E_F = 0$ ҳолга тенг кучлидир (4 расм).



4-расм. Сирт яқинида фазовий заряд қатлами мавжуд бўлиши, энергетик сатҳларни «юқори га» эгилишига олиб келади. $T \rightarrow 0$ интилганда Ферми сатҳи сирт зонасининг тубига бориб маҳкамланади (қизил чизиқ билан кўрсатилган).

Икки ўлчамли электрон газнинг квант ҳоссаларини назарий таҳлил қилиш чоғида, $T \rightarrow 0$ яқинлашишда электрон зичлик сиртий ўрада тўпланиши кўрсатилган, бунинг устига 100 % локализация критерийси¹², амалда ўртача ҳисобда 60 % бажарилиши кўрсатилган:

$$\frac{3}{5} \frac{k_F^2}{\pi^2 n_s} \ln^2 \left(\frac{\sqrt{3} n_o}{\xi k_F n_s} \right) \leq 1, \quad (11)$$

бу ерда k_F – Ферми сатҳидаги тўлқин вектори, n_s – нуксонларнинг сиртий концентрацияси, n_o – легирлашнинг критик даражаси, ξ – тахминан бирга яқин сонли параметр.

Электрон зичликнинг сиртдаги потенциал ўрада кучли тўпланиб қолиш шароитида, экранлашган кулон марказлари томонидан заряд ташувчиларни поғонали илиб олиниш динамикасини тавсифлайдиган усулга аниқликлар киритилди. Маълумки, асосий киришмани экранланиши туфайли, поғонали илиб олиниш кесими тахминан 10 маротаба қамаяди¹³. Савол туғилади, қандай қилиб заряд ташувчилар орасидан энг тезкорини инобатга олиш мумкин. Ахир Максвелл тақсимотиға биноан, баъзи бир заряд ташувчилар зарядланган киришмага, энг кичик масофагача яқинлашиши мумкин. Бу поғонали илиб олиниш эффектив кесимини топиш масаласини анча енгилаштиради. Энергетик тасаввурда ёзилган Фоккер-Планк тенгламаси асосида, «кучли» ва «кучсиз» классик ва квантловчи магнит майдон мавжудлигида, «майда» фонларни чиқариш эвазига амалга ошадиган поғонали илиб олиниш кесими учун асимптотик ифодалар олинган:

$$\sigma \approx \frac{4\pi}{3l_o} \left(\frac{Ze^2}{\varepsilon} \right)^3 \frac{1}{(k_B T)^3} \frac{1}{1 + \frac{Ze^2/\varepsilon r_D}{k_B T}} = \frac{\sigma_{\text{coul}}}{1 + \frac{\alpha/r_D}{k_B T}}. \quad (12)$$

¹² Бондаренко В.Б., Филимонов А.В. Критерий сильной локализации на поверхности полупроводника в приближении Томаса-Ферми // Физика и техника полупроводников. – Санкт – Петербург, 2017. – Т.51. – № 10. – С. 1372-1375.

¹³ Джакели В.Г. О захвате носителей заряда на экранированном кулоновском центре // Физика и техника полупроводников. – Санкт – Петербург, 1994. – Т.28. – № 12. – С. 2073-2075.

$$\sigma_H \approx \frac{4\pi}{3l_0} \left(\frac{Ze^2}{\varepsilon} \right)^3 \frac{1}{(k_B T)^3} \frac{\bar{E}_k}{4k_B T}, \quad (\bar{E}_k/2 \gg k_B T), \quad (13)$$

$$\sigma_H \approx \frac{4\pi}{3l_0} \left(\frac{Ze^2}{\varepsilon} \right)^3 \frac{1}{(k_B T)^3}, \quad (\bar{E}_k/2 \ll k_B T), \quad (14)$$

бу ерда l_0 – электроннинг акустик фононларда сочилишида ўзига хос эркин югуриш йўли, ε – кристаллнинг диэлектрик доимийлиги, r_D – Дебай экранлаш радиуси, Ze – саёз киришманинг зарядли ҳолати.

$T = 30$ К да (12) формула бўйича баҳолаш $\sigma_{\text{coul}} \approx (0,1 - 1) \cdot 10^{-12}$ см² қийматни беради.

Олинган (13) ва (14) формулалардан шундай ҳулосага келиш мумкинки, классик маънода «кучсиз» магнит майдон, ташувчининг поғонали илиб олиниш тезлигига деярли таъсир ўтказма олмас экан, шу билан бирга, «кучли» магнит майдон поғонали илиб олиниш суръатини ўзини ўзгартириб юборади. Бу эса ўз навбатида, ташувчиларнинг илиб олиниш динамикасини мақсадли бошқариш имконини беради, қолаверса фотодиодлар ва ўтаўтказувчи ярим-ўтказгичларнинг ишлаш диапазонини кенгайтириш учун аҳамиятлидир.

Квантловчи H – майдон шароитида, ультраквант ҳолатда ($T \rightarrow 0$), $\exp(-r/r_D) \approx 1 - r/r_D$ чизиқли экранланиш соҳасида, ташувчиларнинг яшаш вақти 10 маротабагача ортиши мумкин:

$$\frac{\tau_H^{\text{scr}}}{\tau} = \frac{1}{\Gamma(5)} \left(\frac{8k_B T}{\hbar\omega_c} \right)^2 \exp\left(\frac{\alpha/r_D}{k_B T}\right) \Gamma\left(5, \frac{\alpha/r_D}{k_B T}\right) \cdot \left[\ln \frac{4k_B T}{\sqrt{3m^*s^2\hbar\omega_c}} \right]^{-1} \quad (15)$$

$r_D \rightarrow \infty$ яқинлашишда (15) ифодадан, хусусий ҳол сифатида эса қуйидаги

$$\frac{\tau_H}{\tau} = \left(\frac{8k_B T}{\hbar\omega_c} \right)^2 \cdot \left[\ln \frac{4k_B T}{\sqrt{3m^*s^2\hbar\omega_c}} \right]^{-1} \quad (16)$$

натижа келиб чиқади¹⁴.

Паст ҳароратли қаттиқ жисм фотоэлектроникаси учун, маълум даражада, кремнийда бор киришмаси ҳосил қилган саёз тузоқ сатҳларга (A^+ – марказлар) заряд ташувчиларни тутилиши, аҳамиятлидир. Мазкур масала, кремний асосида, генерация – рекомбинация жараёнлар ҳисобига ишловчи яримўтказгичли асбобларни моделлаштириш жиҳатдан қизиқарлидир. Заряд ташувчиларнинг рекомбинация жараёни, саёз киришма сатҳларга тутилиши билан қайд этилади. Тутилиш жараёни шу вақтга қадар илмий адабиётларда, заряд ташувчилар ўзидан акустик фонон чиқариши эвазига, поғонали илиниб олиниш сифатида қаралар эди. Унга кўра, тутилиш коэффиценти¹⁵ қуйидаги

¹⁴ Банная В.Ф., Никитина Е.В. Влияние квантового магнитного поля на разогрев носителей заряда в чистом Ge// Физика и техника полупроводников. – Санкт – Петербург, 2019. – Т. 53. – № 1. – С. 13-17.

¹⁵ Абакумов В.Н., Перель В.И., Ясиевич И.Н. Безызлучательная рекомбинация в полупроводниках. – Санкт – Петербург, 1997. – 375 с.

формула билан аиқланади:

$$\alpha_{\text{сар}} \approx \frac{\pi^3 B^2}{16 l_0} \sqrt{\frac{2\varepsilon}{m^*}} \left(\frac{\hbar}{m^* s} \right)^3 \phi(E_k), \quad (E_k \propto k_B T), \quad (17)$$

бунда $\phi(E_k)$ – қиймати бирга яқин ёки кичик бўлган функция, $B \approx 1,1$, $s = 5 \cdot 10^5$ см/с – кремнийда товуш тезлиги, $l_0 = 4,7 \cdot 10^{-4}$ см, $\varepsilon \approx 5$ мЭВ, $m^* \approx 0,5 \cdot m_0$. (17) формула бўйича баҳолаш $\alpha_{\text{сар}} \approx 6 \cdot 10^{-7}$ см³/с қиймат беради, ваҳолашки (1,7 – 4,2) К оралиқ учун тажрибада $\alpha_{\text{сар}} \approx 5 \cdot 10^{-6}$ см³/с қиймат қайд қилинган эди¹⁶, яъни фарқ 8,3 маротаба!

Шундай қилиб, кремнийдаги борнинг саёз сатҳлари орқали амалга ошадиган рекомбинация жараёни, яққол намоён бўладиган поғонали тутилиш характерига эга эмас бўлиб чиқди. Назария ва тажриба орасидаги келиб чиққан тафовутни бартараф этиш мумкин бўладики, агар заряд ташувчиларни борнинг саёз сатҳларига тутилишини, резонанс характерга эга деб тахмин қилинса. Кремнийда бор киришмасининг асосий ҳолат ($n = 1$) энергияси 0,045 эВ ташкил қилади. Заряд ташувчини A° - марказ билан боғловчи энергия $\varepsilon \approx 5$ мЭВ ($n = 3$) экани ҳисобга олинса, тутилиш коэффициенти учун қуйидаги муносабат келиб чиқади:

$$\alpha_{\text{сар}} \approx \sqrt{\frac{2\pi}{m^*}} \frac{16 \hbar^2}{3 m^*} \frac{1}{\sqrt{k_B T}} \frac{k_B T}{\varepsilon}. \quad (18)$$

Агар (18) формулага $\varepsilon \approx 5$ мЭВ, $m^* = 0,5 \cdot m_0$ ва $T = 3$ К қийматлар қўйилса, у ҳолда $\alpha_{\text{сар}} \approx 4 \cdot 10^{-6}$ см³/с бўлади. Қўриниб турибдики, қанчалик тутилиш коэффициенти назарий қиймати, унинг экспериментал аниқланган қиймати $5 \cdot 10^{-6}$ см³/с билан яқин келган.

Шундай қилиб, (1,7 – 4,2) К оралиқда, кремнийдаги борнинг саёз сатҳлари орқали амалга ошадиган заряд ташувчиларнинг рекомбинацияси, ковакни A° – марказга резонансли тутилиши (A^+ – марказ пайдо бўлгунга қадар), ва кейинчалик, A^+ – марказ томонидан эркин электронни поғонали тутилиши билан содир бўлади.

Саёз киришмалар билан легирланган яримўтказгичларнинг сиртида ва ҳажмида кечадиган рекомбинацион жараёнларга фундаментал қизиқиш, субмиллиметрли диапазонда нурлайдиган фотоқабулқилгичларни ишлаб чиқариш технологияси билан боғлиқдир.

¹⁶ Гершензон Е.М., Ладыжинский Ю.П., Мельников А.П. О новом механизме рекомбинации носителей заряда в полупроводниках // Письма в ЖЭТФ. – Москва, 1971. – Т. 14. – С. 380-382.

ХУЛОСА

Яримўтказгичларда заряд ташувчиларнинг киришмавий сочилишини тавсифловчи кинетик параметрларни ҳисоблашни асимптотик усулларини ишлаб чиқиш асосида қуйидаги хулосалар қилинди:

1. Ковалент яримўтказгичларда заряд ташувчиларни киришма нейтрал атомларида резонанс сочилиш шароитида, яримўтказгичнинг электр ўтказувчанлик, электрон иссиқлик ўтказувчанлик, магнит қаршилиқ, термо-э.ю.к. коэффициентлари учун аналитик баҳолашлар олинган, ҳамда, 1 К ҳарорат атрофида, заряд ташувчиларнинг Холл ҳаракатчанлиги максимал қийматга эришиши кўрсатилган.

2. Квази икки ўлчамли ва ҳажмий яримўтказгичларда классик циклотрон резонанс ютилиш эгри чизиғи яримкенглиги $\delta\omega$ учун, заряд ташувчиларнинг нейтрал атомларда резонанс сочилиши ҳисоби эвазига, асимптотик формулалар келтириб чиқарилган (контурни ёйилиб кетиш асимптотикаси $\delta\omega \sim T^{1/2}$), ҳамда, классик циклотрон резонанс чизиғи яримкенглигини $\delta\omega$, ҳарорат T ва киришма атомлар концентрацияси n_0 қийматлари соҳасида $\delta\omega(T, n_0)$ энг катта қийматга эришганда, $\delta\omega(T, n_0)$ боғланишни алмашилиши топилган.

3. Ионлашган киришмада заряд ташувчиларнинг сочилиш эффектив транспорт кесимига локал тузатмаларни «симметрик» ҳисоблаш методикаси ишлаб чиқилган, ва баҳолашлар шуни кўрсатдики $\langle\sigma_{tr}\rangle/\langle\delta\sigma_{tr}\rangle \sim (1-10)\ln\Lambda$, ҳамда, бу ифодадан, сочилиш транспорт кесимига σ_{tr} тузатмалар $\delta\sigma_{tr}$ (30 – 100) К ҳароратлар соҳасида аҳамиятли бўлиши кўрсатилган.

4. Экранлашган кулон марказларига заряд ташувчиларнинг поғонали тутиб олиниш кесими, ва уларни саёз киришмаларнинг резонанс сатҳларига тутилиш эҳтимоллиги учун тақрибий формулалар келтириб чиқарилган, ҳамда, номувозанатли заряд ташувчиларнинг яшаш вақтини зарядланган киришманинг экранланиш даражасига боғланиши тадқиқ этилган, хусусан, квантловчи магнит майдонида (ультраквант тақрибда), кучсиз экранлашган киришмаларда заряд ташувчиларнинг яшаш вақти 10 маротабагача ортиши мумкинлиги кўрсатилган.

5. Кучли легирланган яримўтказгичнинг сиртида электронларнинг кучли локализацияланиш эффектини тавсифлайдиган критерийсига аниқлик киритилган, хусусан, мазкур критерий ўртача олганда (Ферми-Дирак статистикасини ҳисобга олганда) 60 % бажарилиши кўрсатилган, демак, сиртий зарядни оқиб ўтиш бўсағаси 40 % ташкил этиши мумкинлиги, яъни $T = 0$ К да ҳам, сиртий зарядни чиқиб кетиш эҳтимоли мавжудлиги тасдиқланган.

6. (1,7 – 4,2) К интервалда саёз сатҳлар орқали заряд ташувчиларнинг рекомбинацияси содир бўлиши учун, кремнийдаги бор киришмасининг сатҳларига уларнинг резонанс тутилиши ҳал қилувчи аҳамият касб этиши аниқланган, хусусан, кремнийдаги бор киришмасининг рекомбинацион марказларига номувозанатли заряд ташувчиларнинг резонанс тутилиши шароитида α тутилиш коэффициенти учун тақрибий формула олинган, ва $n_0 \geq 10^{14} \text{ см}^{-3}$ концентрациялар учун $\alpha_n = 4 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$ тенг бўлиши кўрсатилган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.30.05.2018.FM./Т.34.01
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ
ПРИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

МУРАТОВ ТЕМУР ТАШКАБАЕВИЧ

**ЭФФЕКТЫ ПРИМЕСНОГО РАССЕЯНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В
ПОЛУПРОВОДНИКАХ: РАЗРАБОТКА АСИМПТОТИЧЕСКИХ
МЕТОДОВ РАСЧЕТА КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ**

01.04.10 – Физика полупроводников

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

Ташкент – 2020

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером В2019.3.PhD/FM417.

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном педагогическом университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекском, русском, английском (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.fti.uz) и на информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный руководитель: **Насриддинов Комилжон Рахматович**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Гулямов Абдурасул Гафурович**
доктор физико-математических наук
Абдулхаев Ойбек Абдуллазизович
доктор философии по физико-математическим наукам

Ведущая организация: **Национальный университет Узбекистана**

Защита диссертации состоится «___» _____ 2020 года в ___ часов на заседании Научного совета DSc.30.05.2018.FM./Т.34.01 при Физико-техническом институте. Адрес: 100084, г. Ташкент, ул. Чингиза Айтматова, дом 2Б. Административное здание Физико-технического института, зал конференций. Тел./факс: (+99871) 235-42-91, e-mail: ftikans@uzsci.net.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Физико-технического института (зарегистрирована за № ___). (Адрес: 100084, г. Ташкент, ул. Чингиза Айтматова, дом 2Б. Тел/факс: (+99871) 235-30-41).

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2020 г.

(Реестр протокола рассылки № _____ от _____ 2020 г.).

Н.Р. Авезова
председатель Научного совета по
присуждению ученых степеней, д.т.н.,
ведущий научный сотрудник

А.Г. Комилов
ученый секретарь Научного совета по
присуждению ученых степеней, кандидат
технических наук

А.В. Каримов
председатель научного семинара при
Научном совете по присуждению ученых
степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время в мире, в развитии физики и техники полупроводников важную роль играют ковалентные полупроводники – германий, кремний и типа $A^{III}B^V$, легированные мелкими примесями. В решении многих актуальных прикладных проблем, таких как: создание источников и детекторов терагерцового излучения на переходах с участием мелких примесных уровней; определение типа и величины проводимости в полупроводниковых приборах; стимулирование двухквантовых фотон-фононных переходов в непрямозонных полупроводниках с целью создания акусто-оптического квантового генератора когерентных фононов, эффекты примесного рассеяния носителей заряда имеют принципиальное значение. Кроме того, некоторые физические свойства вышеуказанных полупроводников при низких температурах (порядка несколько Кельвинов), зависят от специфики примесного рассеяния носителей заряда. В связи с этим, теоретическое исследование эффектов примесного рассеяния носителей заряда является одной из актуальных задач в этой области.

На сегодняшний день в мире, в связи с проблемами деградации полупроводниковых лазеров, большое внимание уделяется изучению спектра мелких и глубоких примесных центров, возникающих в результате радиационной обработки исследуемых образцов. В этой области реализации комплексных научных исследований на стыке физики полупроводников и физики лазеров, важной задачей является проведение целевых исследований в следующих направлениях: изучение процессов пассивации мелких примесей в ковалентных полупроводниках атомарным водородом, которые в значительной мере определяют их электрофизические свойства; разработка и внедрение новых теоретических методов расчета примесных состояний в полупроводниках; прогнозирование свойств новых типов полупроводников, представляющих интерес для твердотельной фотоэлектроники сверхнизких температур и физики полупроводниковых лазеров.

В нашей Республике большое внимание уделяется развитию теории рассеяния носителей заряда в полупроводниках, в частности, теории примесного рассеяния носителей заряда. В изучении спектра глубоких и мелких примесей в кремнии и германии, достигнуты весомые результаты. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики на 2017-2021 годы отмечены задачи «...освоение выпуска принципиально новых видов продукции и технологий, обеспечение на этой основе конкурентоспособности отечественных товаров на внешних и внутренних рынках». В этом аспекте, поиск новых полупроводниковых материалов, обладающих высокой чувствительностью к внешним воздействиям, и разработка на их основе полупроводниковых структур и приборов, обладающих высокими технологическими показателями, является важнейшей задачей. В этом плане, разработка новых теоретических подходов и методов расчета параметров

примесного рассеяния носителей заряда в ковалентных полупроводниках, является весьма востребованной задачей.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Указе Президента Республики Узбекистан УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», Постановлениях Президента Республики Узбекистан ПП-4348 от 30 мая 2019 года «О дополнительных мерах по созданию благоприятных условий для дальнейшего развития электротехнической промышленности и повышению инвестиционного и экспортного потенциала отрасли» и ПП-№2789 от 17 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организаций управления и финансирования научно-исследовательской деятельности», а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Диссертация выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан: II. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение».

Степень изученности проблемы. Научные исследования в области теории примесного рассеяния носителей заряда в полупроводниках проводятся во многих мировых научных центрах. В первую очередь следует указать на проводимые в Институте физики микроструктур РАН (Нижний Новгород) теоретические исследования примесных резонансных состояний в полупроводниках, в которых были рассчитаны энергетический спектр и волновые функции двумерного электронного газа при различных положениях примеси в квантовой яме¹. Следует также отметить цикл работ², выполненных коллективом ученых-теоретиков и экспериментаторов ФТИ РАН имени А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург), по исследованию свойств полупроводников $A^{III}B^V$. В этих работах были теоретически и экспериментально изучены эффекты примесного рассеяния носителей заряда в полупроводниках типа $A^{III}B^V$. В США исследования по изучению эффектов примесного рассеяния носителей заряда в тонких ковалентных полупроводниках проводятся на факультете электротехники университета Нотр-Дам штата Индиана³.

В ФТИ АН РУз Муминовым Р.А. и Имамовым Э.З. были сделаны первые попытки⁴ по разработке механизмов повышения эффективности солнечных фотоэлементов с наноструктурными включениями. Важные экспериментальные

¹ Алешкин В.Я., Гавриленко Л.В., Одноблюдов М.А., Ясиевич И.Н. Примесные резонансные состояния в полупроводниках (Обзор) // Физика и техника полупроводников. – Санкт – Петербург, 2008. – Т. 42. – № 8. – С. 899-922.

² Михайлова М.П., Моисеев К.Д., Яковлев Ю.П. Открытие полупроводников $A^{III}B^V$: физические свойства и применение (Обзор) // Физика и техника полупроводников. – Санкт – Петербург, 2019. – Т.53. – № 3. – С. 291-308.

³ N. Ma, D. Jena. Charge Scattering and Mobility in Atomically Thin Semiconductors // Physical Review. – New York, 2014. – Vol. 10. – № 4. – P. 011043-1– 011043-9.

⁴ Imamov E.Z., Djalalov T.A., Muminov R.A., Rakhimov R.K. Analysis of the role of nano-object in the cheaper silicon solar cells // Computational nanotechnology. – Moscow, 2017. – № 3. – P.14 -17.

результаты были получены Далиевым Х.С., Утамурадовой Ш.Б. и Каландаровым Э.К., по изучению глубоких примесей лантана и гафния в кремнии (Национальный университет Узбекистана)⁵.

К настоящему времени остается ряд нерешенных вопросов, связанных с теоретическим расчетом эффектов примесного рассеяния носителей заряда. В частности, до сих пор, в научной литературе отсутствует универсальный метод расчета кинетических параметров примесного рассеяния носителей заряда при сверхнизких температурах.

Разработке универсального метода расчета кинетических параметров примесного рассеяния носителей заряда в полупроводниках и посвящена данная диссертационная работа.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с планом научно-исследовательских работ Ташкентского государственного педагогического университета.

Целью исследования является разработка универсального асимптотического метода расчета кинетических параметров, характеризующих процессы примесного рассеяния и рекомбинации носителей заряда в объеме и поверхности полупроводников при сверхнизких температурах.

Задачи исследования:

разработать универсальный метод исследования влияния «слабого» магнитного поля на эффекты резонансного рассеяния носителей заряда на мелких примесях в полупроводниках: Ge, Si и типа $A^{III}B^V$;

определить относительный вклад резонансного рассеяния носителей в уширение кривой поглощения циклотронного резонанса в двумерных и объемных полупроводниках: Ge, Si и типа $A^{III}B^V$;

определить локальные поправки к транспортному сечению рассеяния носителей заряда на ионах примеси в полупроводниках: Ge, Si и типа $A^{III}B^V$;

исследовать влияние классического и квантующего магнитного поля на эффекты каскадного захвата носителей заряда на экранированные заряженные центры;

уточнить критерий сильной локализации электронов на поверхности сильно вырожденного полупроводника;

исследовать влияние резонансного захвата на непрямую рекомбинацию носителей заряда в Si:B.

Объектом исследования являются кремний, легированный бором, германий с примесями элементов третьей и пятой группы, а также полупроводники типа $A^{III}B^V$.

Предметом исследования являются механизмы рассеяния и рекомбинации носителей заряда через мелкие примесные уровни в полупроводниках.

⁵ Утамурадова Ш.Б., Далиев Х.С., Каландаров Э.К., Далиев Ш.Х. Об особенностях поведения атомов лантана и гафния в кремнии // Письма в Журнал технической физики. – Санкт - Петербург, 2006. – Т. 32. – №. 11. – С. 11-15.

Методы исследования. Для решения вышеуказанных задач были использованы методы квантовой механики и физической кинетики, в частности, квантовая теория рассеяния, кинетическое уравнение Фоккера-Планка, приближение времени релаксации.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработан универсальный асимптотический метод расчета кинетических параметров, характеризующих эффекты примесного рассеяния и рекомбинации носителей заряда в полупроводниках и на основе разработанного метода установлено, что мелкий $3s$ -уровень бора в кремнии (Si:B) (энергия связи 5 мэВ), является резонансным;

на основе разработанного метода показано, что при помещении полупроводника ($\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$) в «слабое» магнитного поля ($H \sim 100 \text{ Гс}$), подвижность электронов в условиях их резонансного рассеяния на нейтральных атомах примеси, достигает максимума вблизи температуры 1 К ;

получены асимптотические формулы уширения кривой поглощения классического циклотронного резонанса в условиях резонансного рассеяния электронов на нейтральных атомах примеси, и на их основе определены поправки к транспортному сечению носителей заряда на ионах примеси;

предложены расчетные выражения для критерия сильной локализации двумерного электронного газа на поверхности сильнолегированного полупроводника в пределе температуры $T \rightarrow 0$, согласно которым критерий сильной локализации электронной плотности соблюдается в среднем на 60% .

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

на основе оптимизации различных теоретических методов расчета кинетических параметров примесного рассеяния носителей заряда создана возможность разработки наиболее удобной теоретической модели расчета;

выявлена практическая ценность асимптотического разложения $L(z) \approx 1/z - 2/z^2 + \dots$, при вычислении кинетических параметров (или коэффициентов), характеризующих разнообразные рекомбинационные и релаксационные процессы ($< 16,7 \text{ К}$).

Достоверность результатов исследования обеспечивается использованием обоснованных методов решения, сопоставлением полученных теоретических результатов с результатами экспериментов и согласием результатов расчета с экспериментальными данными.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость исследования заключается в создании новых теоретических подходов к описанию механизмов примесного рассеяния носителей заряда в полупроводниках.

Практическая значимость исследования определяется тем, что полученные результаты могут быть использованы при прогнозировании свойств новых синтезируемых полупроводниковых материалов, оптимизации рабочего диапазона фотодиодов и светодиодов, стимулировании рекомбинационных процессов в полупроводниках.

Внедрение результатов исследования. На основе эффектов примесного рассеяния носителей заряда в полупроводниках: разработка асимптотических методов расчета кинетических параметров:

разработанный асимптотический метод расчета кинетических параметров примесного рассеяния носителей заряда в полупроводниках, использовался в рамках фундаментального проекта Ф2-ОТ-О-15494 – «Изучение экситонов, поляронов и явлений переноса в наноразмерных гетероструктурах с квантовыми точками с целью создания высокоэффективных фотодетекторов» (2012-2016 гг.) для определения коротковолновой асимптотики примесных состояний в квантовой яме (Справка № 89-03-3312 от 4 сентября 2019 г. Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан). Использование научных результатов позволило вычислить электропроводность, теплопроводность, коэффициент Холла и термо-э.д.с. ковалентных полупроводников;

аналитические выражения, полученные для расчета локальных поправок к транспортному сечению рассеяния электронов на ионах примеси в полупроводниках, использовались в исследованиях по прогнозированию свойств новых полупроводниковых веществ, проводимых на кафедре теоретической физики Пермского государственного университета (Справка № 125-3/1704 от 10 апреля 2019 г. Пермского государственного национального исследовательского университета). Использование научных результатов позволило предсказать и оптимизировать кинетические параметры новых полупроводниковых материалов.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 2 международных и 2 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертационной работы опубликовано 15 научных трудов, из них 4 статьи в зарубежных научных журналах и 2 статьи в республиканских журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Диссертация изложена на 104 страницах, включая 12 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, выявлены объект, предмет и методы исследования, определено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий в Республике Узбекистан, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также о структуре диссертации.

В первой главе «Состояние теоретических и экспериментальных работ по примесному рассеянию носителей заряда в полупроводниках и полупроводниковых структурах» рассматриваются механизмы примесного рассеяния носителей заряда в полупроводниках и полупроводниковых структурах. Дается литературный обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованию механизма рассеяния носителей на примесях. Анализируются различные механизмы примесного рассеяния носителей в полупроводниках. Вскрывается специфика резонансного, каскадного, кулоновского рассеяния носителей заряда на нейтральных и заряженных примесях. На основе анализа имеющихся теоретических и экспериментальных работ, формулируется постановка задач диссертационной работы.

Во второй главе «Концепция «магнетосечений» $D^- (A^+) - \text{центров}$ » разработан новый метод исследования кинетических эффектов в полупроводниках. Физическая суть предлагаемого подхода заключается в том, что учет влияния «слабого» магнитного поля на кинетические эффекты, в том числе и на эффект резонансного рассеяния носителей, рассматривается как виртуальное растяжение эффективного поперечника рассеивающего центра. При этом конкретная физическая природа рассеивающего центра не имеет принципиального значения. Особенностью данного подхода является двухэтапный учет влияния H – поля на кинетические эффекты в полупроводниках. На первом этапе вычисляются кинетические коэффициенты полупроводников: электропроводность, теплопроводность, термо-э.д.с., без H – поля. Учет H – поля осуществляется на втором этапе, путем виртуального (мыслимого) растяжения эффективного поперечника рассеивающего центра ⁶. Следует отметить, что на самом деле нет никакого реального растяжения, предлагаемая «Концепция «магнетосечений» $D^- (A^+) - \text{центров}$ » всего лишь удобная теоретическая модель учета влияния «слабого» H – поля.

Алгоритм расчета кинетических коэффициентов реализуется по схеме (рисунок 1):

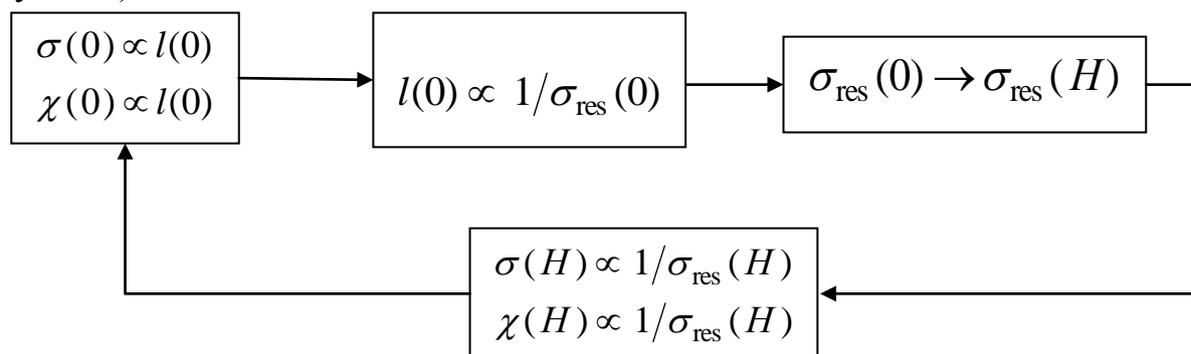


Рис.1. Блок-схема реализации вычислительной процедуры.

⁶ Это вполне допустимо, так как «слабое» магнитное поле в известной степени действует как рассеиватель, уменьшая среднюю длину свободного пробега l носителей. А так как длина свободного пробега связана с сечением рассеяния σ_{res} ($l = 1/(n_0 \sigma_{\text{res}})$), то ее уменьшение эквивалентно увеличению (растяжению) эффективного сечения рассеяния. Здесь «слабое» магнитное поле означает незначительное уменьшение длины свободного пробега носителя с тем, чтобы эквивалентное увеличение поперечника (радиуса) рассеивающего центра было очень малым по сравнению с самим эффективным радиусом рассеивающего центра.

В приведенной схеме: $\sigma(0)$ – электропроводность полупроводника в отсутствии магнитного поля, $\chi(0)$ – электронная теплопроводность в отсутствии магнитного поля; $l(0)$ – длина свободного пробега носителей заряда без H – поля, $\sigma_{\text{res}}(0)$ – сечение резонансного рассеяния без H – поля, $\sigma_{\text{res}}(H)$ – сечение резонансного рассеяния при наличии H – поля; $\sigma(H)$ – электропроводность полупроводника в «слабом» магнитном поле, $\chi(H)$ – электронная теплопроводность при наличии «слабого» H – поля. Характерно, что при наличии «слабого» H – поля закон Видемана-Франца соблюдается с достаточным запасом точности: $\chi(0)/\sigma(0) \approx \chi(H)/\sigma(H)$.

Для $\sigma(0)$, $\chi(0)$ и $l(0)$ получены асимптотические формулы:

$$\sigma(0) \approx \frac{8 e^2 n \varepsilon \sqrt{m^*}}{3 \sqrt{2} \pi^{3/2} \hbar^2 n_o \sqrt{k_B T}}, \quad (\mu = \sigma/en), \quad (1)$$

$$\chi(0) \approx \frac{16 n \varepsilon k_B \sqrt{k_B T} \sqrt{m^*}}{3 \sqrt{2} \pi^{3/2} n_o \hbar^2}, \quad (2)$$

$$l(0) \approx 2 m^* \varepsilon / (\pi \hbar^2 n_o), \quad (3)$$

здесь μ – подвижность носителей заряда, e – элементарный заряд, k_B – постоянная Больцмана, n – концентрация электронов, ε – энергия связи $D^- (A^+)$ – центра (резонансный уровень примесного атома, порядка мэВ), m^* – эффективная масса носителя n_o – концентрация нейтральных атомов.

На основе формальной замены $\sigma_{\text{res}}(0) \rightarrow \sigma_{\text{res}}(H)$ вытекает что

$$\overline{\sigma_{\text{eff}}}(H) = \overline{\sigma_{\text{res}}}(0) \cdot \left(1 + \frac{4 - \pi}{4} \frac{\overline{E}_k}{k_B T} \right), \quad (4)$$

где $\overline{\sigma_{\text{res}}}(0) = \frac{2 \pi \hbar^2}{m^* \varepsilon}$ – усредненное сечение резонансного рассеяния,

$\overline{E}_k = \frac{m^* (\omega_c \bar{l}_{\text{res}})^2}{2}$ – средняя кинетическая энергия носителя на малой части

циклотронной орбиты, $\omega_c = eH/m^* c$ – циклотронная частота, \bar{l}_{res} определяется формулой (3).

Из формулы (4) ясно, что $\sigma_{\text{res}}(H) = \sigma_{\text{res}}(0) + \Delta\sigma_{\text{res}}(H)$, ($\Delta\sigma_{\text{res}}(H) \ll \sigma_{\text{res}}(H)$).

Тогда из формул (1)-(4) вытекают следующие соотношения:

$$\sigma(H) = \sigma(0) \cdot \left(1 - \frac{4 - \pi}{4} \frac{\overline{E}_k}{k_B T} \right), \quad \rho(H) = \frac{1}{\sigma(H)}, \quad (5)$$

$$\chi(H) \sim n \nu_T \bar{l}(H) \sim \frac{\nu_T}{\sigma_{\text{res}}(H)} \sim \sqrt{\frac{T}{m^*}} \cdot \frac{1}{\sigma_{\text{res}}(H)} \cdot \left(1 - \frac{\overline{E}_k}{k_B T} \right), \quad (6)$$

$$\chi(H) = \chi(0) \cdot \left(1 - \frac{4 - \pi \bar{E}_k}{4 k_B T}\right), \quad \left(\frac{\Delta\rho}{\rho(0)}\right)_{\perp} \approx \frac{4 - \pi \bar{E}_k}{4 k_B T}. \quad (7)$$

Формулы (5)-(7) можно получить стандартными способами⁷, однако объем вычислений сильно возрастает. В предлагаемом подходе, основанном на эффективной замене $\sigma_{\text{res}}(0) \rightarrow \sigma_{\text{res}}(H)$, те же формулы получаются гораздо более простым способом. Образно говоря, можно сказать, что окрестность $D^-(A^+)$ – центра при наличии «слабого» H поля ($H \sim 100$ Гс) как бы «набухает»: $\mu_{\text{max}} \sim 1/H$.

Далее рассматривается вопрос о влиянии $D^-(A^+)$ – центров на циклотронный резонанс (ЦР) в полупроводниках. Показано, что в двумерных образцах ЦР в условиях резонансного рассеяния носителей на нейтральных примесях, выражен слабее, чем в объемных образцах (рисунки 2 и 3).

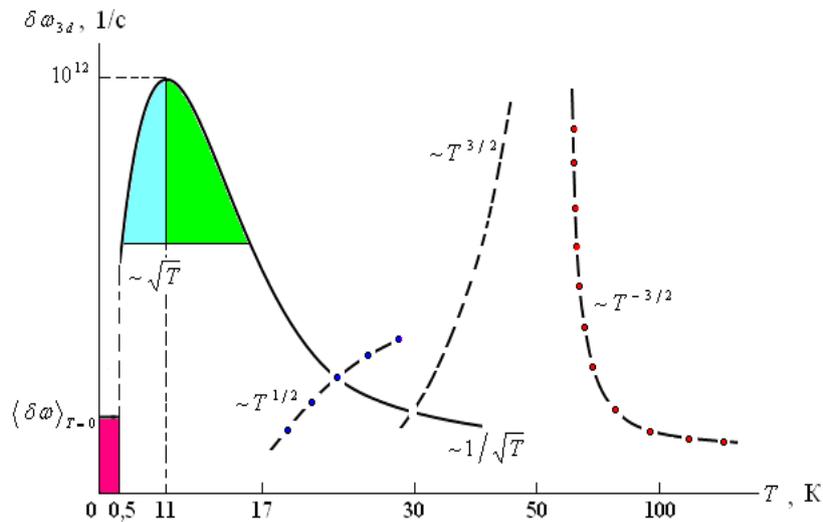


Рис. 2. Температурный ход полуширины кривой поглощения ЦР при различных механизмах рассеяния носителей в объемном образце.

Физической причиной этого является то, что сечение рассеяния σ медленных электронов в двумерном случае, в отличие от трехмерного, растет с уменьшением энергии⁸.

Следовательно, в двумерных (2D) электронных системах при низких температурах, соответствующих резонансным глубинам, время релаксации τ электрона на $D^-(A^+)$ – ямах должно сильно сокращаться ($\tau \sim 1/\sigma$) и, как следствие, уширение спектра ЦР ($\delta\omega \sim 1/\tau$) в двумерном случае будет более расплывчатым, чем в трехмерном случае.

Показано, что в пределе очень низких температур (≤ 1 К) может возникнуть особое асимптотическое решение $\delta\omega \sim T^{1/2}$, которое отличается от общепринятого решения⁹ с зависимостью $\delta\omega \sim T^{-1/2}$.

⁷ Биккин Х.М., Ляпилин И.И. Физика конденсированных сред. Неравновесная термодинамика и физическая кинетика. – Екатеринбург, 2009. – Т.1. – 500 с.

⁸ Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Квантовая механика (нерелятивистская теория). – М.: 1989. – Т.3. – 768 с.

⁹ Павлова Т.В. Магнитопримесные состояния частицы в структурах различной размерности и их роль в кинетических явлениях в полупроводниках: Автореф...дис. канд. физ. – мат. наук. – М.: МИФИ. 2006. – 21 с.

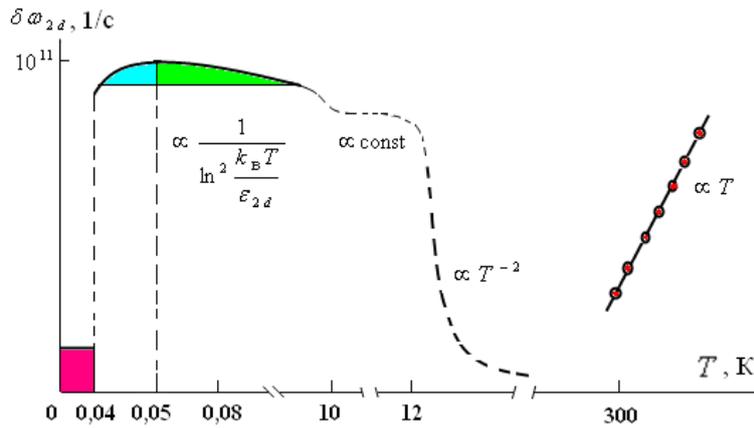


Рис. 3. Температурный ход полуширины кривой поглощения ЦР при различных механизмах рассеяния носителей в двумерном образце.

Предлагается методика для расчета локальных поправок $\delta\sigma$ к транспортному сечению рассеяния носителей на заряженной примеси. Поправки обусловлены за счет влияния «вторичных» полей других заряженных комплексов, имеющих мультипольный характер. Обосновывается теоретическая основа предлагаемого метода расчета. Она основана на модели Конуэлл-Вайскопфа. Отдельно анализируется квантовый метод расчета поправок. Данный метод дополняет классический метод в области предельно низких температур. На основе вариационной процедуры получены расчетные формулы для поправок $\delta\sigma$:

$$\begin{aligned} \sigma_{tr} &= 2\pi \int (1 - \cos \theta) \rho(\theta) \left| \frac{d\rho(\theta)}{d\theta} \right| d\theta = \pi \left(\frac{\alpha}{2E} \right)^2 \int_0^\pi (1 - \cos \theta) \frac{\cos(\theta/2)}{\sin^3(\theta/2)} d\theta \Rightarrow \\ &\Rightarrow \left[\begin{array}{l} \pi \rightarrow \pi - \theta_{\min} \\ 0 \rightarrow \theta_{\min} \end{array} \right] \Rightarrow 2\pi \left(\frac{\alpha}{2E} \right)^2 \int_{\theta_{\min}}^{\pi - \theta_{\min}} \text{ctg} \frac{\theta}{2} d\theta, \quad (\alpha = \pm \frac{Ze^2}{\epsilon}). \end{aligned} \quad (8)$$

Варьирование σ_{tr} в качестве функционала от функции $y = y_0 \text{ctg}(\theta/2)$ дает следующее выражение:

$$\begin{aligned} \delta\sigma_{tr}[y] &= 2\pi \left(\frac{\alpha}{2E} \right)^2 \delta \int_{\theta_{\min}}^{\pi - \theta_{\min}} \text{ctg} \frac{\theta}{2} d\theta = 2\pi \left(\frac{\alpha}{2E} \right)^2 \int_{\theta_{\min}}^{\pi - \theta_{\min}} \delta \text{ctg} \frac{\theta}{2} d\theta = \\ &= -\pi \left(\frac{\alpha}{2E} \right)^2 \int_{\theta_{\min}}^{\pi - \theta_{\min}} \frac{\delta\theta(\theta)}{\sin^2(\theta/2)} d\theta, \end{aligned} \quad (9)$$

здесь $\rho = \frac{|\alpha|}{2E} \cdot \text{ctg} \frac{\theta}{2}$ – прицельное расстояние, $E = E_\infty$ – кинетическая энергия электрона на бесконечности, θ – угол рассеяния в поле иона примеси (основного кулоновского поля). При этом расчет поправки $\delta\sigma_{tr}$ сводится к определению $\delta\theta$ ¹⁰:

¹⁰ Коткин Г.Л., Сербо В.Г. Сборник задач по классической механике. – М.: Регулярная и хаотическая динамика, 2001. – 352 с.

$$\delta\theta(\rho) = -\frac{1}{E} \frac{\partial}{\partial \rho} \int_{r_{\min}}^{\infty} \frac{\delta U(r) dr}{\sqrt{1 - \frac{\rho^2}{r^2} - \frac{U(r)}{E}}}, \quad (10)$$

где $\delta U(r) \sim r^{-n}$ (асимптотика вторичных полей), $U(r) \sim \pm r^{-1}$ (основное поле).

Применимость формул (8)-(10) ограничена неравенством $\delta\theta > \hbar/(\rho\bar{p})$, где $\bar{p} = \sqrt{m^* k_B T}$ - характерное значение квазиимпульса электрона.

Оценки на основе (8)-(10) показывают, что $\langle \sigma_{tr} \rangle / \langle \delta\sigma_{tr} \rangle \sim (1-10) \ln \Lambda$, где $\ln \Lambda$ - кулоновский логарифм. Вполне возможно, что суммарный вклад от поправок может оказаться соизмеримым с сечением резонансного захвата носителей ($\sigma_{res} \approx 10^{-12} \text{ см}^2$).

Третья глава «Эффекты сильной локализации электронов в полупроводниках» посвящена исследованию эффектов сильной локализации электронов на поверхности вырожденных полупроводников. Эффекты сильной локализации электронной плотности экспериментально наблюдались на поверхности полупроводника $n\text{-InGaN}(0001)$ ¹¹.

Данный эффект в асимптотическом пределе $k \rightarrow 0$ представляет наибольший интерес с точки зрения теории поверхностных электронных свойств полупроводников. Дело в том, что вблизи дна поверхностной зоны кинетическая энергия электронов равна нулю ($k=0$, $\hbar^2 k^2 / 2m^* = 0$). В сильно вырожденном квазидвумерном электронном газе средняя энергия электронов примерно равна энергии Ферми, а это означает что при $T = 0 \text{ К}$ уровень Ферми закрепляется у дна поверхностной зоны, что равносильно случаю $E_F = 0$ (рис. 4).

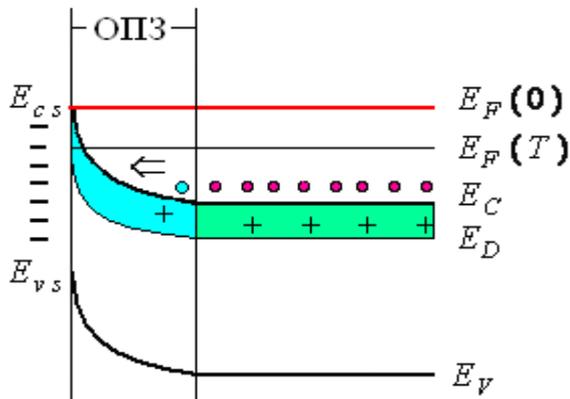


Рис. 4. Изгиб энергетических зон «вверх» при наличии области пространственного заряда. В пределе $T \rightarrow 0$ уровень Ферми закрепляется вблизи дна поверхностной зоны (красная линия) (ПЗ).

Электроны оказываются сильно локализованными в самосогласованном потенциале V_i заряженных поверхностных доноров. Ясно, что при этом классическая длина свободного пробега электронов ℓ равна нулю. Соответственно классическая электропроводность отсутствует.

¹¹ Бенеманская Г.В., Жмерик В.Н., Лапушкин М.Н., Тимошнев С.Н. Аккумуляционный нанослой – 2D-электронный канал ультратонких интерфейсов Cs/n-InGaN // Физика твердого тела. – Санкт-Петербург, 2009. – Т. 51. – № 2. – С. 372-376.

В ходе теоретического анализа квантовых свойств двумерного электронного газа показано, что в пределе $T \rightarrow 0$ электронная плотность локализуется в приповерхностной яме, причем 100 % критерий сильной локализации последней¹² соблюдается на самом деле лишь на 60 %:

$$\frac{3}{5} \frac{k_F^2}{\pi^2 n_s} \ln^2 \left(\frac{\sqrt{3} n_o}{\xi k_F n_s} \right) \leq 1, \quad (11)$$

здесь k_F – волновой вектор на уровне Ферми, n_s – поверхностная концентрация дефектов, n_o – критический уровень легирования полупроводника, ξ – числовой параметр порядка единицы.

В условиях сильной локализации электронной плотности в поверхностной яме предложено уточнение метода каскадного захвата носителей на экранированных кулоновских центрах. Как известно, экранирование основной примеси уменьшает сечение захвата в ≈ 10 раз¹³. Встает вопрос, а как учесть захват наиболее быстрых из носителей. Ведь согласно распределению Максвелла некоторые носители вполне могут приблизиться на расстояние «наименьшего» сближения с заряженной примесью. Это значительно облегчает решение задачи на определение сечения захвата при наличии классического и квантующего магнитного поля. На основе уравнения Фоккера-Планка в энергетическом пространстве найдены асимптотические формулы для сечения каскадного захвата носителя с испусканием «мелких» фононов при наличии и отсутствии классического слабого и «сильного» магнитного поля:

$$\sigma \approx \frac{4\pi}{3l_o} \left(\frac{Ze^2}{\epsilon} \right)^3 \frac{1}{(k_B T)^3} \frac{1}{1 + \frac{Ze^2/\epsilon r_D}{k_B T}} = \frac{\sigma_{\text{coul}}}{1 + \frac{\alpha/r_D}{k_B T}}, \quad (12)$$

$$\sigma_H \approx \frac{4\pi}{3l_o} \left(\frac{Ze^2}{\epsilon} \right)^3 \frac{1}{(k_B T)^3} \frac{\bar{E}_k}{4k_B T}, \quad (\bar{E}_k/2 \gg k_B T), \quad (13)$$

$$\sigma_H \approx \frac{4\pi}{3l_o} \left(\frac{Ze^2}{\epsilon} \right)^3 \frac{1}{(k_B T)^3}, \quad (\bar{E}_k/2 \ll k_B T), \quad (14)$$

здесь l_o – характерная длина свободного пробега электрона при рассеянии на акустических фононах, ϵ – диэлектрическая проницаемость кристалла, r_D – дебаевский радиус экранировки, Ze – зарядовое состояние мелкой примеси.

Оценка по формуле (12) при $T = 30$ К дает значение $\sigma \approx (0,1-1) \cdot 10^{-12} \text{ см}^2$.

¹² Бондаренко В.Б., Филимонов А.В. Критерий сильной локализации на поверхности полупроводника в приближении Томаса-Ферми // Физика и техника полупроводников. – Санкт – Петербург, 2017. – Т. 51. – № 10. – С. 1372-1375.

¹³ Джакели В.Г. О захвате носителей заряда на экранированном кулоновском центре // Физика и техника полупроводников. – Санкт – Петербург, 1994. – Т. 28. – № 12. – С. 2073-2075.

Из полученных формул (13) и (14) следует, что «слабое» магнитное поле практически не влияет на скорость каскадного захвата, в то время как «сильное» магнитное поле меняет темп самого каскадного захвата. Это позволяет целенаправленно управлять динамикой захвата носителей, что принципиально для расширения рабочего диапазона фотодиодов и сверхпроводящих полупроводников.

В условиях квантовых H – полей, с учетом линейной экранировки: $\exp(-r/r_D) \approx 1 - r/r_D$, в ультраквантовом пределе ($T \rightarrow 0$), время жизни носителей может увеличиться до 10 раз:

$$\frac{\tau_H^{scr}}{\tau} = \frac{1}{\Gamma(5)} \left(\frac{8k_B T}{\hbar\omega_c} \right)^2 \exp\left(\frac{\alpha/r_D}{k_B T}\right) \Gamma\left(5, \frac{\alpha/r_D}{k_B T}\right) \cdot \left[\ln \frac{4k_B T}{\sqrt{3m^* s^2 \hbar\omega_c}} \right]^{-1} \quad (15)$$

в пределе $r_D \rightarrow \infty$ из (15), в качестве частного случая, получается следующий результат¹⁴

$$\frac{\tau_H}{\tau} = \left(\frac{8k_B T}{\hbar\omega_c} \right)^2 \cdot \left[\ln \frac{4k_B T}{\sqrt{3m^* s^2 \hbar\omega_c}} \right]^{-1}. \quad (16)$$

Определенный интерес для твердотельной фотоэлектроники сверхнизких температур представляет захват носителей на мелкие уровни бора в кремнии. Эта задача представляет интерес с точки зрения моделирования полупроводниковых приборов на основе кремния, функционирующих за счет генерационно-рекомбинационных процессов. Процесс рекомбинации носителей заряда определяется захватом на мелкие нейтральные центры. Сам процесс захвата носителя, до сих пор, в научной литературе, рассматривался как каскадный захват, с испусканием акустического фонона, согласно которому коэффициент захвата электрона мелким уровнем бора¹⁵ определяется следующей формулой:

$$\alpha_{cap} \approx \frac{\pi^3 B^2}{16l_0} \sqrt{\frac{2\varepsilon}{m^*}} \left(\frac{\hbar}{m^* s} \right)^3 \phi(E_k), \quad (E_k \propto k_B T), \quad (17)$$

где $\phi(E_k) \leq 1$, $B \approx 1,1$, $s = 5 \cdot 10^5$ см/с - скорость звука в Si, $l_0 = 4,7 \cdot 10^{-4}$ см, $\varepsilon \approx 5$ мэВ, $m^* = 0,5 \cdot m_0$. Оценка по формуле (17) дает значение $\alpha_{cap} \approx 6 \cdot 10^{-7}$ см³/с, тогда как на эксперименте в интервале (1,7 – 4,2) К было зафиксировано значение $5 \cdot 10^{-6}$ см³/с¹⁶, т.е. разница в 8,3 раза.

Следовательно, процесс рекомбинации носителей через мелкие уровни бора в кремнии, в указанном температурном интервале, не носит ярко

¹⁴ Банная В.Ф., Никитина Е.В. Влияние квантового магнитного поля на разогрев носителей заряда в чистом Ge// Физика и техника полупроводников. – Санкт – Петербург, 2019. – Т. 53. – № 1. – С. 13-17.

¹⁵ Абакумов В.Н., Перель В.И., Ясиевич И.Н. Безызлучательная рекомбинация в полупроводниках. – Санкт-Петербург, 1997. – 375 с.

¹⁶ Гершензон Е.М., Ладыжинский Ю.П., Мельников А.П. О новом механизме рекомбинации носителей заряда в полупроводниках // Письма в ЖЭТФ. – Москва, 1971. – Т. 14. – С. 380-382.

выраженного каскадного характера. Расхождение между теорией и экспериментом можно устранить, предположив резонансный характер захвата носителей на мелкие уровни бора в кремнии. Энергия основного уровня ($n = 1$) примеси бора в кремнии составляет 0,045 эВ. С учетом того, что энергия связи носителя с A° -центром $\varepsilon \approx 5$ мэВ ($n = 3$), для коэффициента захвата получается следующее выражение:

$$\alpha_{\text{cap}} \approx \sqrt{\frac{2\pi}{m^*}} \frac{16 \hbar^2}{3m^*} \frac{1}{\sqrt{k_B T}} \frac{k_B T}{\varepsilon} \quad (18)$$

Если подставит в (18) значения $\varepsilon \approx 5$ мэВ, $m^* = 0,5 \cdot m_0$ и $T = 3$ К из интервала (1,7 – 4,2) К, то получится $\alpha_{\text{cap}} \approx 4 \cdot 10^{-6}$ см³/с. Видно, насколько близким оказалось теоретическое значение коэффициента захвата с его экспериментально измеренным значением $5 \cdot 10^{-6}$ см³/с.

Таким образом, рекомбинация носителей заряда через мелкие уровни бора в кремнии в интервале температур (1,7 – 4,2) К определяется резонансным захватом дырки, с последующим захватом электрона A^+ – центром.

Фундаментальный интерес к рекомбинационным процессам в полупроводниках, легированных мелкими примесями, связан с технологией производства фотоприемников излучения субмиллиметрового диапазона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе разработки асимптотических методов расчета кинетических параметров примесного рассеяния носителей заряда в полупроводниках сделаны следующие выводы:

1. Получены аналитические оценки для кинетических коэффициентов: электропроводности, электронной теплопроводности, магнетосопротивления, термо-э.д.с. ковалентных полупроводников в условиях резонансного рассеяния носителей заряда на нейтральных атомах примеси; в частности показано, что холловская подвижность носителей заряда достигает максимального значения в области температур порядка 1 К.

2. Предложены асимптотические формулы полуширины кривой поглощения классического циклотронного резонанса в квазидвумерных и объемных полупроводниках в условиях резонансного рассеяния носителей заряда на нейтральных примесях (асимптотика уширения $\delta\omega \sim T^{1/2}$); при этом обнаружена смена зависимости полуширины линии классического ЦР от температуры и концентрации мелкой примеси в областях их значений, где полуширина линии классического ЦР достигает максимального значения.

3. Разработана «симметричная» методика расчета локальных поправок к транспортному сечению рассеяния носителей заряда на ионах примеси, причем соответствующие оценки показывают, что их относительный вклад $\langle \sigma_{\text{tr}} \rangle / \langle \delta \sigma_{\text{tr}} \rangle \sim (1 - 10) \ln \Lambda$, из которого следует, что поправки к транспортному сечению могут оказаться существенными при температурах (30-100) К.

4. Предложены приближенные формулы для сечения каскадного захвата носителей заряда на экранированных кулоновских центрах и для вероятности захвата их на резонансные уровни мелкой примеси в полупроводниках; в частности, исследована зависимость времени жизни неравновесных носителей от степени экранировки заряженной примеси, в результате показано, что время жизни носителей в квантующих магнитных полях (в ультраквантовом пределе), при наличии слабой экранировки, может увеличиться до 10 раз.

5. Уточнен критерий сильной локализации электронов на поверхности сильно легированного полупроводника, причем соответствующие теоретические расчеты показывают, что данный критерий соблюдается в среднем (с учетом распределения Ферми-Дирака) лишь на 60 %, из которого следует, что порог протекания поверхностного заряда составляет 40 %, т.е. существует утечка поверхностного заряда даже при $T = 0$ К.

6. Установлена решающая роль резонансного захвата носителей мелкими уровнями бора в кремнии, при их рекомбинации через мелкие уровни в интервале (1,7 – 4,2) К, в результате этого получена приближенная формула для α -коэффициента захвата неравновесных носителей в условиях их резонансного захвата на рекомбинационные центры бора в кремнии, причем соответствующие расчеты показали, что при концентрациях $n_0 \geq 10^{14}$ см⁻³ коэффициент захвата составляет $\alpha_n = 4 \cdot 10^{-6}$ см³/с.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.30.05.2018.FM./T.34.01
ON AWARDING OF THE SCIENTIFIC DEGREES
AT PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE**

TASHKENT STATE PEDAGOGICAL UNIVERSITY

MURATOV TEMUR TASHKABAYEVICH

**THE EFFECTS OF IMPURITY SCATTERING OF CHARGE CARRIERS
IN SEMICONDUCTORS: DEVELOPMENT OF AN ASYMPTOTIC
METHODS OF CALCULATION OF THE KINETIC PARAMETERS**

01.04.10 - Physics of semiconductors

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

Tashkent – 2020

The theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD) was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2019.3.PhD/FM417.

The dissertation has been prepared at Tashkent state pedagogical university.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (uzbek, russian, english (resume)) on the website (www.fti.uz) and on the Information and Educational portal «ZiyoNet» (www.ziyo.net).

Scientific supervisor: **Nasriddinov Komiljon Rakhmatovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Official opponents: **Gulyamov Abdurasul Gafurovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences
Abdulkhayev Oybek Abdullazizovich
Doctor of philosophy on physical and mathematical sciences

Leading organization: **The National University of Uzbekistan**

The dissertation defense will take place on «___» _____ 2020 at _____ at the meeting of Scientific Council number DSc.30.05.2018.FM./T.34.01 at the Physical-technical Institute. (Address: 100084, Tashkent, Chingiz Aytmatov street 2B. Phone/fax: (+99871) 235-42-91, e-mail: info.ftikans@uzsci.net).

The dissertation is possible to review in Information Resource Centre at Physical-technical Institute (registered under No.____). Address: 100084, Uzbekistan, Tashkent, Chingiz Aytmatov street 2B. Phone/fax: (+99871) 235-30-41).

The abstract of dissertation sent out on «___» _____ 2020.

(Registry record No.____ on «___» _____ 2020).

N.R. Avezova

Chairman of Scientific council on award of scientific degrees, DSc in techniques, senior scientific researcher

A.G. Komilov

Scientific secretary of Scientific council on award of scientific degrees, candidate of technical sciences

A.V. Karimov

Chairman of scientific seminar under Scientific council on award of scientific degrees, doctor of physical and mathematical sciences, professor

INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

Topicality and necessity of the thesis. At the present stage in development of physics and technique of semiconductors in the world significance role are of covalent semiconductors – germanium, silicon and $A^{III}B^V$ -type semiconductors doped with shallow impurities. In solution of many actual applied problems as well as the creation sources and detectors of terahertz emission on transitions with participation of shallow impurity levels; determination of type and value of conductivity in semiconductor devices; stimulation two quantum photon-phonon's transitions in non-direct-gap semiconductors for creation quantum generator of coherent phonons; the effects of impurity scattering of mobile carriers are of principal significance. Besides, some physical properties of above semiconductors at low temperatures (is of order few Kelvin) dependences from specifics of impurity scattering of mobile carriers. In connection with it, theoretical research of effects of impurity scattering of mobile carriers is one of actual problem in this field.

A today, in the world, in connection with problems of degradation of semiconductor lasers, most attentions received to study of spectrum of the shallow and deep impurity centers, appearing as a product radiation treatment of the control samples. In this field of realization complex scientific investigations on the intersection of semiconductor physics and laser physics, important problem is to carry out of purposely investigations in following directions: study of processes of passivity of shallow impurities in covalent semiconductors by atomic hydrogen, which mainly determines of their electro-physics properties; development and put into practice of new theoretical methods of calculation of the impurity states in semiconductors; predication of properties of the new type of semiconductors, are of interest for solid-state photoelectronics of super low temperatures and physics of semiconductor lasers.

Problem development status. The scientific investigations in the field of theory of impurity scattering mobile carriers in semiconductors is carried out in many world's scientific centers. In the first must be remake on carrying out in Institute of microstructure of the Russian Academy of Sciences (Nijniy Novgorod) theoretical investigations of impurity resonance states in semiconductors, in which was calculated energy spectrum and wave functions of two-dimensional electronic gas under different position of impurity in quantum well. Must be remake also of cycle of works, made of collective scholar – theoreticians and experimentations of Physical-technical Institute named after A.F. Ioffe (Saint-Petersburg) by investigation of properties of $A^{III}B^V$ type semiconductors. In theses works theoretically and experimentally has been studied the effects of impurity scattering mobile carriers in $A^{III}B^V$ type semiconductors. In USA the investigations by study of effects of impurity scattering mobile carriers in thin covalent semiconductors is carried out on the faculty of electronic engineering of Notre Dam university Indiana state.

In the Physical-technical Institute of Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan Muminov R.A. and Imamov E.Z. was made first emphases by development of mechanisms of increases efficiency of solar photoelements with

nanosize inclusions. Important experimental results were obtained by Daliev Kh.S., Utamuradova Sh.B. and Kalandarov E.K. by study of deep lanthanum and hafnium impurities in silicon (National university of Uzbekistan).

At the present time a series of insoluble problems connected with theoretical calculations of effects of impurity scattering of mobile carriers is leaded. In particular, until, in scientific literature there isn't universal method of calculation of the parameters of impurity scattering mobile carriers at super low temperatures.

The given dissertation research devoted to this problem – the development of universal method of calculation of the parameters of impurity scattering mobile carriers.

Relevance of the dissertation research with the plans of the scientific-research works of the higher educational or scientific research institutions where the dissertation has been conducted. The dissertation research has been conducted in corresponding with the plans of the scientific-research works of Tashkent state pedagogical university

The aim of the research work is to development the universal asymptotical method of calculation of the kinetic parameters describing the process of impurity scattering and recombination of mobile carries in semiconductors at super low temperatures.

The tasks of the research work:

to develop the universal method of investigation of influence of «weak» magnetic field on the effects of resonance scattering of mobile carriers on shallow impurities in semiconductors: Ge, Si and $A^{III}B^V$ type;

to determine relativity contribution of resonance scattering of mobile carriers for the broadening of absorption curve of cyclotron resonance in two-dimensional and volume semiconductors: Ge, Si and $A^{III}B^V$ type;

to determine the local corrections to the transport cross-section of scattering of mobile carriers on impurity ions in semiconductors: Ge, Si and $A^{III}B^V$ type;

to investigate the influence classical and quantizing magnetic field on the effects of cascade capture of mobile carriers on screened charge centers;

to refine a criterion of strong localization of electrons on the surface of highly doped semiconductor;

to investigate the influence of resonance capture on indirectly recombination of mobile carriers in Si:B.

The object of the research work are boron doped silicon, germanium with impurities elements of three and five group and $A^{III}B^V$ type semiconductors.

The subject of the research work are mechanisms of scattering and recombination of mobile carriers across shallow impurity levels in semiconductors.

Methods of the research. For solution above tasks was used the methods of quantum mechanics and physical kinetics, in particular, quantum theory of scattering, Fokker-Planck's kinetic equation, time relaxation approach.

Scientific novelty of the research work are following:

the universal asymptotical method of calculation of the kinetic parameters, describing of effects of impurity scattering and recombination of mobile carriers in

semiconductors is developed and on the base of developed method it is established that shallow boron 3s-level in silicon (Si:B) (binding energy is 5 meV) is resonance;

on the base of developed method it is shown that in semiconductor ($A^{III}B^V$) in the presence of weak magnetic field ($H \sim 100$ Gs), the mobility of electrons by condition of its resonance scattering on neutral atoms reached maximal value near temperature is 1 K;

the asymptotical formulas for the broadening of absorption curve of cyclotron resonance by the resonance scattering electrons on neutral atomic impurities are obtained and on the base of obtained formulas it is determined the corrections to transport cross-section of scattering of electrons on charged impurities;

the calculus expressions for the criterion of strong localization two-dimensional electron gas on the surface of the highly doped semiconductor in $T \rightarrow 0$ limits is proposed, according to obtained expressions criterion of strong localization is hold average on 60 %.

Practical results of the research work are as follows:

on the base of optimization the different theoretical methods of calculation of the kinetic parameters of impurity scattering charge carriers was created the possibilities of development of a more practical theoretical model of calculation;

the practical value of asymptotical expansion $L(z) \approx 1/z - 2/z^2 + \dots$ by calculation of kinetic parameters (or coefficients) describing different recombination and relaxation processes ($< 16,7$ K) has been determined.

Authenticity of the research results is confirmed by the use of approved methods of solution, comparison obtained theoretical results with experimental results and agreement calculation results with experimental dates.

Scientific and practical significance of the research results.

The scientific significance of the research is to development of new theoretical approaches to description of the mechanisms of impurity scattering of mobile carriers in semiconductors.

The practical significance of the research lies that obtained results can be used by predication of properties of new synthesized semiconductor materials, optimization of working diapason of photosensitive diodes and optical diodes, stimulation of recombination processes in semiconductors.

Implementation of the research results. On the basis of the effects of impurity scattering of charge carriers in semiconductors: development of an asymptotic methods of calculation of the kinetic parameters:

the developed asymptotic method of calculation of the kinetic parameters of impurity scattering of charge carriers in semiconductors was used for the determination of short wave asymptotic of impurities states in quantum well within the framework of the fundamental project F2-OT-O-15494 - «Study of excitons, polarons and transport phenomena in low-dimensional structures with quantum dots with the purpose of creation of highly effective photodetectors» (2012-2016) (Certificate No. 89-03-3312 of September 4, 2019 of the Ministry of Higher and Secondary Specialized Education of the Republic of Uzbekistan). The use of these

scientific results allowed to calculate the electronic conductivity, heat conductivity, Hall's factor and thermo-e.m.p of covalent semiconductors;

the obtained analytical expressions for the calculation of local corrections to transport cross-section of scattering of electrons on ions in semiconductors was used in research works for the projection of properties of new semiconductor substances, to take carry out in department of theoretical physics of the Perm state university (Certificate No. 125-3/1704 of April 10, 2019 of the Perm state national research university). The use of these scientific results allowed to predicate and optimize of kinetic parameters of new semiconductor materials.

Approbation of the research results. The results of the dissertation were reported and discussed at 2 International and 2 Republican conferences.

Publication of the research results. On the topic of the dissertation, 15 scientific papers were published, from them 4 scientific articles in International and 2 in Republican journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publishing the main scientific results of dissertation works.

The outline of the thesis. Dissertation consists of introduction, three chapters, conclusion, a list of references and annexes. Dissertation is expounded on 104 pages, including 12 pictures.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Имамов Э.З., Муратов Т.Т. Влияние резонансного рассеяния носителей заряда на примесных центрах на электрические и тепловые свойства полупроводников // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2008. – Т. 10, – № 3. – С. 173-179. (01.00.00; № 5).

2. Муратов Т.Т. Примесные резонансные уровни в сверхпроводниках // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2009. – Т. 11, – № 5-6. – С. 345-350. (01.00.00; № 5).

3. Муратов Т.Т. Влияние резонансного рассеяния носителей тока на электрические и тепловые свойства ковалентных полупроводников // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета. серия: физика-химия. – Санкт-Петербург, 2012. – Вып. 2. – С. 3-10. (01.00.00; № 16).

4. Муратов Т.Т. Формализм «магнетосечений» $D^-(A^+)$ - центров при резонансном рассеянии носителей заряда в невырожденных полупроводниках // Вестник Новосибирского государственного университета, серия: физика. – Новосибирск, 2013. – Т. 8, – Вып. 3. – С. 142-158. (01.00.00; № 14).

5. Муратов Т.Т. Рекомбинация носителей заряда через мелкие уровни бора в кремнии при низких температурах // Прикладная физика. – Москва, 2019. – № 3. – С. 39-44. (01.00.00; № 41).

6. Muratov T.T. Recombination of Mobile Carriers Across Boron Excited Levels in Silicon at Low Temperatures // Semiconductors. – Saint-Petersburg, 2019. Vol. 53, No.12. – P.1573-1577. (№11, Springer, IF = 0,691).

II бўлим (II часть; II part)

7. Муратов Т.Т. Вклад резонансного рассеяния носителей заряда в уширение кривой классического циклотронного резонанса в квазидвухи трехмерных полупроводниках // Вестник Южно-Уральского государственного университета, серия: математика, механика, физика. – Челябинск, 2014. – Т. 6, – № 4. – С. 36-47.

8. Муратов Т.Т. Локальные поправки к транспортному сечению рассеяния носителей заряда в полупроводниках // Вестник Воронежского государственного университета, серия: физика, математика. – Воронеж, 2016. – Вып. 1. – С. 24-32.

9. Муратов Т.Т. Поправки к транспортному сечению рассеяния носителей заряда в полупроводниках // Вестник Пермского университета, серия: физика. – Пермь, 2016. – Т.32, – № 1. – С. 11-17.

10. Муратов Т.Т. Каскадный захват носителей заряда на экранированных кулоновских центрах в полупроводниках // Вестник национального исследовательского ядерного университета Московского инженерно-физического института. – Москва, 2017. – Т.6, – № 5. – С. 389-395.

11. Муратов Т.Т. Уточнение критерия сильной локализации электронов на поверхности полупроводника // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – Минск, 2018. – № 2. – С. 117-124.

12. Джалалов Т.А., Имамов Э.З., Муратов Т.Т. О феномене сверхпроводимости // Материалы пятой международной конференции: Образование через всю жизнь: непрерывное образование для устойчивого развития. Санкт-Петербург-Ташкент, 2007. – С. 199-201.

13. Имамов Э.З., Муратов Т.Т. Об одном механизме рассеяния электронов в полупроводниках // Материалы международной конференции: «Неравновесные процессы в полупроводниках и в полупроводниковых структурах». – Ташкент, 2007. – С. 41-42.

14. Муратов Т.Т., Каландаров Э.К. Эффекты резонансного рассеяния носителей заряда на донорах в полупроводниках // Материалы международной конференции: «Неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах». – Ташкент, 2017. – С. 44-45.

15. Муратов Т.Т. Каскадный захват электронов на дислокационные центры в полупроводниках // Материалы международной конференции: «Неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах». – Ташкент, 2017. – С. 45.

Автореферат «Til va adabiyot ta'limi» журнали тахририятида тахрирдан ўтказилиб, ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнлари ўзаро мувофиқлаштирилди (15.12.2019 йил).

Босишга рухсат этилди: «_____» 20____ йил.
Бичими 60x84 ¹/₁₆, «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табағи _____. Адади: 100. Буюртма: № _____.

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.