

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ,
ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.28.02.2018.FM/T.03.05
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**ИСЛОМ КАРИМОВ НОМИДАГИ
ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

АЮПОВ КУТУП САУТОВИЧ

**КУЧЛИ ЛЕГИРЛАНГАН КРЕМНИЙДАГИ
НОБАРҚАРОР ҲОДИСАЛАР**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

**Физика-математика фанлари доктори (DSc) диссертацияси
АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2019

Докторлик (DSc) диссертацияси автореферати мундарижаси

Оглавление автореферата докторской (DSc) диссертации

Contents of the abstract of doctoral (DSc) dissertation

Аюпов Кутуп Саутович

Кучли легирланган кремнийдаги нобарқарор ҳодисалар 3

Аюпов Кутуп Саутович

Неравновесные процессы в сильнокомпенсированном кремнии 33

Ayupov Kutup Sautovich

Non-equilibrium processes in strongly compensated silicon 63

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works 67

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ,
ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.28.02.2018.FM/T.03.05
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**ИСЛОМ КАРИМОВ НОМИДАГИ
ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

АЮПОВ КУТУП САУТОВИЧ

**КУЧЛИ ЛЕГИРЛАНГАН КРЕМНИЙДАГИ
НОБАРҚАРОР ҲОДИСАЛАР**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

**Физика-математика фанлари доктори (DSc) диссертацияси
АВТОРЕФЕРАТИ**

Фан доктори (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2018.2.DSc/FM122 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ислом Каримов номидаги Тошкент давлат техника университетида бажарилган.

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

Илмий маслаҳатчи:	Зикриллаев Нурилло Фатхуллаевич физика-математика фанлари доктори, профессор
Расмий оппонентлар:	Каримов Абдулазиз Вахитович, физика-математика фанлари доктори, профессор Далиев Хожакбар Султанович физика-математика фанлари доктори, профессор Исмаилов Қанатбай Абдремович физика-математика фанлари доктори, профессор
Етакчи ташкилот:	Андижон давлат университети

Диссертация ҳимояси Тошкент давлат техника университети, Ўзбекистон Миллий университети ҳузуридаги DSc.28.02.2018.FM./T.03.05 рақамли Илмий кенгашнинг 2019 йил «___» _____ соат ____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100095, Тошкент шаҳри, Университет кўчаси, 2-уй. Тел. (99871) 246-46-00, факс (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@edu.uz, ТДТУ «Электроника ва автоматика» факультети, 232-хона).

Диссертация билан Тошкент давлат техника университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (___ рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100095, Тошкент шаҳри, Университет кўчаси, 2-уй. Тел. (99871) 246-03-41.

Диссертация автореферати 2019 йил «___» _____ куни тарқатилди.

(2019 йил «___» _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси.)

М.К.Баҳадырханов

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш раиси ф.-м.ф.д., профессор, академик

Б.Э.Эгамбердиев

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш илмий котиби ф.-м.ф.д., профессор

А.З.Раҳматов

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси ўринбосори, т.ф.д., к.и.х.

КИРИШ (докторлик (DSc) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳон миқёсида бугунги кунда жадал ривожланаётган электроника соҳасида янги функционал имкониятларга эга бўлган наноматериаллар олишнинг илмий асосларини ишлаб чиқиш долзарб муаммолардан бири ҳисобланади. Назарий ва амалий маълумотлар асосида кремний панжарасида киришма атомларининг нанокластерлари ва кластерли структуралари шаклланиши қулай термодинамик шароитларининг аниқ эмаслиги наноэлектроника саноатининг юқори суръатда ривожланишига тўсқинлик қилмоқда.

Ҳозирги кунда жаҳонда кучли легирланган кремнийдаги номувозанат жараёнлар шаклланишининг технологик ва термодинамик шароитларини, кремний материалида янги физик ҳодисалар, эффектларни аниқлаш ҳамда уларнинг функционал имкониятлари асосида янги синф электрон қурилма ва датчикларини яратишга катта аҳамият берилмоқда. Бу борада мақсадли илмий тадқиқотларни, жумладан, қуйидаги илмий изланишларни олиб бориш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади: бошланғич яримўтказгич материалнинг зарур электрофизик параметрлари ва киришма атомларнинг таркибини аниқлаш, киришма атомларнинг табиати билан боғлиқ бўлган легирлаш усулларини танлаш, кремний материалида янги физик ҳодисалар, эффектлар ҳамда уларнинг функционал имкониятлари асосида янги синф электрон қурилма ва датчикларини яратиш.

Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида белгиланган вазифаларни амалга оширишда илмий ва инновация ютуқларини амалиётга кенг жорий этишнинг самарали механизмларини яратиш масалаларига алоҳида эътибор қаратилмоқда¹. Шунини таъкидлаш зарурки, 2018 йили қабул қилинган «Тадбиркорликни фаол қўллаб-қувватлаш, инновацион ғоя ва технологияларни ривожлантириш йили» Давлат дастури ижросини таъминлашда илмий фаолиятни ривожлантиришга қаратилган бир қатор вазифалар қўйилди. Таркибида наноструктуралар бўлган кремний олиш технологиясини такомиллаштириш асосида янги синф материалларини яратиш ҳамда уларнинг электрофизик ва фотоэлектрик хусусиятларини ўрганишда олиб борилаётган илмий ишларнинг натижаларини амалиётга татбиқ этиш Давлат дастурида белгиланган вазифаларни амалга оширишдаги кичик бир йўналишдир.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасининг янада ривожланиши бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2017 йил 13 февралдаги ПҚ-2772-сон «2017–2021 йилларда электроника саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги ҳамда 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон «Фанлар академияси фаолияти, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш

¹ Ўзбекистон Республикаси Президентининг Фармони. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида /Расмий нашр/. Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлиги. – Тошкент: «Адолат», 2017. – Б. 26.

чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъерий-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 технологиялари ривожланишининг III. «Энергетика, энергия ресурс тежамкорлиги, транспорт, машина ва асбобсозлик» устувор йўналишига мувофиқ бажарилди.

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи².

Микроэлектроника ва магнитоэлектроника соҳасидаги илмий изланишлар жаҳоннинг етакчи илмий марказлари ва олий таълим муассасалари, жумладан: Мичиган университети (АҚШ), Токио университети ва Цукуба долзарб технологиялар маркази (Япония), Физика-техника институти (Санкт-Петербург, Россия)да олиб борилмоқда.

Янги нанокластерли ўтакомпенсацияланган кремний олиш ва улар асосида электрон қурилмаларни ишлаб чиқишга оид жаҳонда олиб борилган илмий тадқиқотлар натижасида қатор, жумладан, қуйидаги илмий натижалар олинган: яримўтказгичлар электрофизик параметрларининг турли хил киришма атомлари кристалл панжарасига юқори ҳароратли диффузия усули билан киритиш технологияси яратилган (Физика-техника институти, Санкт-Петербург, Россия); киришмали кремнийнинг паст ҳароратларда ферромагнит ҳолатга ўтиши аниқланган (Квант-функционал илмий маркази, Жанубий Кореянинг); компенсацияланган кремний асосидаги структуралар хусусиятлари аниқланган (Готинген лабораторияси, Германия).

Жаҳонда компенсацияланган кремний ва улар асосидаги кластерлар бўйича қуйидаги қатор устувор йўналишларда тадқиқотлар олиб борилмоқда, жумладан, ноёб киришма атомлари асосида параметрлари яхшилانган диодларни ишлаб чиқиш, компенсацияланган кремнийдан ноноўлчамли структуралар олиш жараёнларини ривожлантириш, кучли легирланган яримўтказгичларнинг электрофизик хусусиятларини аниқлаш ва улар асосида кўп функцияли магнит, ҳарорат, босим ва фото датчикларни ишлаб чиқиш, уч ўлчамли нанокластерларда содир бўладиган квант ва нааноўлчамли эффектларини аниқлаш ва асослаш.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. А.В.Ведяев ва ҳамкасблари (МДУ физика факультети, Россия) томонидан токнинг динамик парамагнитлик хусусиятлилиги ҳамда мураккаб мультикатламли структуралардаги киришма атомларини ва кўп қаррали потенциал тўсиқларни ўрганиш бўйича олиб борган назарий ишларининг натижалари янги йўналишнинг келгусидаги тадқиқотларини аниқлаб берди. А.Устинов ва

² Formation of Clusters of Impurity Atoms of Nickel in Silicon and Controlling Their Parameters, USA. *Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 4 No. 2, 2014, pp. 23-26. doi: 10.5923/j.nn. 20140402.01. Self_Organization of Nickel Atoms in Silicon *Inorganic Materials*, 2011, Vol. 47, No. 9, pp. 962–964. «Transport Properties of Silicon Doped with Manganese via Low_Temperature Diffusion» *Inorganic Materials*, 2011, Vol. 47, No. 5, pp. 479–483. «Photoconductivity of Silicon with Multicharged Clusters of Manganese Atoms [Mn]₄» USA, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, USA, 2010, Vol. 46. No.3, pp.276-280. Spectral Range of Current Self-Oscillation in Manganese-Doped Silicon // *Technical Physics*. USA, 2006. - №9(51). - P.1235-1236

хамкасбларини (ИФМ, Екатеринбург, Россия) мультикатламларнинг структураларини тажрибада ўрганиш, назариясини яратиш бўйича олиб борган ишлари дунё олимлари томонидан юксак баҳоланди ва тан олинди. Бу соҳада дунё миқёсида тан олинган илмий тадқиқотларга Ю.В.Гуляев-И.С.Зильберман (ФЭИ, Россия), Капица номидаги «Физика муаммолари» институти олимлари А.С.Сигов, А.И.Морозов ишларини кўрсатиш мумкин.

Ўзбекистон олимларидан академик Р.А.Мўминов раҳбарлигидаги илмий мактабда кремний киришма атомларини киритиб радиацион нурланишларни қайд этувчи детекторлар яратилган. Академик М.К.Бахадырханов раҳбарлигидаги илмий мактабда электроника саноатининг асосий хом ашёси бўлган кремнийга турли хил киришма атомларни киритиб, уларнинг табиати ва таъсири мукаммал ўрганилган. Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси академиги С.З.Зайнабиддинов томонидан кремнийдаги чуқур сатхлар ва киришма атомларининг табиатлари тадқиқ қилинган. Ўзбекистон Республикасининг нуфузли илмий-тадқиқот институтлари – Ўзбекистон Республикаси Фанлар академиясининг Физика техника институти, Ядро физикаси институти ва бошқалар ҳамда республиканинг кўплаб олийгоҳларида (ТДТУ, ҚДУ, СамДУ, ФДУ, АДУ), Ўзбекистон Миллий университетиде яримўтказгич материалларнинг физик хусусиятларини ўрганиш бўйича илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда.

Кучли легирланган яримўтказгич материалларни олиш технологияси ва уларнинг хусусиятларини ўрганиш бўйича маълум илмий натижалар олинганига қарамасдан, жуда муҳим ва истиқболли йўналиш ҳисобланган кучли легирланган яримўтказгичлардаги номувозанат ҳолатлари физикаси шу давргача ўрганилмаган. Яримўтказгич материалларнинг сиртида ҳамда яримўтказгич структураларда ўтиш ҳодисаларини ўрганиш бўйича сўнги вақтда олиб борилган тадқиқотларнинг таҳлили шуни кўрсатдики, бу соҳадаги назарий ва амалий ишларнинг натижалари асосида маълум бир илмий натижаларга эришилган. Лекин шу даврга қадар кремнийнинг кристалл панжарасида турли зарядланган ҳажмий марказларни ҳосил қиладиган киришма атомларининг хоссалари ўрганилмаган.

Бу соҳада кузатилган янги физик ҳодисаларнинг моҳиятини ўрганиш, уларнинг физик механизмларини яратиш яримўтказгичлар физикасида янги илмий йўналиш ҳисобланиб, қаттиқ жисмлар физикасининг янги қирраларини очиб беради. Олинган илмий натижаларнинг таҳлили асосида кремний материали параметрларининг мувозанатда бўлмаган ҳолатдаги ўтиш жараёнлари ўрганилмаганлиги аниқланди. Шу сабабли мазкур диссертация кучли легирланган кремнийдаги мувозанатда бўлмаган жараёнларни ўрганиш, бу ҳолатда кузатилган физик ҳодисаларнинг механизмларини яратиш, шу билан бирга, олинган натижалар асосида ишлайдиган кенг функционал имкониятларга эга бўлган янги тур асбоблар ва физик датчикларни яратиш имкониятларини очиб беришга бағишланган.

Диссертация мавзусининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация иши Тошкент давлат техника университети илмий-тадқиқот

режасининг П-14-009 «Паст ҳароратли диффузион технология асосида яримўтказгичларни легирлаш технологиясини яратиш ва шу технологияни электроника саноатида ишлатиш»; А-3-73 «Яримўтказгичларда кластерларнинг тақсмоти ва концентрациясини бошқарувчи қурилмани лойиҳалаш ва қуриш», ОТ-Ф2-55 «Янги функционал имкониятларга эга наноматериалларнинг янги синфи сифатидаги қиришма атомларининг нанокластерлари шаклланиши негизида ҳажмий структуралашган кремний олишининг илмий асосларини ишлаб чиқиш» мавзусидаги лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади кучли легирланган кремнийдаги нобарқарор ҳодисаларнинг физик хусусиятларини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

кучли легирланган кремнийнинг электрофизик параметрлари мувозанатда бўлмаган ҳолатини олиш технологиясини физик асослаш; кучли легирланган материалнинг физик параметрларини бошланғич материалнинг параметрларига нисбатан ўзгариш қонуниятларини ҳамда легирлаш жараёни (диффузия ҳарорати ва вақти) ҳамда қиришма атомларнинг кремний панжарасидаги ҳолатига яратилган технологиянинг таъсирини аниқлаш;

яримўтказгич материалларда нобарқарор ҳолатнинг вужудга келишидаги қулай технологик шартларни аниқлаш, яъни янги технологиядан фойдаланиб кучли легирланган кремний асосида мувозанатда бўлмаган материални олиш;

бошланғич яримўтказгич кремнийнинг электрофизик параметрларини компенсацияловчи қиришма атомларнинг кристалл панжарада жойлашиш табиатига боғлиқлик қонуниятларини аниқлаш;

қиришма атомларининг электрофаол концентрацияси ҳақидаги қарама-қарши фикрларнинг ечимини топиш, қиришма атомларнинг кремний панжарасида жойлашишида диффузион жараённинг термодинамик шарт-шароитларини аниқлаш;

кремнийнинг электрофизик хусусиятларини ўрганиш асосида материалнинг физик хоссалари билан компенсацияловчи қиришма атомларнинг концентрацияси ўртасидаги боғланиш қонуниятларини очиб бериш;

кучли легирланган материалда кузатилган фотоэлектрик хоссаларни ўрганиш ва бундай материалларга хос бўлган янги фотоэлектрик ва магнит хусусиятларни аниқлаш;

нобарқарор ҳолатдаги компенсацияланган кремнийда яримўтказгичдаги қиришма атомларнинг ўзаро ҳамда ҳарорат ва радиацион нуқсонлар билан ўзаро таъсирини аниқлаш;

кучли легирланган материалларнинг функционал имкониятларини аниқлаб, улар асосида янги фотоэлектрик, оптоэлектрон, магнит ўлчовчи қурилмаларни яратиш имкониятларини очиб бериш ҳамда ҳарорат ва радиацияга чидамли материаллар ва асбобларни яратиш.

Тадқиқотнинг объекти янги технология асосида марганец, темир, рух, никель, олтингугурт ва селен қиришма атомлари қиритилган, ҳажмий-

наноструктуралари мавжуд бўлган кучли легирланган кремнийнинг электрофизик параметрлари нобарқарор ҳолатидаги материалдан иборат.

Тадқиқотнинг предмети ҳажмида наноструктуралар бўлган компенсацияланган кремний материалида нобарқарор ҳолатни ва шу ҳолатда вужудга келган янги ҳодисаларнинг физик механизмларини аниқлаш.

Тадқиқотнинг усуллари. Кремний панжарасидаги киришма атомлар ҳосил қилган наноҳажмий кластерлардаги атомларнинг ҳолати замонавий электрон парамагнит резонанс қурилмаси ҳамда рентген структурали таҳлиллар асосида ўрганилди. Намуналарнинг паст ҳароратдаги ферромагнит ҳолати магнитометр – СКВИД, кучли легирланган кремний намуналарида киришма атомларнинг ҳолатини аниқлашда Микроэлементларни таҳлил қилувчи электрон микроскоп, «Solver-Pro» русумидаги Атом кучлари микроскопи ҳамда МИК-5 русумдаги инфрақизил микроскопдан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

киришма атомларнинг ҳолатини кремний кристалл панжарасида бошқариш, уларнинг ўзаро ва панжара нуқсонлари билан таъсирлашишини ҳосил қиладиган диффузиялаш технологияси ишлаб чиқилган;

кремнийдаги киришма атомларнинг компенсация даражасини бошқариш орқали янги хусусиятларга эга материал олинган ва унинг электрофизик хусусиятларини бошқариш мумкинлиги асосланган;

фото- ва қолдиқ ўтказувчанликнинг ҳарорат ва инфрақизил нурлар таъсирида кескин камайиши аниқланган;

ҳажмий нанокластерлар механизми зарядланган марказларда ток ташувчиларнинг сочилиш эффекти натижасида ҳаракатчанликнинг ташқи омиллар таъсирида ўзгариши аниқланган;

кучли легирланган кремний материали асосида хона ҳароратида ишлайдиган амплитуда ва частотаси бошқариладиган қаттиқ жисмли генератор ишлаб чиқилган;

фотоэлектрик, оптоэлектрон, магнит ўлчовчи қурилмаларни яратиш учун ўтакомпенсацияланган кремний материалининг функционал имкониятлари аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

яратилган технологиядан фойдаланиб кучли легирланган кремнийни олишда киришма атомларнинг катта миқдордаги концентрациясини киритиб, уларнинг электрофаол бўлишига олиб келинган;

кучли легирланган кремнийнинг электрофизик хусусиятларини аниқлаш асосида ҳосил бўлган ҳажмий наноструктуралар материалнинг фотоэлектрик, магнит хусусиятларини кескин ўзгартириши мумкинлиги аниқланган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Кучли легирланган кремнийни олишда яратилган технология асосида олинган намуналарнинг электрофизик параметрлари Холл эффекти ва тўрт зондли қурилма асосида ўлчанган. Киришма атомларнинг кремний сирти ва ҳажмида наноструктураларни ҳосил қилганлиги ҳақидаги илмий маълумотлар бир-

бирига боғлиқ бўлмаган ва олинган натижаларни ўзаро тўлдирадиган замонавий қурилмалар (атом кучлари микроскопи, МИК-5 русумли инфракизил нурли микроскоп, микрозондли таҳлил, электрон-парамагнит резонанс ва бошқалар)дан фойдаланиб амалга оширилган. Тажрибадан олинган натижалар яримўтказгич кремний материалида аниқланган физик ҳодиса ва эффектларга мослиги билан ишончлилиги тасдиқланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти шундаки, янги технология асосида кремнийдаги киришма атомларнинг компенсация даражасини фаол бошқарадиган диффузия технологияси ишлаб чиқилган, шаклланадиган нанокластерларнинг кристалл панжарадаги ҳолати, жойлашиш ва шаклини аниқ бошқариш имкониятлари очиб берилган. Янги электрофизик параметрларга эга наноҳажмий кластерли кремний материалининг фундаментал параметрлари, фотоэлектрик ва магнит хусусиятлари, бошланғич кремнийнинг электрофизик хусусиятларининг бошқарилиши мумкинлиги кўрсатилган.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти кучли легирланган кремний асосида монохроматик нурларнинг $\lambda=1,5\div 4$ мкм тўлқин узунлиги оралиғида ишлайдиган фотоприёмникларни яратиш, ФЎни ИҚ-нурлар таъсирида сўниш эффекти асосида фон ёруғликда ИҚ-нурларнинг кичик қийматларини сезадиган янги тур фотоприёмниклар, ташқи босимни ўлчайдиган тензодатчиклар яратиш имкониятлари кўрсатиб берилгани ҳамда ташқи таъсирларга сезгир датчиклар, оптоэлектрон асбоблар ишлаб чиқилгани билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Мувозанатда бўлмаган ҳолатдаги кучли легирланган кремний материалларининг физик хусусиятлари, киришма атомларнинг ҳажмий наноструктураларини турли таркибда ҳосил қилиш ва концентрациясини бошқариш асосида:

паст ҳароратли ва босқичма-босқич легирлаш технологияси «FOTON» акциядорлик жамиятида ҳажмий наноструктурали материалларни олишда қўлланилган («ЎЗЭЛТЕХСАНОАТ» акциядорлик компаниясининг 2018 йил 9 июлдаги 02-1519-сон маълумотномаси). Илмий натижанинг қўлланиши детекторлар ишлаб чиқариш технологиясини сезиларли даражада яхшилаш имконини берган;

кўп зарядли нанокластерли кремнийнинг фотоэлектрик хоссаларини бошқариш бўйича олинган натижалар «FOTON» акциядорлик жамиятида нанокластерли кремний асосидаги фотоэлементларни ишлаб чиқаришда қўлланилган («ЎЗЭЛТЕХСАНОАТ» акциядорлик компаниясининг 2018 йил 9 июлдаги 02-519-сон маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланиши кремний асосидаги нановаризон структурали кенг спектрал сезгирликка эга (0,1–3 мкм) фотоэлементларнинг янги авлодини ишлаб чиқариш имконини берган;

кучли легирланган кремнийда киришма атомларининг ўзаро ва кристалл панжарадаги нуқсонлар билан таъсирининг ортиши бўйича олинган натижалар «FOTON» акционерлик жамиятида юқори кучланишли ва юқори

частотали диодлар ишлаб чиқаришда қўлланилган («ЎЗЭЛТЕХСАНОАТ» акциядорлик компаниясининг 2018 йил 9 июлдаги 02-1519-сон маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланиши юқори частотали диодлар параметрларини ташқи таъсирларга (харорат ва гамма нурланиш) бардошлилигини ошириш орқали кремний асосидаги қурилмаларни тайёрлаш технологиясини сезиларли даражада яхшилашга имкон берган;

марганец атоми нанокластерлари бўлган кремний асосидаги ҳажмий наноструктурали материалларни олишнинг асосий усуллари ва физик механизмлари бўйича назарий ҳисоблар «Кремний асосидаги нановаризон структурали кенг спектрал сезгирлик соҳасига (0,8–3 мкм) эга бўлган фотоэлементларнинг янги авлодини ишлаб чиқиш ва тайёрлаш» илмий лойиҳасида кучли легирилган кремнийда наноҳажмий кластерли материалларни олишда қўлланилган (Туркменистон Фанлар академияси Қуёш энергияси институтининг 2018 йил 12 июлдаги 83-сон маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланиши инфракизил нурланиш (0,8–3 мкм) соҳасида ишлайдиган фотоэлементлар ва оптоэлектрон қурилмаларнинг янги синфини яратиш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Ишнинг асосий натижалари 10 та халқаро ва 14 та республика илмий-амалий анжуманларида маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация материаллари бўйича 2 та монография, патент ва 51 та илмий иш нашр қилинган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 16 та мақола нашр қилинган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, 6 та боб, хулоса ва 45 та расм, 15 та жадвал, 193 номдаги адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертация ҳажми 209 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи ва муаммонинг ўрганилганлик даражаси баён этилган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, шунингдек, объекти ва предмети аниқланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги, назарий ва амалий аҳамияти, натижаларнинг ишончлилиги, амалиётга жорий этилиши, нашр этилган ишлар, диссертациянинг тузилиши борасидаги маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «**Кремнийда киришма атомлар ҳолати**» деб номланган биринчи бобида керакли ва такрорланувчи параметрли компенсацияланган кремнийни олиш имкониятлари кўрсатиб берилган. Яримўтказгич материалларда киришма атомлар ҳисобига чуқур энергетик кўпкаррали зарядланган марказларни ҳосил қилиши асосида бу киришмани атомларнинг панжара нуқсонлари билан ўзаро таъсирлашганда вужудга келадиган механизм деб қараш мумкинлиги асосланган.

Кирилган киришма атомларининг барчаси тўлиқ ионлашган бўлиб (шу билан бирга, бир қисми икки қарра ионлашган), уларнинг миқдори ҳарорат $T=300$ К бўлганда юз минг ёки миллион марта мувозанатдаги ток ташувчиларнинг концентрациясига нисбатан кўп бўлиши аниқланган.

Компенсацияланган материалларда ток ташувчиларнинг ҳаракатчанлиги, шу билан бирга, дрейф ҳаракатчанлиги ҳамда Холл ҳаракатчанлик сезиларли даражада камайган. Кучли легирланган материалларнинг солиштирма қаршилиги деярли хусусий яримўтказгичларникига тенг бўлса-да, улардаги ток ташувчиларнинг концентрацияси киришма атомларнинг ионларидан сезиларли кам бўлиши аниқланган. Бу кучли компенсация қилиш билан хусусий яримўтказгичга нисбатан катта солиштирма қаршиликли материални олиш имкониятини берди. $p_0, n_0 \ll N_d^{++}N_a^{--}$ шarti бажарилгани учун киришма атомларнинг ионларини экранловчи потенциал бўлмайди ва ионларнинг потенциалларини ўзаро бирикишига сабабчи бўлади. Ионлар потенциалини ўзаро бирикиши компенсацияловчи киришма атомларининг концентрацияси ортиши билан яққол намоён бўлди. Бундай материалларда ковак τ_p ва электронларнинг τ_n яшаш вақтлари бир-бирига нисбатан сезиларли ўзгараши аниқланган.

Киришма атомлар кластерларининг наноструктураларининг кремний материали ҳажмидаги концентрациясини бошқариб, бошланғич кремний намуналарининг фундаментал параметрларини ўзгартириш мумкинлиги ва бу асосида наноэлектроникада янги синф асбобларини яратиш имкониятлари мавжудлиги кўрсатиб берилган. Бу амалда янги квант ўлчамидаги структура (наноҳажмли кластер)ларни кремний материалида олиш имконини беради. Кластерларни кремнийда ҳосил қилиш усулларини билиш, киришма атомларнинг ўзаро таъсири ҳамда структура ва комплекслари концентрациясининг кристалл панжарадаги ҳолатини бошқариш қонуниятлари аниқланган ва таҳлил қилинган.

Кремнийда киришма атомларнинг ўзаро шаклланиш механизмларини таҳлил қилиш, кучли легирланган кремнийнинг мувозанатда бўлмаган ҳолатининг шаклланишидаги қулай термодинамик шарт-шароитларни аниқлаш тадқиқотнинг асосий долзарб масалаларидан эканлиги очиб берилган. Яримўтказгич кремнийнинг электрофизик параметрлари нобарқарор ҳолатларида вужудга келадиган физик жараёнлар ўрганилиб, уларни ҳал қилишдаги муаммоларнинг ечимини аниқлаш доирасида диссертация ишининг режаси шакллантирилган.

Диссертациянинг «**Кучли компенсацияланган кремний олишнинг қулай термодинамик шарт-шароитлари**» деб номланган иккинчи бобида, кремний ҳажмида киришма атомларнинг нанокластерлари шаклланишининг термодинамик ва технологик шароитлари янги технология асосида аниқланган натижалари берилган. Ҳажмий кластерларнинг шаклланиши киришма атомларнинг ўзаро кремний кристалл панжараси билан таъсирланиши ҳисобига ҳосил бўлиши аниқланган. Киришма атомларнинг ўзаро таъсирланишидаги қулай термодинамик шартларни билиш орқали ҳажмий нанокластерларнинг шаклланишини бошқариш мумкинлиги очиб берилган. Олинган натижалар асосида бошланғич материалларнинг электрофизик параметрларига, киришма атомларнинг турига, кремнийдаги электрофаоллигига, киришма атомларнинг яримўтказгич кристалл панжарада жойлашиши ҳамда технологик босқичларда ҳароратли ишлов бериш шартларига боғлиқлиги кўрсатиб берилган.

Кучли легирланган яримўтказгич кремнийда компенсация даражаси k -ни ҳисоблаш формуласи қуйидагича ифодаланади:

$$k = \frac{N_{aM}^+}{2N_{a\Gamma}^{--}} \approx 1, \quad k = \frac{N_{aM}^-}{2N_{a\Gamma}^{++}} \approx 1 \quad (1)$$

Бунда k -нинг хусусиятига аниқлик киритиш учун, 3 хил бошланғич p -турдаги кремний материаллари олинди, улардаги бор киришма атомлари ва ковакларнинг миқдори: 1) $p_1 = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ($\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{см}$); 2) $p_2 = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ($\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$); 3) $p_3 = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ($\rho = 1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) га тенг бўлди. Бу материалларга чуқур энергетик сатҳлар ҳосил қилувчи донор киришма атомлар киритилди (масалан, S атомлари). Уларнинг миқдорининг аниқлиги $N_{a\Gamma}^{++} = 0,9995N_a^- = 0,9995 \cdot p$ гача бўлган. Бунинг асосида биринчи турдаги намуналарда чуқур энергетик сатҳ ҳосил қилувчи донор киришмаларнинг қандай миқдорда киритилганлиги аниқланди:

$$2N_{a\Gamma}^{++} = 0,9995 \cdot p_1 = 0,9995 \cdot 2 \cdot 10^{14} = 1,999 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3} \text{ га тенг бўлади.}$$

Иккинчи гуруҳ материаллари учун:

$$2N_{a\Gamma}^{++} = 0,9995 \cdot p_2 = 0,9995 \cdot 2 \cdot 10^{15} = 1,999 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3} \text{ га тенг бўлади}$$

Учинчи гуруҳ материаллари учун:

$$2N_{a\Gamma}^{++} = 0,9995 \cdot p_3 = 0,9995 \cdot 2 \cdot 10^{16} = 1,999 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \text{ га тенглиги аниқланди.}$$

Бу материалларнинг компенсация даражаси:

$$k_1 = \frac{1,999 \cdot 10^{14}}{2 \cdot 10^{14}} = 0,9995, \quad k_2 = \frac{1,999 \cdot 10^{15}}{2 \cdot 10^{15}} = 0,9995, \quad k_3 = \frac{1,999 \cdot 10^{16}}{2 \cdot 10^{16}} = 0,9995 \text{ га тенг}$$

бўлиши аниқланди. Ҳисоботлар натижаси шуни кўрсатадики, k нинг қиймати

барча материалларда $k_1 \approx k_2 \approx k_3$ бир-бирига жуда якин бўлиб, бу материалларда кучли компенсация шarti бажарилди.

Яъни, $k \approx 1$, ёки $(1-k) \ll 1$ ($(1-0,9995) = 0,0005 \ll 1$) га тенг бўлиб, кучли легирланган кремний олиш мумкин бўлди. Бу материалларнинг параметрларини аниқлаш мақсадида баъзи ҳисоблар амалга оширилди. $p_1 = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ бўлган I гуруҳ материаллари учун чуқур энергетик сатҳ ҳосил қилувчи донор киришма атомларининг электронлар миқдори $2N_{ar}^{++} = 1,999 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ бўлганда, компенсацияланмаган коваклар концентрацияси:

$$\Delta p_1 = p_1 - 2N_{ar}^{++} = 0,001 \cdot 10^{14} = 10^{11} \text{ см}^{-3}. \quad \text{га тенг бўлди.} \quad (2)$$

II гуруҳ материаллари учун компенсацияланмаган коваклар миқдори:

$$\Delta p_2 = p_2 - 2N_{ar}^{++} = 2 \cdot 10^{15} - 1,999 \cdot 10^{15} = 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3} \quad \text{га тенг бўлди.} \quad (3)$$

III гуруҳ материаллари учун:

$$\Delta p_3 = p_3 - 2N_{ar}^{++} = 2 \cdot 10^{16} - 1,999 \cdot 10^{16} = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3} \quad \text{га тенг бўлди.} \quad (4)$$

Ҳисоблар шуни кўрсатадики, киришма атомлар киритилганидан сўнг бу материалларнинг солиштирма қаршилиги мос равшда $\rho_1 \approx 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, $\rho_2 \approx 2 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, $\rho_3 \approx 2 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ га тенг бўлди. Бундан кўришиб турибдики, ρ_2 ва ρ_3 охириги икки турдаги материалларда аниқ p -тур кузатилди, биринчи турдаги материалнинг солиштирма қаршилигининг қиймати хусусий ўтказувчанликка якин қийматга эришилди. 1-жадвалда кучли легирланган кремнийнинг бошланғич материалда турли хил бор киришма атомларининг концентрациясига боғлиқ легирлагандаги параметрлари келтирилган (улар тажрибавий натижалар билан деярли мос келди). Натижалар таҳлили шуни кўрсатадики, кучли легирланган кремний олишда бошланғич материал (саёз сатҳ киришма миқдори) параметрлари асосий омиллардан бири ҳисобланар экан.

Яратилган технология асосида кремнийга киритилган киришма атомларининг ҳолати электрон парамагнит резонанс қурилмаси ва атом кучлари микроскопи ёрдамида ўрганилганда киритилган барча киришма атомлар наноструктураларни шакллантиришда иштирок этиши аниқланди.

Киришма атомларнинг кремнийдаги тақсимоти, назарий ҳисоблар ва тажриба натижаларида аниқланган катталиклар асосида бажарилди.

Паст ҳароратли диффузия жараёнида киришма атомларнинг кремнийга кирган чуқурлиги ва концентрациясининг назарий ҳисобларда аниқланган қиймати тажриба натижаларида аниқланганидан сезиларли фарқ қилмади. Яратилган паст ҳароратли диффузия усулида киришма атомларни киритиш самарали бўлиб, наноўлчамдаги структураларни ҳажм бўйича олиш ҳамда уларнинг структура ва ҳолатини бошқариш имконини берди.

Электро парамагнит резонанс қурилмаси, микрофотография усули, атом кучлари микроскопи ёрдамида олинган ҳамда ҳажмда нанокластерлар шаклланишининг термодинамик ва технологик шарт-шароитлари асосида аниқланган илмий тадқиқотлар натижаларининг таҳлили асосида, кремнийда киришма атомлар нанокластерлари ҳосил бўлиши аниқланди.

Марганец киришма атомларининг бошланғич кремнийдаги бор атомлари концентрациясига боғлиқ ҳолда материал параметрларининг ўзгариши

Бошланғич материал параметрлари			Компенсация шарти		Кучли легирланган яримўтказгич параметрлари			
Тип	ρ , Ом·см	Коваклар миқдори, см ⁻³ , ρ	Чуқур марказлар миқдори, см ⁻³ , $2N_a^{++}$	Компенсация даражаси, k	Тип	ρ , Ом·см	Коваклар миқдори, см ⁻³ , ρ	$\frac{N_{dr}^{++}}{P}$
p	100	$2 \cdot 10^{14}$	$1,999 \cdot 10^{14}$	0,9995	i	$2 \cdot 10^5$	$< 10^{11}$	$> 2 \cdot 10^3$
p	10	$2 \cdot 10^{15}$	$1,999 \cdot 10^{15}$	0,9995	p	$2 \cdot 10^4$	10^{12}	$2 \cdot 10^3$
p	1	$2 \cdot 10^{16}$	$1,999 \cdot 10^{16}$	0,9995	p	$2 \cdot 10^3$	10^{13}	$2 \cdot 10^3$
p	0,1	$2 \cdot 10^{17}$	$1,999 \cdot 10^{17}$	0,9995	p	$2 \cdot 10^2$	10^{14}	$2 \cdot 10^3$
p	0,01	$2 \cdot 10^{18}$	$1,999 \cdot 10^{18}$	0,9995	p	20	10^{15}	$2 \cdot 10^3$
p	100	$2 \cdot 10^{14}$	$1,999 \cdot 10^{14}$	0,9995	i	$> 2 \cdot 10^5$	$(2 \div 3) \cdot 10^{10}$	10^4
p	10	$2 \cdot 10^{15}$	$1,9999 \cdot 10^{15}$	0,99995	i	$> 2 \cdot 10^5$	$(2 \div 4) \cdot 10^{10}$	$\sim 10^5$
p	1	$2 \cdot 10^{16}$	$1,99999 \cdot 10^{16}$	0,999995	i	$> 2 \cdot 10^5$	$(2 \div 4) \cdot 10^{10}$	$\sim 10^6$
p	0,1	$2 \cdot 10^{17}$	$1,99999 \cdot 10^{17}$	0,9999995	i	$> 2 \cdot 10^5$	$(2 \div 6) \cdot 10^{10}$	$\sim 10^7$
p	0,01	$2 \cdot 10^{18}$	$1,99999 \cdot 10^{18}$	0,99999995	i	$> 2 \cdot 10^5$	$(2 \div 7) \cdot 10^{10}$	$\sim 10^8$

Мисол учун марганец киришма атомлари кремнийда ўзаро бир-бири билан яқин, кристалл панжарада тугунлараро жойлашиб, бор киришма атоми атрофида кўп зарядли марказ ҳосил қилар экан $[(Mn)_4^{+n} B^-]^{+(n-1)}$.

Термодинамик легирлаш шарт-шароитларини бошқариб, киришма атомларнинг ҳолатини, ҳаттоки, кремний материалининг физик хусусиятларини ўзгартириш мумкин экан. Ишлаб чиқилган технология асосида ноёб хусусиятга эга бўлган яримўтказгич материалларни олиш имконияти мавжудлиги кўрсатилди. Киришма атомлар билан компенсацияланган ва кучли легирланган материал олишда ҳар бир турдаги киришма атоми учун қулай электрофизик параметрларга эга бошланғич намуна мавжуд бўлиб, диффузия жараёнида газ босими ва ҳароратни бошқариб, максимал электрофаол киришма атомларни киритиш ҳамда бошланғич кремний материалининг сиртидаги эрозияни йўқотиш ҳамда электрофизик параметрлари такрорланувчи материални олиш имкониятлари аниқланди.

Яратилган паст ҳароратли икки босқичли диффузион технология кремний сиртида нафақат киришма металл элементларининг силицидлари бўлмаслигини, балки сиртда ҳосил бўладиган эрозия ва бошқа нуқсонларнинг сирт ва сирт олди қисмида ҳосил бўлмаслигига олиб келди. Бу диффузион технология киришма атомларнинг кремний панжарасида жойлашишига ва ўзаро таъсирлашишида қулай шарт-шароитларнинг вужудга келишига сабаб бўлди.

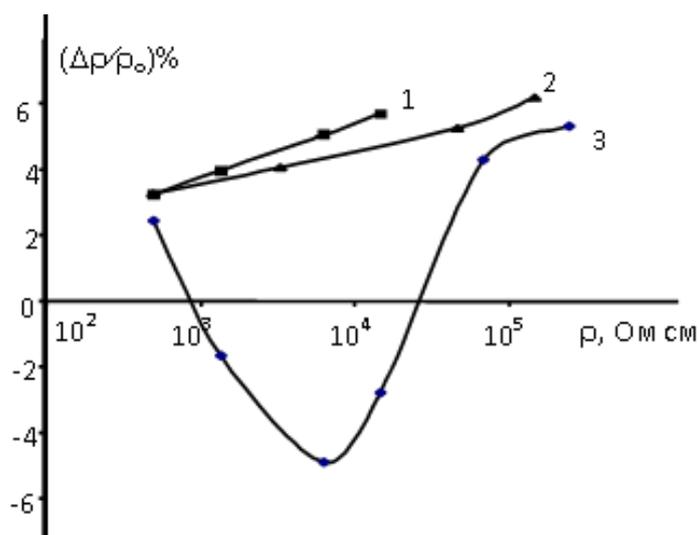
2-жадвал

Турли киришма атомларини киритиб кучли легирланган кремнийнинг параметрларини нобарқарор ҳолатда олишнинг оптимал шароити

Киришма	Бошланғич материал		Диффузия ҳарорати $T, ^\circ C$	Диффузиант буғининг босими, атм.
	$\rho, \text{Om} \cdot \text{cm}$	Тип		
Mn	2–5	p	1140–1180	0,8-1
Zn	1–2	n	1120–1150	1-1,2
S	1–2	p	1180–1200	1-1,1
Se	0,5–1	p	1220–1250	1-1,1
Ni	40–60	n	1200–1250	-
Cr	10	p	1240–1250	-
Fe	10	p	1180–1200	-

2-жадвалда кучли легирланган кремнийнинг электрофизик параметрларининг бошланғич материалнинг параметрларига нисбатан ўзгариши ҳамда диффузия ҳарорати, вақти ва киришма атомларнинг кремнийдаги табиатига боғлиқ электрон ва ковак ўтказувчанликка эга бошланғич кремний материали асосида параметрлари нобарқарор ҳолатда бўлган компенсацияланган кремнийни олиш тўғрисидаги маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «Киришма атомлари билан легирланган кремнийни магнит хусусиятларини ўрганиш» деб номланган учинчи бобида марганец ва хром киришма атомлари киритилган кремнийнинг магнит хусусиятларини ўрганиш натижалари берилди. Киришма атомларининг ҳажмий нанокластерларини яримўтказгич материалнинг хоссаларига таъсирини аниқ билиш ҳамда кузатилган физик ҳодисаларнинг табиати ва механизмини аниқлаш ва солиштириш мақсадида технологик жараёнларда кластерлар ҳосил қилмай яримўтказгич материалда алоҳида атом кўринишида бўладиган киришма атомларни киритиб юқоридаги тажрибалар параллел тарзда амалга оширилди.



1 – Si; 2 – Si<B,Mn> n-тур; 3 – Si<B,Mn> p-тур.

1-расм. $E=100$ В/см бўлганда, магнит қаршиликнинг намуна солиштирма қаршилигига боғлиқ ўзгариши $H=15$ кЭ.

Солиштирма қаршилиги $\rho \geq 5 \times 10^2 \div 6 \times 10^4$ Ом×см бўлган p-турдаги марганец атомлари билан кучли легирланган кремний намуналарида манфий магнит қаршилик кузатилди (ММҚ). ММҚ солиштирма қаршилиги $\rho = (5 \div 7) \times 10^3$ Ом×см бўлган намуналарда максимал қийматга эришди ва $\Delta\rho/\rho$ (6-7)% ни ташкил этди. Намуна солиштирма қаршилигининг қиймати ошиши билан ММҚнинг қиймати камайиши кузатилди. Намуналарнинг солиштирма қаршилиги $\rho = 10^4 \div 5 \times 10^3$ Ом×см бўлганда, ММҚ кузатилмай, фақат мусбат магнит қаршилик (МсМҚ) кузатилди.

Марганец атомлари билан компенсацияланган кремний намуналарида ММҚнинг қиймати кўйилган электр майдон кучланишининг ошиши билан ошиб бориб, $E=120 \div 130$ В/см бўлганда ўзининг максимал қийматига етди. Сўнгра электр майдон кучланиши ошиши билан ММҚнинг қиймати камайиб $E=250$ В/см да магнит қаршилик ишораси ўзгаради, яъни ММҚ \rightarrow МсМҚ га ўтди. Бундай намуналарда МсМҚ хона ҳароратида максимал қийматига эришди. Ҳароратнинг ошиши ёки камайиши ММҚнинг камайишига олиб келди. Компенсацияланган Si<B,Mn> намуналарда ММҚ ни кузатишда

монохроматор ёруғликнинг $h\nu > 0,5$ эВ энергиясидан катта энергия билан ёритилганда, ММҚ қийматининг сезиларли даражада ошиши, яъни ММҚнинг ёруғлик таъсирида 5-6 барабар кучайиш эффекти кузатилди. Ёруғлик таъсирида магнит қаршиликни бошқаришнинг яна бир имконияти, бу магнит қаршиликнинг табиатини ўзгартириши экан, яъни ММҚ ёруғликнинг маълум қийматларида МсМҚ га ўтди. Бу ходиса ҳозиргача яримўтказгич материалларда кузатилмаган янги ва қизиқ физик ҳодисадир.

3-жадвал

Киришма атомлар турига боғлиқ равишда кучли легирланган кремнийда кузатилган магнит ҳодиса ва эффектлар

Кучли легирланган яримўтказгич	Солиштирма қаршилиги ρ , Ом·см	В,Тл	Т,К	Мусбат магнит қаршилик	Манфий магнит қаршилик	Ғайри-оддий (аномал) ҳодисалар
Si<Mn>	$4 \cdot 10^3 \div 10^5$ p-тип $5 \cdot 10^4 \div 10^5$ n-тип	0,4- 2	320-120	Кучли даражада	Кучли даражада	АЭХ
Si<Cr>	$10^4 \div 10^5$ p-тип $5 \cdot 10^4 \div 10^5$ n-тип	0,4- 2	320-150	Кам микдорда	Кам микдорда	-
Si<Fe>	$10^4 \div 10^5$ p-тип $5 \cdot 10^4 \div 10^5$ n-тип	0,4- 2	320-150	Кам микдорда	Кам микдорда	-
Si<Co>	$10^4 \div 10^5$ p-тип $5 \cdot 10^4 \div 10^5$ n-тип	0,4- 2	320-150	Кам микдорда	Кам микдорда	-

Марганец атомлари билан компенсацияланган кремнийда ММҚнинг нафақат ёруғлик таъсирида кучайиши, балки монохроматик ва интеграл ёруғлик билан ёритилганда ММҚнинг қиймати ва тавсифи ўзгаришининг қонуниятлари ҳам аниқланди. Марганец атомлари киритилган намуналардаги ММҚ бошқа яримўтказгич материалларда кузатилганлардан ажралиб туриши бу материални ММҚнинг табиати алоҳидалиги билан тушунтирилди. Олинган натижалар янги ва истиқболли илмий йўналиш—магнит ҳажмий кластерли яримўтказгичларнинг физикасида янги соҳанинг очилишига сабаб бўлди.

ММҚнинг табиатини ва амалиётда қўлланиш соҳаларини аниқлаш мақсадида, ММҚ га ҳарорат таъсири ўрганилди. Марганец атомлари билан компенсацияланган кремнийда параметрлари нобарқарор бўлган ММҚ етарлича катта $T=77 \div 350$ К ҳарорат оралиғида кузатилди. Ҳарорат $175\text{К} < T < 350\text{К}$ оралиғида ММҚнинг ишораси ўзгариб, ММҚ→МсМҚ ўтиши кузатилди. Магнит қаршиликнинг ҳарорат таъсирида ўзгариши ретроген тавсифга эга бўлиб, ҳароратни $T > 350$ К дан камайиб боришида ММҚ сезиларли даражада тез ошди ва $T=230-240$ К оралиғида ўзининг максимал

қийматига эришди. Бунда ММҚнинг қиймати $\frac{\Delta\rho}{\rho} \sim 300\%$ гача ошиши кузатилди ва ҳарорат камайишининг давом этиши билан ММҚнинг қиймати камайиб бориб, $T=170-175\text{K}$ да манфий магнит қаршиликнинг ишораси ўзгариб, кичик қийматдаги мусбат магнит қаршилик (МсМқ) кузатилди. Бошқа яримўтказгичларда паст ҳароратларда кичик қийматларда (6–10%) ММҚ кузатилган бўлса, марганец киришма атомлари киритилган намуналарда ғайриоддий катта қийматдаги ММҚ кузатилди. Бу физик ҳодисани нобарқарор бўлган компенсацияланган кремнийдаги «Юқори ҳароратли ММҚ эффекти» деб қараш мумкин. Худди шундай натижалар хром, темир, кобальт киришма атомлари билан кучли легирланган кремний материалида ҳам тадқиқ қилинди. Лекин бу материалларда кузатилган ММҚ ва МсМқ лар нисбатан кичик қийматларга эга эканлиги кўрсатилди.

Хром, темир, кобальт киришма атомлари билан кучли легирланган кремний материалида ҳам марганец киришма атомлари каби магнит майдон таъсирига сезгирлиги ҳамда ММҚ ва МсМҚ кузатилди ва ҳар томонлама ўрганилди. Олинган тажриба натижалари 3-жадвалда берилди. Бу жадвалдан кўриниб турибдики, нафақат марганец киришма атомлари билан кучли легирланган, балки хром, темир, кобальт киришма атомлари киритилган кремний материаллари ҳам магнит сезгир хусусиятга эга бўлар экан.

ММҚнинг киришма атомларнинг концентрациясига боғлиқлигини ўрганиш натижалари, ММҚ ни бошқариш имкониятини бериш билан бирга, кучли легирланган материалдаги ҳажмий нанокластерлар ММҚ кузатилишида асосий сабабчи эканлиги аниқланди. Кучли легирланган кремнийнинг нобарқарор бўлган ҳолатида олинган ММҚнинг тажрибада олинган натижаларини яримўтказгичлар физикасидаги мавжуд назария асосида тушунтириб бўлмайди.

Бу ўрганилаётган нобарқарор бўлган намуналардаги ММҚ Лоренц ва Шикнинг магнит майдон кучланганлигининг потенциали ҳамда магнит қаршиликнинг кучсиз локаллашган потенциали билан тушунтирилди. Кучли легирланган кремнийдаги магнит қаршиликнинг ўзгаришини қуйидагича ифодалаш мумкин

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_1 + \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_2 - \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_3 - \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\text{кучли локаллашуви}} \quad (5)$$

Бунда: 1 – Лоренцнинг мусбат магнит қаршилиги; 2 – Шик модели асосида бир жинсли бўлмаган яримўтказгичнинг МсМҚ; 3 – Алтшуллер модели асосида ММҚ кучсиз локаллашуви; 4 – ММҚнинг ҳажмий нанокластерлардаги кучли локалланиши билан боғлиқлиги.

Олинган натижаларнинг таҳлили асосида ҳажмий нанокластерли намуналардаги ток ташувчи ковакларга магнит ва электр майдон таъсири бир-бирига нисбатан тескари бўлиши аниқланди.

Ковакларнинг ҳаракатчанлиги кичик бўлиши, ҳажмий нанокластерли кремний намуналарига электр ва магнит майдон таъсир қилганида коваклар

тўғри ҳаракат траекториясини ўзгартириб, ҳаракатчанликнинг қиймати камайар экан.

Ташқи электр майдон ММҚ га тескари таъсир кўрсатади, яъни ҳажмий нанокластерлар ҳосил қилган ички потенциални камайтиради. Лекин шуни эсдан чиқариш керак эмаски, электр майдон кучланганлиги ортиши билан унга мос равишда магнит майдон ҳам ортди.

Намуналарнинг сиртини интеграл ёруғлик билан ёритганда электрон-ковак жуфтлигининг генерацияси вужудга келади ва ҳосил бўлган электронлар қайта коваклар билан рекомбинация қилмасдан кўп зарядланган ҳажмий нанокластерларда ушлаб қолинади. Бунда ҳажмий нанокластерларнинг заряд қиймати камайди ва магнит сезгирлик даражаси пасайди.

Диссертациянинг **«Яримўтазгич кремний материали параметрларининг нобарқарор ҳолатида фотоэлектрик ҳодисалар»** деб номланган тўртинчи бобида кремнийда ўтиш гуруҳларидаги атомларнинг электрфаол концентрациялари ва эрувчанлигини ўрганишдаги тажриба натижалари келтирилган. Шу кунга қадар яримўтказгич материалларда кузатилган Фўнинг ИҚ нурлар таъсирида сўниш механизми тақиқланган соҳада иккита чуқур энергетик сатҳлар мавжудлиги билан тушунтирилган. Унга асосан, бу икки энергетик сатҳда ток ташувчиларнинг ютиш юзасининг ўзаро ассиметрик бўлиши $S_n \gg S_p$ ҳамда E_p -рекомбинация марказининг мавжуд бўлиши шарт. Таклиф этилган модел асосида ИҚ нурлар таъсирида Фўнинг сўнишига фотонлар энергияси таъсирида асосий бўлмаган ток ташувчиларни ушлаб қолган энергетик сатҳлардан электронларнинг ўтказувчанлик ёки ковакларнинг валент соҳаларга чиқиши билан тушунтирилган. $h\nu < E_g$ да ИҚ нурлар таъсирида Фўнинг максимал сўниши кузатилган. Бунда иккиланган оптик ўтиш бошланади, яъни $h\nu < E_g - E_0$ бўлиб, $E_g - E_0$ – тақиқланган соҳа кенглиги. ИҚ нурлар таъсирида Фў сўнишининг даражаси қуйидаги формула ёрдамида аниқланди:

$$K = \sqrt{\frac{S_{Rp}}{S_{mp}}} \quad (6)$$

Бунда: S_{Rp} ва S_{mp} – ковакларнинг рекомбинацион ва ёпишиб олувчи сатҳдаги ютиш юзалари. Илмий тадқиқот натижаларининг таҳлили асосида Фўни ИҚ нурлар таъсирида сўниш механизмини тушунтирувчи икки энергетик сатҳли моделда компенсацияланган кремнийда олинган натижаларни сифат жихатидан тушунтирса-да, аммо бир қанча қарама-қаршилиқлар мавжудлиги бу модел асосида Фўнинг ИҚ нурлар таъсирида сўниши механизмини тўлиқ тушунтириб бера олмайди. Бунга қуйидагиларни мисол қилса бўлади:

1. Фўнинг ИҚ нурлар таъсирида сўниши фотонлар энергиясини $h = 0.47 - 0.48$ эВ дан бошланиб, кремний материалида иккиланган оптик ўтишлар энергиясининг бошланишига тўғри келмайди. Агарда ток ташувчиларининг ёпишиб олиш энергетик сатҳи $h = 0.4$ эВ га тенг бўлиб, ИҚ нурлар сўниши шу қийматдан бошланса, унда ИҚ нурлар таъсиридаги Фў сўнишининг максимум қиймати $h\nu = E_g - 0.4 = 1.16 - 0.4 = 0.76$ эВ га тўғри келиши керак эди.

2. Фўнинг ИҚ нурлар таъсирида сўниши киришма атомларнинг электрофаол концентрациясига ва солиштира қаршилигига боғлиқлиги кузатилди. Бу ҳолни классик модель асосида тушунтириб бўлмайди.

3. Фўнинг ИҚ нурлар таъсирида сўниш даражаси $K = 10^5 - 10^6$ га тенг бўлиб, бу назарий ҳисоблар асосида ток ташувчилар ёпишиб олувчи энергетик сатҳда ток ташувчи ковакларнинг ютиш юзаси, рекомбинацион сатҳдаги ютиш юзасидан 10^{12} марта катта бўди. Бундай ҳолат амалиётда кузатилмайди, яъни $K = (S_{Rp} / S_{mp})^{1/2}$ формулага асосан, агарда, $S_{Rp} = 10^{-14}$ см⁻² деб қабул қилсак, $S_{mp} \approx 10^{-26}$ см⁻² га тенг бўлади. Ток ташувчиларнинг бундай кичик ютиш юзасининг оддий рекомбинацион сатҳларда бўлиши ғайриоддий ҳол ҳисобланади.

ИҚ нурлар таъсирида Фўнинг сўнишини спектрал боғланиши заряд ташувчиларнинг ёпишиб олувчи энергетик сатҳнинг фотоионизация ютиш юзасининг спектрал боғланиши билан тушунтирилди. Тажриба натижалари асосида марганец атомларини энергетик сатҳ учун $d_m(h\nu)$ доимий хусусий монохрамик нур энергияси билан таъсир қилганда ва $h\nu = 0.4 - 0.5$ эВ оралиқда кузатилди. Ҳисобларнинг таҳлили асосида $d_m(h\nu)$ ни фотонлар энергияси оралиғида 40–60% га ўзгариши аниқланди. Тажриба натижаларини тушунтириш мақсадида иккита энергетик сатҳлар асосидаги модель ва киришма атомларининг фотоионизацияси ютиш юзасининг ўзгариши билан ҳисобланди.

Назарий ҳисоблар ва тажриба натижалари орасида сезиларли тафовут борлиги ҳамда ИҚ нурлар таъсирида Фўнинг сўниши ҳам турлича бўлиши аниқланди. Олинган натижалар асосида марганец киришма атомлари кучли компенсацияланган кремнийнинг тақиқланган соҳасида аниқ қийматга эга энергетик сатҳ ҳосил қилмас экан. Бу киришма атомларининг кристалл панжарада бир хил турғун ҳолатда бўлмаслигини кўрсатди.

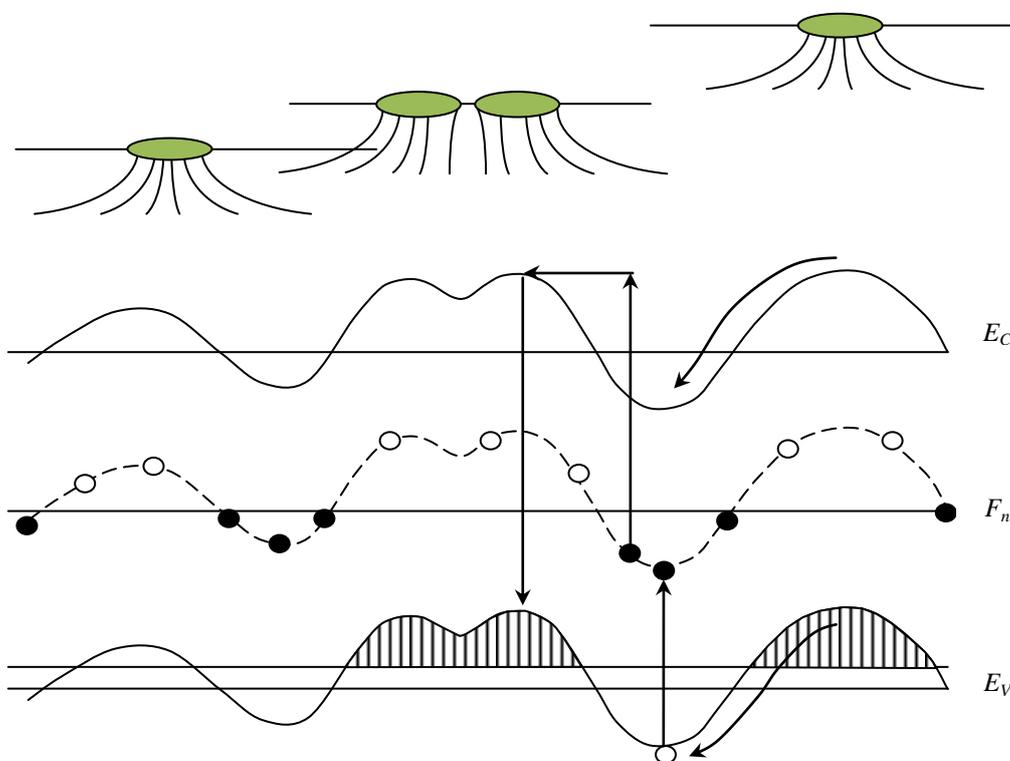
Кучли компенсация ҳолатида ток ташувчиларнинг мувозанатда бўлган концентрацияси киришма атомларнинг ионлашган концентрациясидан ўн миллион мартадан кам бўлиб, ионлашган атомлар атрофида локал экранлашиш бўлмаслиги билан бир қаторда, намуналардаги киришма атомларининг ўзаро ва бошқа нуқсонлар билан таъсирининг бузилишига олиб келар экан. Бу назарияни тушунтириш мақсадида марганец киришма атомлари билан кучли легирланган кремнийда кузатилган Фў ва унинг ИҚ нурлар таъсирида сўниши механизмини тушинтиришда таклиф этилган моделдан фойдаланамиз. Кучли легирланган кремний материалида марганец киришма атомлари $(Mn)_2$ ва $(Mn)_4$ молекулалар ҳамда кластерларнинг вужудга келишига сабаб бўлади. Агар барча марганец киришма атомлари ионлашган бўлса $(Mn)^{++}$, ток ташувчи ковакларнинг кучли итарувчи марказлар ҳосил бўлиб, ток ташувчиларининг ютиш юзасини кучли антисимметрик бўлишга олиб келади $S_n \gg S_p$. Кремнийнинг компенсациялаш даражаси ва марганец киришма атомларининг электрофаол концентрацияси кўп бўлса, итарувчи марказларнинг сони шунча кўп бўлади.

Кремнийда бир вақтнинг ўзида марганец атомларининг Mn^+ , Mn^{++} , $(Mn)_2^{+(2+4)}$, $(Mn)_4^{+(2+8)}$ даражада зарядланган марказларнинг ҳосил бўлиши ва

уларнинг ток ташувчиларга таъсирлари кузатилди. Марганец киришма атомлари билан кучли компенсация қилинган кремнийда компенсация даражаси (Ферми сатҳини жойлашиши) марганец атомларининг электрофаол концентрациясига боғлиқ ҳолда марганец атомларининг зарядланган марказларига сезиларли таъсир кўрсатади ва материалнинг фотоэлектрик хусусиятларининг ўзгаришига олиб келади.

Шундай қилиб, кучли легирланган ҳолатда киришма атомларининг кремний кристалл панжарадаги ҳолатининг сезиларли ўзгариши ҳисобига материалнинг хусусиятлари ўзгарди. Лекин бунда киришма атомлар маълум ҳолатларида турғун бўлиши ҳам кузатилди. Бошланғич материал ва компенсация даражасини ўзгартириб, амалда киришма атомлар ҳолатини, зарядини, энергетик сатҳларнинг қийматларини ҳамда электрофаол концентрациясини бошқариш мумкинлиги кўрсатиб берилди. Олинган тажрибалар таҳлили асосида компенсацияланган кремний намуналарига қўйилган электромайдон кучланганлигининг қиймати фотоэлектр хусусиятларга ҳамда фотосезгирликка кучли таъсир кўрсатиши аниқланди.

Тажриба натижаларининг таҳлили асосида кучли легирланган кремнийнинг нобарқарор бўлган ҳолатида янги тур ўта сезгир ва тезкорлиги юқори ИҚ нур фотоприёмникларни, хотира қурилмаларини ҳамда тезкор оптик улагичларни яратиш мумкинлиги кўрсатиб берилди. Кучли легирланган кремнийда барча марганец киришма атомлар ионлашган ҳолатда бўлиб, ток ташувчи ковакларнинг яшаш вақти электронларнинг яшаш вақтидан сезиларли даражада катта бўлиши $\tau_p \gg \tau_n$ аниқланди.



2-расм. Киришма атомларнинг кучли легирланган кремнийда нобарқарор бўлган ҳолатининг энергетик сатҳ диаграммаси.

**Кучли легирланган кремнийда кузатилган эффектлар
ва фотоэлектрик ҳодисалар**

Киришма тури	Солиштира қаршилиқ ρ, Ом·см	Кузатилган эффектлар	Физик ҳодисаларни кузатиш шартлари		
			T, °C	E, В	J, люкс
Si<Mn>	10 ² ÷ 10 ⁵	Ток ташувчиларнинг ғайри оддий ҳаракатчанлиги	100–350	10–200	10 ⁻³ -10 ²
		N ва S турдаги вольтампер тавсиф	77–300	1÷200	10 ⁻³ -10
		Фотоўтказувчанликнинг ҳарорат таъсирида чуқур сўниши	120–180	10–30	10 ⁻³ -10 ² ; 10 ⁻⁵ -10 ⁻⁹ Вт/см ² бўлганда hν=1,12эВ
		Ток ташувчиларнинг ғайри оддий ҳаракатчанлиги	140–350	20–50	10 ⁻³ -10 ² ; hν=1,12эВ
		Инфрақизил нур таъсирида фотоўтказувчанликнинг сўниши	77–200	10÷50	10 ⁻³ -5·10
		Суперчизикли люксампер тавсиф	77–350	50–250	10 ⁻³ -10
		Юқори хусусий ва киришмали фотоўтказувчанлик	77–200	10–30	10 ⁻³ -10 ; 10 ⁻⁵ -10 ⁻⁹ Вт/см ² при hν=1,12эВ
		Фотоўтказувчанликнинг узок муддатли релаксацияси.	77–150	10–50	10 ⁻³ -50
		Ғайри оддий юқори қолдиқ ўтказувчанлик	77–200	10–50	
Si<Zn>	10 ⁴ ÷ 10 ⁵	N ва S турдаги вольтампер тавсиф	100–260	50÷400	10 ⁻³ -10
		Фотоўтказувчанликнинг ҳарорат таъсирида сўниши	120–180	10–30	10 ⁻³ -10 ² ; 10 ⁻⁵ -10 ⁻⁹ Вт/см ² при hν=1,12эВ
		Фотоўтказувчанликнинг инфрақизил нур таъсирида сўниши	70–200	70÷350	10 ⁻³ -·10
		Суперчизикли люксампер тавсиф	77–200	50–250	10 ⁻³ -10
		Юқори хусусий ва киришмали фотоўтказувчанлик	77–200	10–30	10 ⁻³ -10; 10 ⁻⁵ -10 ⁻⁹ Вт/см ² при hν=1,12эВ
		Фотоўтказувчанликнинг узок муддатли релаксацияси	77–150	10–50	10 ⁻³ -50

		Ғайри оддий юкори қолдик ўтказувчанлик	77–200	10–50	
Si<S>	10 ⁴ ÷ 10 ⁵ p-тур	Ток ташувчиларнинг ғайри оддий ҳаракатчанлиги	100–350	60–300	10 ⁻³ - 10 ²
		N ва S турдаги вольт ампер тавсиф	77–300	1÷300	10 ⁻³ - 10
		Фотоўтказувчанликнинг ҳарорат таъсирида сўниши	77–280	70–300	10 ⁻³ - 10 ² ; 10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁹ Вт/см ² при hν=1,12эВ
		Фотоўтказувчанликнинг инфрақизил нур таъсирида сўниши	77–280	70÷350	10 ⁻³ - 5·10
		Суперчизикли люксампер тавсиф	77–250	50–350	10 ⁻³ - 10
		Юкори хусусий ва киришмали фотоўтказувчанлик	77–200	60–300	10 ⁻³ - 10 ; 10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁹ Вт/см ² при hν=1,12эВ
		Фотоўтказувчанликнинг узок муддатли релаксацияси	77–250	60–350	10 ⁻³ - 80
		Ғайри оддий юкори қолдик ўтказувчанлик	77–200	70–350	10 ⁻³ - 80
Si<Se>	10 ⁴ ÷ 10 ⁵ p-тур 9·10 ⁴ ÷ 10 ⁵ n-тип	Ток ташувчиларнинг ғайри оддий ҳаракатчанлиги	100–300	60-350	10 ⁻³ - 10 ²
		N ва S турдаги вольтампер тавсиф	77–300	1÷350	10 ⁻³ - 10
		Фотоўтказувчанликнинг ҳарорат таъсирида сўниши	77–280	70–350	10 ⁻³ - 10 ² ; 10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁹ Вт/см ² при hν=1,12эВ
		Фотоўтказувчанликнинг инфрақизил нур таъсирида сўниши	77–280	70÷400	10 ⁻³ - 5·10
		Суперчизикли люксампер тавсиф	77–250	50–400	10 ⁻³ - 10
		Юкори хусусий ва киришмали фотоўтказувчанлик	77–200	60–400	10 ⁻³ - 10; 10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁹ Вт/см ² при hν=1,12эВ
		Фотоўтказувчанликнинг узок муддатли релаксацияси	77–250	60–450	10 ⁻³ - 80
		Ғайри оддий юкори қолдик ўтказувчанлик	77–200	70–450	10 ⁻³ - 80

Интеграл ёруғлик таъсир қилганда ҳосил бўлган электрон-ковак жуфтлигидаги электронлар марганец атомларининг мусбат марказларида ютиб қолинади. Коваклар валент соҳасининг потенциал чўккиларида жойлашади ёки ток ташишда иштирок этади. Бунда ковакларнинг яшаш

вакти ва фотосезгирлиги, асосан, зарядланган марганец молекулалари $(Mn)_4^{++}$ ҳосил қилган мусбат зарядланган марказларда электронларни қанчалик ютиб қолиши билан тавсифланади. Ковакларнинг монополяр инъекция ҳолатида марганец ионларининг заряди деярли ўзгармайди, шунинг учун ёруғликнинг жуда кичик қийматларида ҳам коваклар инъекцияси туфайли фотосезгирликнинг сезиларли ўсишига олиб келади.

Тажриба натижаларини кремнийга киритилган киришма марганец атомларининг мусбат ионлаши билан (Mn^0, Mn^+, Mn^{++}) тушунтириб бўлмайди. Яратилган технология асосида олинганда кучли легирланган кремний ҳажмида марганец атомлари ҳосил қилган нанокластерлар асосида $((Mn)_4^{+n} B^-)^{+(n-1)}$ кучли мусбат зарядланган ва кучли магнит моментга эга марказлар вужудга келар экан. Кучли легирланган кремнийда кўп зарядланган нанокластерларнинг мавжудлиги замонавий пароманит резонанс ва атом кучлари микроскопидан фойдаланиб олинган тажриба натижалари асосида ҳам тасдиқланган.

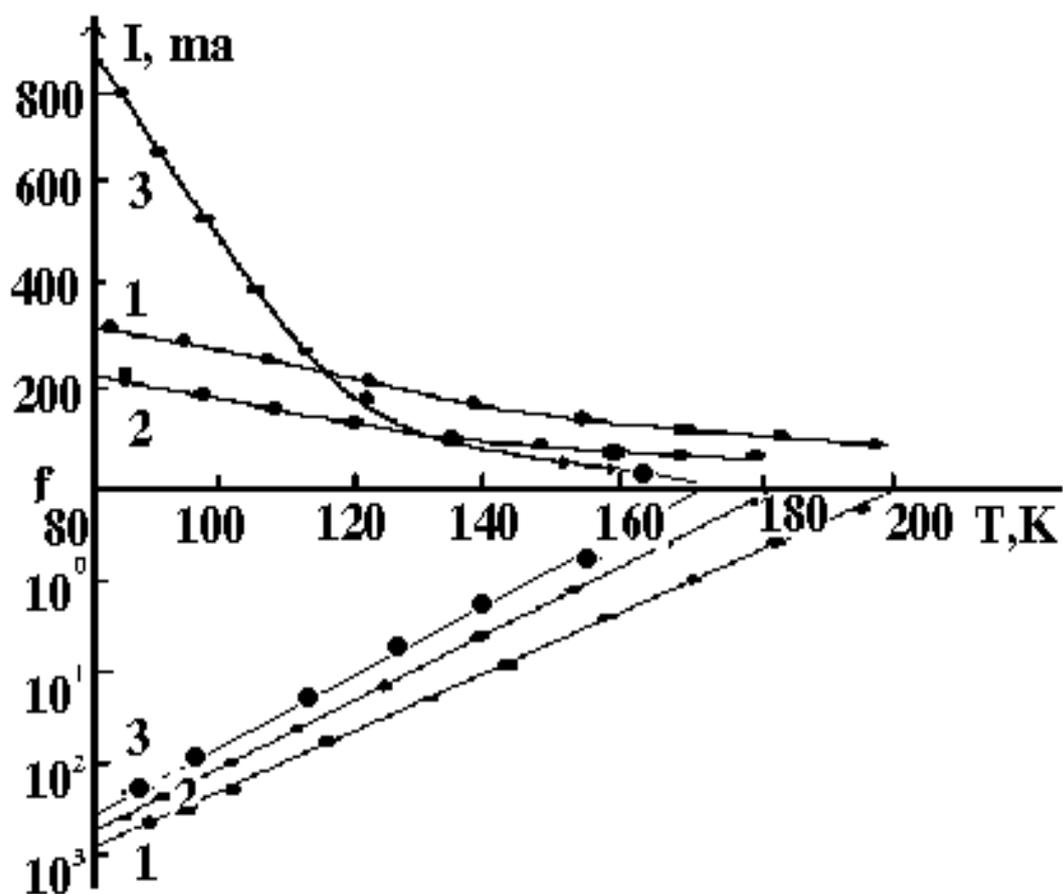
Олинган натижалар асосида кучли легирланган кремнийда марганец киришма атомлари ҳосил қилган нанокластерлар ҳисобига кузатилган физик ҳодисаларнинг такрорловчи материалларини олиш технологияси яратилди. Бунга компенсацияланган кремнийнинг тақиқланган соҳасида заряд ташувчиларнинг ютиш юзалари турли бўлган энергетик сатҳларни ҳосил қилувчи киришма атомларни диффузия қилиш орқали эришилди.

Диссертациянинг «**Кучли легирланган кремнийда токнинг турғун ва такрорланувчи автотебранишлари вужудга келишининг термодинамик шарт-шароитларини аниқлаш**» деб номланган бешинчи боби кучли легирланган кремнийда кузатилган токнинг автотебранишларини ўрганишга бағишланган. Кучли легирланган материалларидаги токнинг автотебранишлари ҳарорат, электр майдон ва ёруғликнинг кенг қийматлари оралиғида кузатилди.

5 -жадвал

Турли хил киришма атомлари билан кучли легирланган кремнийда кузатилган ток тебранишлари

№	Материал	Ўтказувчанлик тури	Солиштирма қаршилиги, Ом·см	Ёруғлик		Ҳарорат соҳаси, Т, К
				Монохроматик $I_{\gamma}, \text{Вт/см}^2\text{с}$	Интеграл $I, \text{лк}$	
1	Si<Mn>	n	$8 \cdot 10^4 \div 2 \cdot 10^5$	$10^{-7} \div 10^{-5}$	$10^{-3} \div 50$	80÷200
		p	$5 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^5$	$10^{-9} \div 10^{-5}$	$10^{-3} \div 50$	80÷200
2	Si<Zn>	n	$10^2 \div 2 \cdot 10^5$	$10^{-8} \div 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3} \div 50$	80÷180
3	Si<S>	p	$3 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^5$	$10^{-8} \div 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3} \div 10$	80÷160
4	Si<Se>	p	$5 \cdot 10^3 \div 10^5$	$10^{-3} \div 10^{-5}$	$10^{-2} \div 10$	80÷150



1-Si<Mn>, 2-Si<Zn>, 3-Si<S>, $\rho=8 \cdot 10^4$ Ом·см, $I=10^{-1}$ лк.

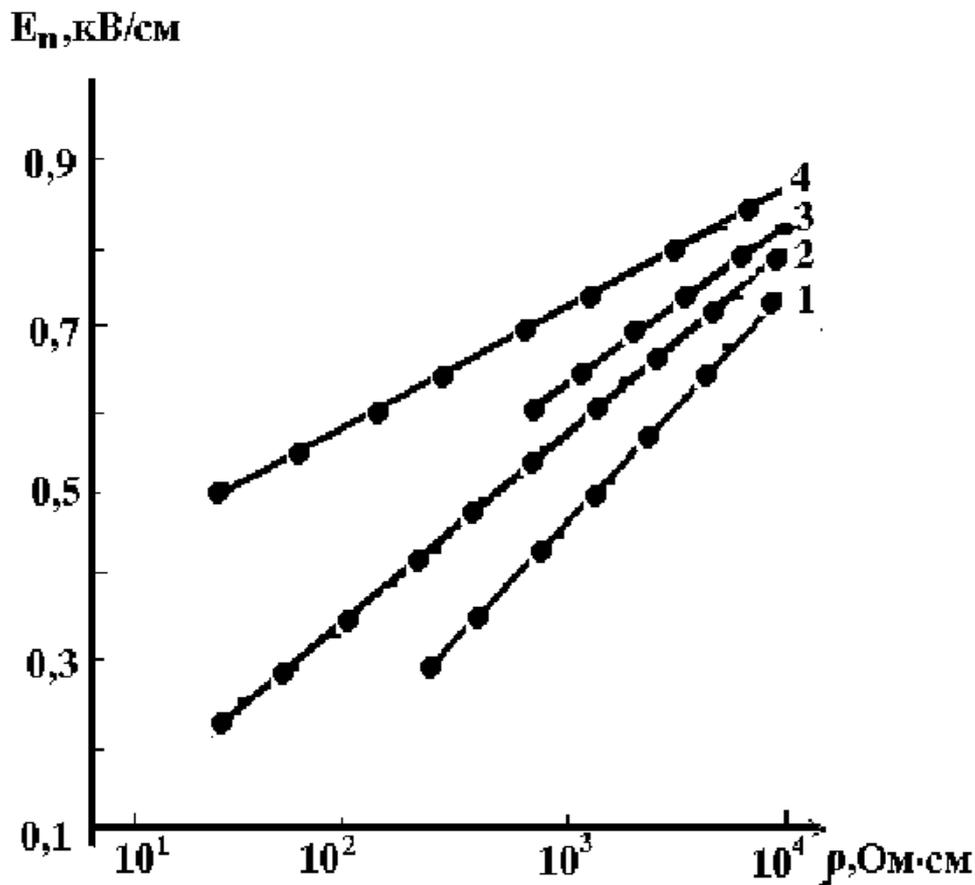
3-расм. Кучли легирланган кремнийдаги автотекранишларнинг ҳароратга боғлиқлиги

Кучли легирланган кремнийда токнинг автотекранишлари бошқа яримўтказгич материалларда кузатилганига қараганда кўплаб хусусиятлари билан фарқ қилди. Уларга қуйидагиларни киритиш мумкин:

токнинг доимий ва такрорланувчи автотекранишлари нафақат хона ҳароратида, балки кенг ҳарорат оралиғида $T=77-350$ К кузатилди (3-расм);

автотекранишларнинг вужудга келишидаги электрмайдон кучланишининг қиймати $E \geq 40$ В/см бўлиб, бошқа материаллардагига солиштирганда 5–10 марта кичиклиги аниқланди (4-расм);

токнинг автотекранишлари қоронғуликда ҳамда интеграл ва монохроматик ИҚ нурлар таъсирида ҳам кузатилди, бунда фотонларнинг $h\nu=0,5$ эВ энергия қийматида частотаси $f=10^{-2} \div 10^5$ Гц гача бўлган автотекранишларни кузатиш мумкин бўлди;



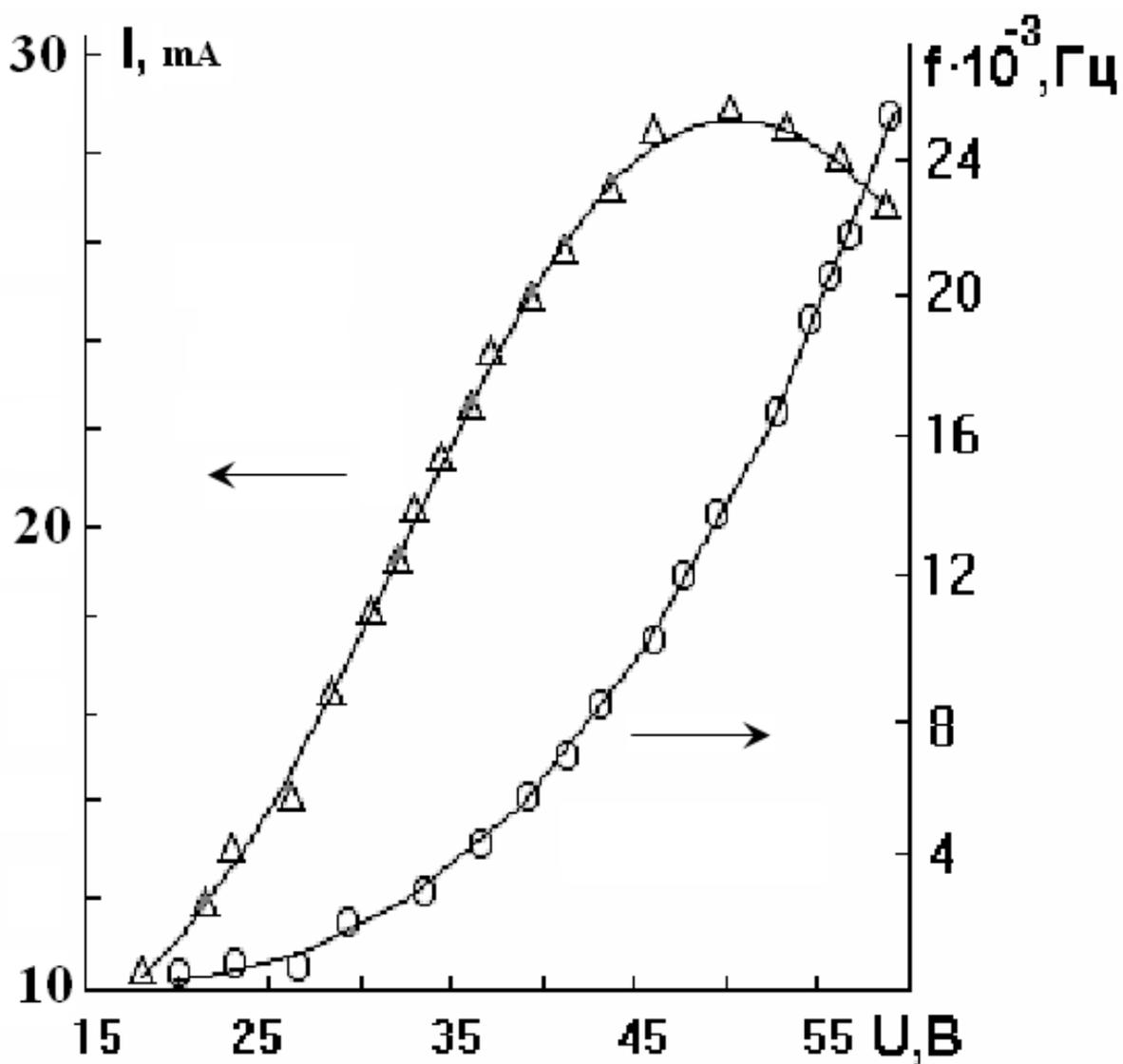
1 - Si<B,Mn>, 2 - Si<P,Zn>, 3 - Si<B,S>, 4 - Si<B,Mn> при $T=80$ К, $I=0,5$ лк.
 4-расм Автотебранишларнинг вужудга келиш кучланишининг материал солиштирма қаршилигига боғлиқлиги.

ток автотебранишлари модуляцияси чуқурлигининг коэффициенти $K=90 \div 100\%$ ни ташкил қилди;

автотебранишларнинг параметрларини узоқ вақт ўзгартирмасдан, керакли шакллари олиш имкониятлари аниқланди;

ток автотебранишларининг параметрлари (амплитуда ва частота) ташқи таъсирларига ўта сезувчанлиги аниқланди;

тажриба натижалари асосида ўлчамлари $1 \times 1 \times 0,5 \text{ мм}^3$ бўлган, параметрлари осон бошқариладиган p^+ - $p(\text{Si}<\text{Mn}>)$ - p^+ инжекцияли структуралар асосидаги қаттиқ жисм генераторларини яратиш имкониятлари таклиф этилди. 5-расмда кучли легирланган кремнийда ток автотебранишларининг амплитудаси ва частотасининг кучланишга боғлиқлиги натижалари берилган.



$T=300$ K, $p^+ - p(\text{Si} \langle \text{Mn} \rangle) - p^+$

5-расм. Инжекцияли структуралардаги автотебранишлар амплитуда ва частотасининг кучланишга боғлиқлиги.

**Кучли легирланган кремнийдаги автотекранишларнинг
киришма атомларининг табиатига боғлиқлиги**

№	Автотекраниш турлари	Материал	ρ , Ом·см	T, К	E_n , В/см	$J_{осв.,лк} \cdot h\nu$, ВТ/см ² с λ , мкм	J_{max} , А	J_{min} , А	f, Гц
1	Ҳарорат – электр автотекраниши	Si<Mn>	$5 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^5$ p-тип $8 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^5$ n-тип	77-200	150-200	$J = 10^{-3} - 50$ лк $I\gamma = 10^{-9} - 10^{-5}$ ВТ/см ² с $\gamma = 1 - 3$, мкм	$3 \cdot 10^{-1}$	$10^{-6} - 10^{-8}$	$10^{-3} - 10$
		Si<Zn>	$10^2 - 2 \cdot 10^5$ n-тип	77-180	150-200	$J = 10^{-2} - 10$ лк $I\gamma = 10^{-7} - 10^{-5}$ ВТ/см ² с $\gamma = 1 - 2,5$ мкм	$2 \cdot 10^{-1}$	$10^{-4} - 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3} - 10$
		Si<S>	$3 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^5$ p-тип	77-160	500-600	$J = 0,1 - 10$ лк $I\gamma = 10^{-8} - 10^{-5}$ ВТ/см ² с $\gamma = 1 - 2$, мкм	1,5	$10^{-4} - 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-3} - 10$
		Si<Se>	$3 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^5$ p-тип	120-300	100-300	$J = 0,05 - 30$ лк $I\gamma = 10^{-8} - 10^{-5}$ ВТ/см ² с $\gamma = 1 - 2$, мкм	1,5	$10^{-4} - 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-3} - 10$
2	Рекомбинацион тўлқин автотекраниши	Si<Mn>	$5 \cdot 10^2 - 10^5$ p-тип $10^3 - 10^5$ n-тип	200-350	30-100		10^{-4}	10^{-5}	$10^{-3} - 10^{-4}$
		Si<Zn>	$7 \cdot 10^3 - 7 \cdot 10^4$ n-тип	260-350	50-80		$10^{-5} - 10^{-6}$	10^{-6}	$10^{-3} - 10^{-4}$
		Si<S>	$10^2 - 10^5$ p-тип	240-350	40-1300		10^{-4}	$10^{-5} - 10^{-6}$	$10^{-3} - 10^{-4}$
		Si<Se>	$3 \cdot 10^3 - 10^5$ p-тип	120-260	30-600	$J = 0,05 - 30$ лк $I\gamma = 10^{-8} - 10^{-5}$ ВТ/см ² с $\gamma = 1 - 2$, мкм	0,5	$10^{-4} - 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-3} - 10$
3	Инжекцион автотекраниш	Si<Mn>	$5 \cdot 10^2 - 10^5$ p ⁺ -p-p ⁺	77-350	20-50		$8 \cdot 10^{-1}$	$10^{-3} - 10^{-4}$	$10^{-2} - 5 \cdot 10^{-4}$
		Si<Se>	$3 \cdot 10^3 - 10^5$ p ⁺ -p-p ⁺	260-300	30-200	$J = 0,05 - 30$ лк $I\gamma = 10^{-8} - 10^{-5}$ ВТ/см ² с $\gamma = 1 - 2$, мкм	0,5	$10^{-4} - 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-3} - 10$

Диссертациянинг «Киришма атомлари билан кучли легирланган кремний асосида электроникада янги функционал имкониятларга эга асбоблар ва датчикларни яратиш» деб номланган олтинчи бобида, кучли легирланган кремнийни олишда яратилган диффузион технология асосида нанокластерларнинг ҳосил бўлиши натижасида, киришма атомларнинг кристалл панжарадаги ҳолати, жойлашиш, шаклини аниқ билиш ва бошқариш имкониятлари очиқ берилди. Яратилган диффузион технология асосида бошланғич кремний намуналарининг электрофизик параметрларини бошқариб, керакли материалларни кенг қўламда ишлаб чиқариш мумкинлиги кўрсатиб берилди.

7-жадвал

Кучли легирланган кремнийда кузатилган автотекранишлар асосида таклиф этилган датчиклар

Қўлланиш соҳаси	Электр майдон сезгирлиги	Частота сезгирлиги	Автотекраниш амплитудасининг сезгирлиги	Автотекраниш частотасининг сезгирлиги
Ҳарорат датчик	$-(2\div 5)$ В/см·К	$(2\div 4)\cdot 10^2$ Гц/К	$(2\div 5)\cdot 10^{-6}$ А/К	$(2\div 4)\cdot 10^2$ Гц/К
Фотодатчик	$-(4\div 6)$ В/см·лк	$(3\div 5)\cdot 10^2$ Гц/лк	$(3\div 5)\cdot 10^{-6}$ А/лк	$-(3\div 5)$ Гц/лк
Тензодатчик	$-(3\div 5)\cdot 10^{-8}$ В/см·Па	$(2\div 5)\cdot 10^{-8}$ Гц/Па	$(2\div 5)\cdot 10^{-10}$ А/Па	$-(1\div 3)\cdot 10^{-5}$ Гц/Па
Магнитодатчик	$-(2\div 5)\cdot 10^{-3}$ В/см·Эр	$-(5\div 6)\cdot 10^{-3}$ Гц/Эр	$-(5\div 7)\cdot 10^{-11}$ А/Эр	$(3\div 5)\cdot 10^{-2}$ Гц/Эр

Диссертация ишини бажаришда олинган илмий натижаларни амалиётда қўллаш мақсадида қуйидаги кўп функцияли яримўтказгич асбоблар ва қурилмаларни яратиш имкониятлари таклиф этилди (7-жадвал):

кучли легирланган кремнийнинг нобарқарор бўлган ҳолатида Фўнинг ИҚ нурлари таъсирида сўниш эффекти, ИҚ нурларнинг тўлқин узунлиги $\lambda=1,5\div 6$ мкм оралиғида ўта сезиларлилиги аниқланди. Бу физик ҳодиса асосида хона ҳароратида ишлайдиган фотоприёмникларни яратиш таклиф этилди;

Фўнинг ИҚ нурлар таъсирида сўниш эффекти асосида фон ёруғликда ИҚ нурларни сезадиган фотоприёмникларни яратиш таклиф этилди. Бунда фотоприёмникларнинг ИҚ нурларни сезиши $\lambda=1,5 \div 4$ мкм тўлқин узунлиги оралиғида бўлиб, фон ёруғликнинг интенсивлигидан кичик бўлган ИҚ нурларни ҳам сеза олиши аниқланди;

кучли легирланган кремнийда киришма атомларнинг энергетик сатҳлари аниқ дискрет қийматга эга бўлмай, маълум энергетик оралиқда бўлиши аниқланди. Бунинг асосида ИҚ нурларни $h\nu \geq 0,5\text{эВ}$ дан бошлаб сеза оладиган, самарадорлиги юқори бўлган қуёш элементларини яратиш ва

уларнинг ишлаш спектрини сезиларли кенгайтириш имкониятлари очиб берилди;

ўрганилган материалларда кузатилган токнинг автотөбраниш ҳодисаси асосида параметрлари даврий, турғун ва такрорланувчи бўлган қаттиқ жисм генераторларини яратиш таклиф этилди. Бундай генераторларнинг параметрларини ($f=10^{-3}\div 10^5$ Гц, $J=10^{-5}\div 1$ А) кенг ҳарорат оралиғида осон бошқариш мумкинлиги аниқланди.

ХУЛОСА

Диссертация ишини бажаришда кучли легирланган кремний параметрларининг нобарқарор бўлган ҳолатида вужудга келадиган физик жараёнларни ўрганиш, олинган натижаларни таҳлил қилиш ҳамда амалиётда қўллаш соҳаларини аниқлаш асосида қуйидагилар хулоса қилинди:

1. Ҳажмида нанокластерлари бўлган кремний материални олиш технологияси такомиллаштирилди. Яримўтказгич кремнийга турли хил киришма атомларини киритиб, уларнинг табиати ва таъсирини мукамал ўрганиш асосида компенсацияланган кремнийда уч ўлчамли нооструктуралар олиш технологияси яратилди. Киришма атомлар билан кучли легирланган кремнийнинг электрофизик хусусиятлари аниқланди ва уларда ҳосил бўлган нанокластерларда содир бўладиган жараёнлар аниқланди.

2. Яратилган икки босқичли диффузион технология асосида марганец, темир, рух, олтин гугурт, селен киришма атомлари билан компенсацияланган кремнийнинг электрофизик параметрлари нобарқарор бўлган жараёнлар асосидаги янги яримўтказгич материал олинди.

3. Кучли легирланган кремнийда юқори ҳароратларда ($T=180\div 320$ К) манфий магнит қаршилик эффекти аниқланди. ММҚнинг қийматларини киришма атомларининг концентрацияси ва кристалл панжарада жойлашиш табиатига боғлиқлиги аниқланди.

4. Интеграл ва монохрамик ёруғликлар таъсирида манфий магнит қаршиликнинг катта миқдорда ўзгариши аниқланди. ММҚ ишорасининг ёруғлик таъсирида ўзгариши, яъни магнит қаршиликнинг табиатини ўзгартириш ва ММҚнинг энг максимал қийматини олиш мумкинлиги кўрсатиб берилди.

5. Кучли легирланган кремнийда фотоўтказувчанлик ИҚ нурни тўлқин узунлигининг қиймати $\lambda < 4$ мкм дан кичик бўлганда кузатилиши аниқланди ва бундай ФЎ бошқа яримўтказгич материалларда кузатилмаганлиги ҳамда унинг механизмини мавжуд фотоўтказувчанлик назарияси асосида тушунтириб бўлмадлиги асослаб берилди.

6. ФЎнинг ИҚ нурлар таъсирида ғайриоддий катта қийматларда, $\lambda=1,2\div 3$ мкм тўлқин узунлиги оралиғида сўниши ҳамда ФЎни $T=140\div 200$ К оралиғида ҳарорат таъсирида сўниши аниқланди. Бунда токнинг ўзгариши сўниш даражаси 5-7 карра бўлиб, бошқа фотосезгир материалларда олинган натижалар билан солиштирганда $10^3\div 10^4$ марта катта бўлиши аниқланди.

7. Фўнинг жуда катта қолдиқ қийматининг вужудга келиши ва унинг қиймати қоронғуликдаги ток қийматидан $10^7 \div 10^{10}$ даража катта бўлиши кўрсатиб берилди. Қолдиқ ўтказувчанлик эффекти кенг ҳарорат оралиғида, интеграл ёки монохроматик нурлар билан ёритилганда кузатилиши аниқланди.

Қолдиқ ўтказувчанликни тадқиқ қилиш натижасида, кучли легирланган кремнийда фотохотира вужудга келиши ҳамда уни ИҚларнинг интенсивлиги ва спектр таркибига боғлиқ бўлиши кўрсатиб берилган.

8. Кучли легирланган кремнийда параметрлари (амплитуда ва частота) турғун ва такрорланувчи автотекранишлар кузатилган. Мавжуд яримўтказгичли материалларда кузатилган автотекранишлардан фарқли параметрлари нобарқарор бўлган кремний материалида токнинг автотекраниши кенг ҳарорат оралиғида ($T=77-320$ К), жуда кичик электрмайдон кучланишида ($E \geq 40$ В/см) вужудга келиши аниқланган. Автотекранишлар параметрларининг (амплитуда, частота, вужудга келишидаги чегаравий электрмайдон кучланганлигининг қиймати) ҳароратга, электрмайдон қийматига, ёруғликнинг спектри ва интенсивлигига, магнит майдон қийматига, киришма атомларнинг концентрациясига, ўтказувчанлик тури ва табиатига боғлиқлик қонуниятлари аниқланди. Компенсацияланган кремний асосида автотекраниш мухитини яратиш имкониятлари очиб берилган.

9. Кучли легирланган кремнийда компенсация даражаси ва киришма атомларининг кремнийдаги табиати ҳисобига ҳарорат ва радиация таъсирида бошқариб бўлмайдиган нуқсонларни нейтраллаш мумкинлиги аниқланган. Олинган натижалар асосида параметрлари ҳароратга барқарор ва радиацион нурлар таъсирига чидамли материалларни олиш имкониятлари кўрсатилди. Бошланғич кремнийнинг электрофизик параметрларини сақлаган ҳолда, киришма атомларнинг наноструктураларини ҳажмда ҳосил қилиб, кўп функцияли янги тур электрон қурилмаларни яратиш имкониятлари таклиф этилди.

10. Кучли легирланган кремний асосида монохроматик нурларнинг $\lambda=1,5 \div 4$ мкм тўлқин узунлиги оралиғида ишлайдиган фотоприёмникларни яратиш, Фўнинг ИҚ-нурлар таъсирида сўниш эффекти асосида фон ёруғликда ИҚ-нурларнинг кичик қийматларини сезадиган янги тур фотоприёмниклар, параметрлари осон бошқариладиган қаттиқ жисм генераторлари ҳамда ташқи босимни ўлчайдиган тензодатчикларни яратиш имкониятлари кўрсатиб берилган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.28.02.2018.FM/Т.03.05 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ ИМЕНИ
ИСЛАМА КАРИМОВА, НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ
УЗБЕКИСТАНА ИМЕНИ МИРЗО УЛУГБЕКА**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА**

АЮПОВ КУТУП САУТОВИЧ

**НЕРАВНОВЕСНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В СИЛЬНОКОМПЕНСИРОВАННОМ КРЕМНИИ**

01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

докторской (DSc) диссертации по физико-математическим наукам

Ташкент – 2019

Тема диссертации доктора (DSc) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Узбекистан за № В2018.2.DSc/FM122.

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете имени Ислама Каримова.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Ташкентского государственного технического университета по адресу (tdtu.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyonet.uz).

Научный консультант:	Зикриллаев Нурулло Фатхуллаевич доктор физико-математических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Каримов Абдулазиз Вахитович доктор физико-математических наук, профессор Далиев Хожакбар Султанович доктор физико-математических наук, профессор Исмаилов Канатбай Абдремович, доктор физико-математических наук, профессор
Ведущая организация:	Андижанский государственный университет

Защита диссертации состоится «___» _____ 2019 года в ___ часов на заседании Научного совета DSc.28.02.2018.FM./T.03.05 при Ташкентском государственном техническом университете, Национальном университете Узбекистана (Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, дом 2. Здание факультета «Электроника и автоматика» ТГТУ, аудитория № 232. Тел. (+99871) 246-46-00, факс (+99871) 227-10-32, e-mail: tstu_info@edu.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного технического университета (зарегистрирована за № ____). Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, дом 2. Тел. (+99871) 246-03-41.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2019 года.

(Реестр протокола рассылки № ____ от «___» _____ 2019 года.).

М.К.Бахадырханов
председатель Научного совета по
присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н.,
профессор, академик

Б.Э. Эгамбердиев
ученый секретарь Научного совета по
присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н.,
профессор

А.З.Рахматов
зам. председателя научного семинара при
Научном совете по присуждению ученых
степеней, д.ф.-м.н., с.н.с.

ВВЕДЕНИЕ (аннотация докторской (DSc) диссертации)

Актуальность и востребованность темы диссертации. На мировом уровне в области физической электроники ведутся исследования по получению наноматериалов с новыми функциональными возможностями и созданию научных основ технологии их получения. Ведутся как теоретические, так и экспериментальные исследования по определению оптимальных термодинамических условий формирования в решетке кремния нанокластеров и кластерных структур.

На сегодняшний день актуальной проблемой являются определение технологических и термодинамических условий формирования неравновесных процессов в сильнокомпенсированном кремнии и исследование структуры. Если в сильнокомпенсированном кремнии создать неравновесное состояние, то наблюдается ряд интересных новых физических явлений, механизмы и потенциальные возможности которых не изучались до настоящего времени. К ним можно отнести следующие эффекты: высокие электрические, фотоэлектрические, магнитные, температурные и радиационные свойства. При разработке технологии получения материала необходимо решить следующие вопросы: определить оптимальную концентрацию и электрофизические параметры исходного материала, провести выбор условий легирования в зависимости от природы примесных атомов. В диссертационной работе показаны пути решения перечисленных проблем для получения кремния, сильнолегированного атомами переходной группы железа и изовалентными примесями, а также возможность создания новых классов электронных приборов и датчиков на его основе.

В соответствии со Стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан было уделено внимание решению вопросов по внедрению результатов научно-исследовательской, а также инновационной деятельности, созданию эффективных механизмов практических реализаций научных и инновационных достижений на практике¹. Особенно можно отметить осуществление данной деятельности в рамках объявленного Года поддержки активного предпринимательства, инновационных идей и технологий, нацеленного на получение новых научных результатов, отвечающих современным требованиям электроники. В этом плане получение новых перспективных материалов на основе формирования nanoобъемных кластеров в решетке кремния и развитие технологии получения таких материалов для электроники весьма актуальны. Поэтому итогом решения этой проблемы является открытие новых функциональных возможностей кремния с объемными наноструктурами и создание на их основе новых типов полупроводниковых приборов, а также датчиков различного назначения.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению поставленных задач, предусмотренных в Указе Президента РУз

¹ Ш.М.Мирзиёев книга «Миллий тараққиёт йўлимизни қатъият билан давом эттириб, янги босқичга кўтарамиз» /Тошкент «Узбекистан» НМИУ, 2017.-592с./

№ УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 годы», в Постановлении № ПП-2789 от 17 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, 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. Настоящая работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан, по государственным грантам – III. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение, транспорт, машино- и приборостроение».

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации².

Научные исследования в области микроэлектроники и магнетоэлектроники ведутся в известных научно-исследовательских центрах мира – в Мичиганском университете (США), Токийском университете, Цукубском центре передовых технологий (Япония), Физико-техническом институте (Санкт-Петербург, Россия).

По получению новых нанокластерных сильнокомпенсированных материалов и созданию на их основе электронных приборов в мире получены следующие результаты: создана высокотемпературная диффузионная технология управления электрофизическими параметрами полупроводников с помощью введения примесных атомов в кристаллическую решетку (Физико-технический институт, Санкт-Петербург, Россия), переход в ферромагнитное состояние примесного кремния при низких температурах (Квант-функциональный научный центр, Ю. Корея), определены свойства структур в компенсированном кремнии (Геттингенская лаборатория, Германия).

Научные исследования компенсированного кремния и кластеров на их основе ведутся в мире по следующим приоритетным направлениям: разработка диодов с улучшенными параметрами на основе примесных атомов редкоземельных элементов, развитие процесса получения в компенсированном кремнии наноразмерных структур, определение электрофизических свойств сильнокомпенсированных полупроводников и разработка на их основе многофункциональных магнето-, температуро-, фотодатчиков и датчиков давления, обоснование и определение размерозависимых и других квантовых эффектов в трех координатных нанокластерах.

² Formation of Clusters of Impurity Atoms of Nickel in Silicon and Controlling Their Parameters, USA. *Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 4 No. 2, 2014, pp. 23–26. doi: 10.5923/j.nn. 20140402.01. Self_Organization of Nickel Atoms in Silicon *Inorganic Materials*, 2011, Vol. 47, No. 9, pp. 962–964. «Transport Properties of Silicon Doped with Manganese via Low_Temperature Diffusion» *Inorganic Materials*, 2011, Vol. 47, No. 5, pp. 479–483. «Photoconductivity of Silicon with Multicharged Clusters of Manganese Atoms [Mn]₄» USA, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, USA, 2010, Vol. 46. No.3, pp.276-280. Spectral Range of Current Self-Oscillation in Manganese-Doped Silicon // *Technical Physics*. USA, 2006. - №9(51). –P. 1235-1236

Степень изученности проблемы.

Результаты теоретических работ по изучению динамических парамагнитных свойств, входящих атомов и многослойных потенциальных барьеров в сложных многомерных структурах А. Ведяева и его коллег (Московский государственный университет, физический факультет, Россия) показали некоторые пути исследований в новом направлении. Работы У. Устинова и его коллег (IFM, Екатеринбург, Россия) по изучению структуры и теории мультислойных структур высоко оценены и признаны мировыми учеными. Всемирно известны научные исследования в этой области ученых Ю.В. Гуляева, И. Зильбермана (ФЭИ, Россия), А. Сигова, А.И.Морозова (Институт физико-математических проблем им. А.И. Капицы).

Учеными Узбекистана тоже ведутся исследования легированных полупроводников в научной школе академика Р.А. Муминова, под его руководством были созданы кремниевые детекторы для регистрации радиационного излучения. В научной школе под руководством академика М.К. Бахадырханова исследуется влияние различных примесных атомов в кремнии, были всесторонне изучены свойства таких материалов. Академик Академии наук Республики Узбекистан С.З. Зайнабиддинов исследовал механизм образования примесных преципитатов в кремнии, а также природу глубоких уровней. Ведутся исследования по изучению физических свойств полупроводниковых материалов ведущими учеными в других лабораториях – Физико-техническом институте Академии наук Республики Узбекистан, Институте ядерной физики и многих высших учебных заведениях – ТУИТ, ТГТУ, КГУ, СамГУ, ФГУ, АГУ, учеными Национального университета и другими исследователями.

Несмотря на достаточно большое количество работ по разработке технологии получения и исследованию свойств сильнолегированных полупроводниковых материалов, остается малоизученным очень важное и перспективное научное направление, связанное с выявлением в них новых уникальных физических явлений и определением их функциональных возможностей для радиоэлектроники. Полупроводники в крайне неравновесном состоянии – это практически новое научное направление, позволяющее открыть еще не известные грани физики и возможности применения этих материалов. Однако до настоящего времени свойства примесных атомов, образующих объемные заряженные центры в кристаллической решетке кремния, остаются малоизученными.

Изучение природы новых физических явлений, наблюдаемых в этой области, создание их физических механизмов являются новым научным направлением в физике полупроводников и раскрывают новые аспекты физики твердых объектов. На основании анализа полученных научных результатов выяснилось, что переходные процессы кремниевого материала в неравновесном состоянии не изучены, поэтому в диссертации изучены неравновесные процессы в сильнолегированном кремнии и созданы физические механизмы наблюдаемых явлений. В то же время диссертация посвящена открытию возможностей создания новых видов устройств и

физических датчиков с широкими функциональными возможностями.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Исследование было выполнено согласно плану научных исследовательских работ Ташкентского государственного технического университета на основе грантов П-14-009 «Разработка низкотемпературной диффузионной технологии легирования полупроводников и использование этой технологии в электронной промышленности», А-3-73 «Разработка и создание установки для управления распределением и концентрацией кластеров примесных атомов в полупроводниках», Ф2-55 «Разработка научных основ получения объемнонаноструктурированного кремния на основе формирования нанокластеров примесных атомов как нового класса наноматериалов с уникальными функциональными возможностями».

Цель исследования – определение физических свойств сильнокомпенсированного кремния в неравновесном состоянии.

Задачи исследования:

физически обосновать технологии получения неравновесных электрофизических параметров сильнокомпенсированного кремния; определить физические параметры сильнокомпенсированного материала в зависимости от параметров исходного материала и процесса легирования (температура и время диффузии) и влияние технологии на состояние примесных атомов в решетке кремния;

установить оптимальные условия формирования крайне неравновесного состояния внедренных примесных атомов в сильнолегированном кремнии;

выявить оптимальные электрофизические параметры исходного материала в зависимости от природы легирующих примесных атомов;

определить причину противоречивых результатов о концентрации электроактивных атомов примесей в кремнии и разработать оптимальные термодинамическое и технологическое условия диффузионного легирования;

исследовать электрические, оптические свойства и установить закономерности их изменения от параметров исходного материала и природы легирующих примесных атомов;

исследовать фотоэлектрические явления, определить особенности и выявить новые свойства этих явлений в таких материалах;

исследовать магнитные свойства кремния, легированного парамагнитными примесными атомами в крайне неравновесном состоянии;

изучить взаимодействие легирующих атомов между собой, а также термические и радиационные дефекты в кремнии, находящемся в крайне неравновесном состоянии;

определить возможности полученных новых кремниевых материалов для создания фотоэлектрических, оптоэлектрических и магнитных датчиков, а также полупроводниковых приборов с высокой термической и радиационной стойкостью.

Объектом исследования является материал с объемными нанокластерами – сильнокомпенсированный кремний, легированный примесными атомами марганца, железа, цинка, никеля, серы и селена в крайне неравновесном состоянии.

Предмет исследования – определение механизмов новых физических процессов в сильно компенсированном кремниевом материале с объемными наноструктурами, находящимися в крайне неравновесном состоянии.

Методы исследований Наноразмерные кластеры, созданные примесными атомами в решетке кремния, исследовались современными методами электронного парамагнитного резонанса и рентгеноструктурного анализа. Ферромагнитное состояние таких образцов в области низких температур исследовалось на установке СКВИД, для изучения неравновесных процессов использовались растровый электронный микроскоп, атомно-силовой микроскоп «Solver-Pro», а также инфракрасный микроскоп МИК-5.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработана новая технология и определены оптимальные условия диффузии, позволяющие оптимизировать взаимодействие легирующих атомов с базовыми примесями в кристаллической решетке кремния;

определена возможность управления электрофизическими параметрами полученного кремния на основе управления степенью компенсации материала;

обнаружено аномально глубокое температурное гашение фото- и остаточной проводимости, выявлен эффект уменьшения фото- и остаточной проводимости в 10^4 – 10^6 раз при воздействии ИК-света;

установлена возможность управления подвижностью носителей заряда в материале из-за рассеяния носителей на центрах, созданных нанобъемными кластерами, исследованы эффекты управления подвижностью с помощью внешних воздействий;

разработаны на основе сильнокомпенсированного кремния твердотельные генераторы с воспроизводимыми и легко изменяемыми параметрами, работающие в широком интервале температуры;

определен эффект повышения температурной и радиационной стойкости сильнокомпенсированного кремния из-за эффектов взаимодействия примесных атомов и дефектов кристаллической решетки материала.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

на основе разработанной технологии получен сильнокомпенсированный кремний с высокой концентрацией электроактивных компенсирующих примесных атомов. Определена возможность изменения электрофизических свойств таких материалов в зависимости от концентрации и природы примесных атомов;

разработанная технология практически открывает новое научное направление – получение объемно наноструктурированного кремния с необходимыми параметрами;

на основе исследований физических явлений и эффектов предложен метод изменения электрических, фотоэлектрических, магнитных и других свойств полученных материалов в широком интервале значений;

на основе сильнокомпенсированного кремниевого материала были созданы твердотельные генераторы (Патент IDP 04948 «Твердотельный инжекционный генератор звуковой частоты»);

в сильно компенсированных полупроводниках отмечены новые фотоэлектрические свойства, найдено аномально большое (в 10^4 – 10^6 -кратно) уменьшение фото- и остаточной проводимости при воздействии ИК-света;

определены функциональные возможности сильнокомпенсированного кремния и созданы принципиально новые, чувствительные и быстродействующие датчики физических величин, магнитные и фотомагнитные приборы с уникальными параметрами, а также традиционные полупроводниковые приборы с высокой радиационной и термической стойкостью.

Достоверность полученных результатов: полученные на основе новой технологии образцы сильнокомпенсированного кремния исследовались на основе эффекта Холла и четырехзондового метода, определены электрофизические параметры образцов. Научные данные о формировании на поверхности и в объеме кремния наноструктур основаны на использовании современного оборудования (атомно-силовая микроскопия, инфракрасная микроскопия, электронный парамагнитный резонанс и т. д.), дополняющего друг друга. Полученные в экспериментах результаты подтверждают разработанные модели физических эффектов, а надежность полученных теоретических выводов подтверждается совокупностью всех физических явлений и эффектов, обнаруженных в кремниевом материале.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Показано, что кремний, находящийся в крайне неравновесном состоянии, обладает уникальными физическими свойствами в отличие от легированных и слабо компенсированных материалов. В этих материалах были обнаружены новые фотоэлектрические свойства, такие как высокая фоточувствительность, аномально глубокое ИК-гашение фото- и остаточной проводимости, где кратность гашения достигает 4÷6 порядков, аномальное поведение подвижности, отрицательное магнетосопротивление, стимулированное освещением, аномально высокое отрицательное магнетосопротивление, эффект отрицательной дифференциальной проводимости (получены регулярные и стабильные автоколебания тока с воспроизводимыми и легко управляемыми параметрами в широком интервале температур).

Практическая значимость результатов подтверждена возможностью получить большую концентрацию примесных атомов в объемно наноструктурном материале, т.е. получить новый класс материалов. На основе полученных материалов и исследованных принципиально новых явлений показана возможность создания датчиков физических величин, оптоэлектронных приборов, приборов с высокой радиационной и

термической стойкостью и созданы твердотельные генераторы звуковых частот.

На основе анализа полученных результатов исследований сильнокомпенсированного кремния показана возможность получения нового класса материалов электроники с новыми функциональными свойствами и создания на их основе новых типов приборов и датчиков физических величин.

Внедрение результатов исследований. На основе управления концентрацией, физическими свойствами сильно легированного кремниевого материала, находящегося в неравновесном состоянии, созданы нанобъемные структуры с различными примесными атомами:

технология низкотемпературного и поэтапного легирования кремния была использована акционерным обществом «FOTON» в процессе получения наноструктурных материалов (Справка 02/1519 Акционерной компании «Узэлтехсаноат» от 9 июля 2018 года). Использование результатов научно-исследовательской работы для указанных целей позволило существенно улучшить технологию изготовления детекторов;

полученные результаты по управлению фотоэлектрическими свойствами кремния с многозарядными нанокластерами были использованы акционерным обществом «FOTON» при создании фотоэлементов на основе нанокластерного кремния (Справка 02/1519 акционерной компании «Узэлтехсаноат» от 9 июля 2018 года). Использование результатов научно-исследовательской работы показало возможность создания нового типа солнечных элементов с широким (0,1–3 мкм) спектром чувствительности;

полученные результаты по увеличению взаимодействия дефектов кристаллической решетки с примесными атомами в сильнокомпенсированном кремнии были использованы акционерным обществом «FOTON» при производстве высоковольтных и высокочастотных диодов (Справка 02/1519 акционерной компании «Узэлтехсаноат» от 9 июля 2018 года). Использование результатов позволило улучшить технологию изготовления высоковольтных высокочастотных диодов и существенно повысить их стабильность к внешним воздействиям (температуре и γ -облучению);

теоретические расчеты по основным методам и физическим механизмам получения объемных наноструктурированных материалов на основе нанокластеров атомов марганца в кремнии были использованы в Институте солнечной энергии Академии наук Туркменистана в рамках проекта «Разработка и изготовление принципиально новых фотоэлементов с широкой спектральной чувствительностью (0,1–3 мкм) на основе кремния с нановаризонными структурами» при обработке экспериментальных данных (Справка № 83 Института солнечной энергии АНТ от 12 июля 2018 года). Использование научных результатов позволило создать новый класс фотоэлектронных и оптоэлектронных приборов, работающих в инфракрасном излучении (0,8–3 мкм).

Апробация работы. Научные результаты докладывались и обсуждались на 10 международных и 14 республиканских конференциях.

Опубликованность результатов. По результатам диссертации опубликована 51 научная работа, из них две монографии, авторское свидетельство на изобретение, 16 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, выводов, заключения, содержит 45 рисунков, 15 таблиц, список литературы из 193 наименований и изложена на 209 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, решаемой задачи, изложены цель исследования, научная новизна, сформулировано перспективное научное направление, определена связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий, приведены сведения о структуре диссертации.

В первой главе «**Состояние примесных атомов в кремнии**» показана возможность получения сильнокомпенсированного кремния с заданными воспроизводимыми параметрами. Установлено, что проблема глубоких центров – это проблема взаимодействия примесных атомов с дефектами решетки. Приведены данные, показывающие, что в условиях сильной компенсации кремний обладает следующими особенностями:

- все введенные примесные атомы становятся полностью ионизованными (в том числе часть из них двукратно заряжена), и их концентрация при $T=300$ К будет в сотни тысяч или миллионы раз больше, чем концентрация равновесных носителей заряда;

- при понижении температуры еще больше увеличивается разница между концентрацией ионизованных примесных атомов и равновесных носителей заряда;

- подвижности носителей заряда (как дрейфовая, так и холловская) существенно снижаются, поэтому в таких материалах при такой же концентрации равновесных носителей, как собственная, удельное сопротивление в них станет выше, чем у собственного полупроводника. Это означает, что с помощью сильной компенсации можно получить материал с большим удельным сопротивлением, чем в собственном. Также показано, что в этих материалах существенно меняется соотношение между временами жизни электронов τ_n и дырок τ_p ;

- в таких материалах отсутствует локальная электронейтральность, т.е. потенциал, созданный ионами примесных атомов (в том числе многозарядными), не экранируется и дебаевский радиус экранировки существенно увеличивается.

Показано, что управляя структурой комплексов – кластеров примесных атомов и их концентрацией в кремнии – можно изменять фундаментальные параметры исходного материала, что позволяет использовать их при разработке принципиально новых классов наноэлектронных приборов.

Практически – это новый подход к созданию квантово-размерных структур в кремнии. Исследованы методы образования кластеров, установлены закономерности взаимодействия примесных атомов с дефектами кристаллической решетки и показана возможность управления структурой и концентрацией этих комплексов в решетке. Проведен анализ возможных механизмов самоорганизации примесных атомов в кремнии. Определено, что одним из актуальных вопросов исследования свойств компенсированного кремния является установление оптимальных условий формирования крайне неравновесного состояния сильнокомпенсированного кремния.

Определены основные проблемы получения сильнокомпенсированного кремния в неравновесном состоянии и сформулирована задача диссертации.

Во второй главе **«Оптимальные термодинамические условия получения сильнокомпенсированного кремния»** представлены результаты исследований термодинамических и технологических условий формирования объемных нанокластеров примесных атомов в кремнии. Формирование объемных кластеров – это прежде всего явление взаимодействия примесных атомов между собой и дефектами кристаллической решетки. Поэтому оптимальные термодинамические условия взаимодействия примесных атомов – это эволюционное начало формирования нанообъемных кластеров, в основном определяемое параметрами исходных материалов, физическими и химическими активностями примесных атомов и способом введения примесных атомов в решетку полупроводника, а также последующими термическими обработками материала.

Приведены расчеты степени компенсации сильнокомпенсированного кремния:

$$k = \frac{N_{dM}^+}{2N_{aI}^{++}} \approx 1, \quad k = \frac{N_{aM}^-}{2N_{dI}^{+-}} \approx 1. \quad (1)$$

Чтобы выяснить физический смысл значения k , приведены расчетные данные для исходного материала кремния p -типа (исходная примесь 3-й группы) с концентрацией бора и соответственно концентрацией дырок: 1) $p_1=2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ($\rho=100 \text{ Ом} \cdot \text{см}$); 2) $p_2=2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ($\rho=10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$); 3) $p_3=2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ($\rho=1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$). Введем в эти материалы примеси с глубокими уровнями донорного характера (например, атомы S) с точностью $N_{aI}^{++} = 0,9995N_a^- = 0,9995 \cdot p$. Это означает, что в первой (I) группе материала введены донорные примесные атомы с глубокими уровнями с концентрацией

$$2N_{aI}^{++} = 0,9995 \cdot p_1 = 0,9995 \cdot 2 \cdot 10^{14} = 1,999 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3},$$

а во второй (II) группе материала

$$2N_{aI}^{++} = 0,9995 \cdot p_2 = 0,9995 \cdot 2 \cdot 10^{15} = 1,999 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$$

и соответственно в третьей (III) группе материала

$$2N_{aI}^{++} = 0,9995 \cdot p_3 = 0,9995 \cdot 2 \cdot 10^{16} = 1,999 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}.$$

Таблица 1

Параметры сильнокомпенсированного кремния, полученного на основе исходного материала с различной концентрацией примесных атомов бора

Исходный материал			Условия компенсации		Сильнокомпенсированный кремний			
Тип	ρ , Ом·см	концентрация дырок, см ⁻³ , p	концентрация глубоких центров, см ⁻³ , $2N_a^{++}$	степень компенсации, k	Тип	ρ , Ом·см	концентрация дырок, см ⁻³ , p	$\frac{N_{dr}^{++}}{P}$
p	100	$2 \cdot 10^{14}$	$1,999 \cdot 10^{14}$	0,9995	I	$2 \cdot 10^5$	$< 10^{11}$	$> 2 \cdot 10^3$
p	10	$2 \cdot 10^{15}$	$1,999 \cdot 10^{15}$	0,9995	P	$2 \cdot 10^4$	10^{12}	$2 \cdot 10^3$
p	1	$2 \cdot 10^{16}$	$1,999 \cdot 10^{16}$	0,9995	P	$2 \cdot 10^3$	10^{13}	$2 \cdot 10^3$
p	0,1	$2 \cdot 10^{17}$	$1,999 \cdot 10^{17}$	0,9995	P	$2 \cdot 10^2$	10^{14}	$2 \cdot 10^3$
p	0,01	$2 \cdot 10^{18}$	$1,999 \cdot 10^{18}$	0,9995	P	20	10^{15}	$2 \cdot 10^3$
p	100	$2 \cdot 10^{14}$	$1,999 \cdot 10^{14}$	0,9995	I	$> 2 \cdot 10^5$	$(2 \div 3) \cdot 10^{10}$	10^4
p	10	$2 \cdot 10^{15}$	$1,9999 \cdot 10^{15}$	0,99995	I	$> 2 \cdot 10^5$	$(2 \div 4) \cdot 10^{10}$	$\sim 10^5$
p	1	$2 \cdot 10^{16}$	$1,99999 \cdot 10^{16}$	0,999995	I	$> 2 \cdot 10^5$	$(2 \div 4) \cdot 10^{10}$	$\sim 10^6$
p	0,1	$2 \cdot 10^{17}$	$1,99999 \cdot 10^{17}$	0,9999995	I	$> 2 \cdot 10^5$	$(2 \div 6) \cdot 10^{10}$	$\sim 10^7$
p	0,01	$2 \cdot 10^{18}$	$1,99999 \cdot 10^{18}$	0,99999995	I	$> 2 \cdot 10^5$	$(2 \div 7) \cdot 10^{10}$	$\sim 10^8$

Определим значения степени компенсации в этих материалах:

$$k_1 = \frac{1,999 \cdot 10^{14}}{2 \cdot 10^{14}} = 0,9995, \quad k_2 = \frac{1,999 \cdot 10^{15}}{2 \cdot 10^{15}} = 0,9995, \quad k_3 = \frac{1,999 \cdot 10^{16}}{2 \cdot 10^{16}} = 0,9995.$$

Как видно, значение k одинаково во всех материалах и достаточно близко к единице, т.е. для этих материалов k удовлетворяет условие сильной компенсации, так как $k \approx 1$ или $(1-k) \ll 1$. $((1-0,9995) = 0,0005 \ll 1)$ В этих условиях мы получаем сильно компенсированный материал.

Чтобы определить параметры этих материалов, проведем некоторые расчеты. В I группе материалов, где $p_1 = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ после введения примесей с глубокими уровнями донорного характера с концентрацией электронов $2N_{dr}^{++} = 1,999 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, остаются некомпенсированные дырки

$$\Delta p_1 = p_1 - 2N_{dr1}^{++} = 0,001 \cdot 10^{14} = 10^{11} \text{ см}^{-3}. \quad (2)$$

А в образцах II группы концентрация некомпенсированных дырок

$$\Delta p_2 = p_2 - 2N_{dr2}^{++} = 2 \cdot 10^{15} - 1,999 \cdot 10^{15} = 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}, \quad (3)$$

в образцах III группы

$$\Delta p_3 = p_3 - 2N_{dr3}^{++} = 2 \cdot 10^{16} - 1,999 \cdot 10^{16} = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}. \quad (4)$$

Расчет показывает, что удельное сопротивление этих образцов будет соответственно $\rho_1 \approx 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, $\rho_2 \approx 2 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, $\rho_3 \approx 2 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Последние две партии образцов имеют характер явно p -типа, а образцы I группы близки к собственной проводимости. В табл. 1 приведены расчетные данные по параметрам сильнокомпенсированного кремния, полученного на основе материала с различным удельным сопротивлением при двух условиях легирования примесями с глубокими уровнями, эти данные практически очень близки к экспериментальным данным. Как показывает анализ приведенных данных, параметры исходного материала (концентрация мелких примесных атомов) являются одним из основных определяющих факторов условий сильной компенсации.

Как показали исследования, введенные в решетку кремния по разработанной диффузионной технологии атомы примесей полностью участвуют в формировании нанобъемных структур.

Эти результаты позволяют предположить, что низкотемпературная диффузия примесей является наиболее перспективным способом получения нанобъемных структур в кремнии, а также управления их распределением и составом.

Результаты исследования спектров ЭПР, микрофотографии, полученные с помощью атомного силового микроскопа, а также диффузионные технологические условия формирования нанокластеров дают основание считать, что такие кластеры марганца состоят из четырех заряженных атомов марганца, создающих комплекс вокруг заряженного атома бора в междоузлиях кремниевой решетки, т.е. комплекс имеет структуру $[(Mn)_4^{+n} B^-]^{+(n-1)}$.

Также следует подчеркнуть, что управляя термодинамическими условиями диффузии, можно изменять состояние примесных атомов и физические свойства самого полупроводника, т.е. можно получить материал, обладающий уникальными свойствами. Результаты исследования показывают, что для получения таких кремниевых материалов, легированных примесями, создающими глубокие уровни, существует оптимальный (для каждой примеси) исходный материал с определенными электрофизическими параметрами. Изменение давления паров диффузанта и температуры диффузии позволяет получить материал со стабильными энергетическими уровнями и определенной концентрацией электроактивных атомов без заметной эрозии поверхности и с воспроизводимыми электрическими параметрами.

Разработанная технология низкотемпературной диффузии примесей обеспечивает не только полное отсутствие образования поверхностных силицидов, эрозии и других дефектов на поверхности и в приповерхностной области полупроводникового материала, но и преимущественно междоузельную диффузию примесных атомов и их нахождение в междоузельном состоянии, что создает оптимальные условия для их взаимодействия (табл. 2).

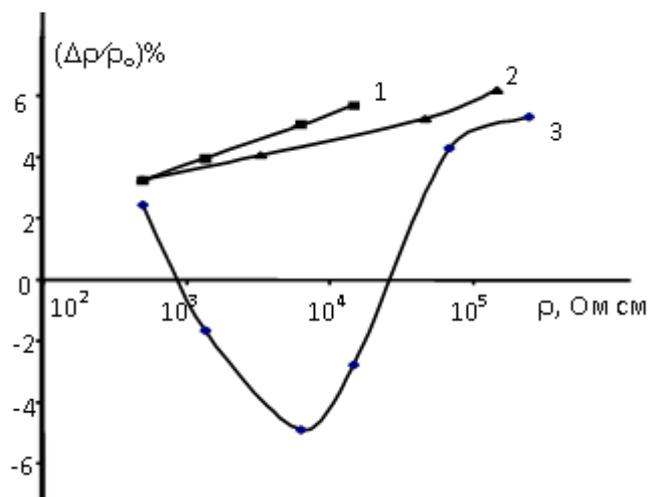
Таблица 2

Оптимальные условия получения сильнокомпенсированного кремния в крайне неравновесном состоянии, легированного разными примесями

Примесь	Параметр исходного кремния		Интервал температуры диффузии, $T, ^\circ\text{C}$	Давление паров диффузанта, атм.
	$\rho, \text{Om}\cdot\text{cm}$	тип		
Mn	2-5	p	1140–1180	0,8–1
Zn	1-2	n	1120–1150	1–1,2
S	1-2	p	1180–1200	1–1,1
Se	0,5–1	p	1220–1250	1–1,1
Ni	40–60	n	1200–1250	-
Cr	10	p	1240–1250	-
Fe	10	p	1180–1200	-

В табл. 2 показано изменение электрофизических параметров сильнокомпенсированного кремния по отношению к исходным параметрам материала и получение как электронного, так и дырочного компенсированного кремния на основе исходного кремниевого материала. В зависимости от температуры диффузии, природы примесных атомов и условий внешнего воздействия (температура, освещение как монохроматическим, так и интегральным светом магнитного поля, давления, радиации и др.) сильнокомпенсированный кремний находится в крайне неравновесном состоянии.

В третьей главе «Магнитные свойства сильно компенсированного кремния, легированного примесными атомами марганца, хрома и железа» приведены результаты исследования сильнокомпенсированного кремния с примесными атомами марганца, хрома и железа, полученные по разработанной диффузионной технологии. Для более четкого представления влияния нанообъемных кластеров примесных атомов на свойства полученного кремния и понятия природы ряда наблюдаемых новых явлений в таких материалах был исследован сильнокомпенсированный кремний с аналогичными примесными атомами в случае, когда примесные атомы не формируют кластеры (т.е. в решетке находятся в одиночном состоянии).



1 – в образцах Si, 2 – в образцах Si<B, Mn> *n*-тип. 3 – в образцах Si<B, Mn> *p*-тип
Рис. 1. Изменение магнетосопротивления при $E=100$ В/см и магнитном поле $H=15$ кЭ

В кремнии *p*-типа, легированном примесными атомами Mn, с удельными сопротивлениями $\rho \geq 5 \cdot 10^2 \div 6 \cdot 10^4$ Ом·см (при $T=300$ К) наблюдается отрицательное магнетосопротивление (ОМС). Значение ОМС в этих материалах имеет максимальное значение для образцов с $\rho = 5 \cdot 10^3 \div 7 \cdot 10^3$ Ом·см и составляет $\frac{\Delta\rho}{\rho} \sim (6-7)\%$. С отклонением удельного сопротивления от $\rho \sim (5-7)10^3$ Ом·см как в сторону увеличения (рис. 1), так и в сторону уменьшения ОМС уменьшается, а в образцах с $10^4 < \rho < 5 \cdot 10^2$ Ом·см практически отсутствует и наблюдается только положительное магнетосопротивление (ПМС).

Установлено, что значение ОМС с ростом приложенного электрического поля растет и достигает наивысшего значения при напряженности электрического поля $E=120-130$ В/см, а затем с ростом поля ОМС уменьшается, и при $E=250$ В/см происходит инверсия знака, т.е. ОМС переходит в ПМС. ОМС в таких образцах принимает предельное значение при комнатной температуре, с понижением или повышением температуры значение ОМС уменьшается, и при $150 \text{ K} < T < 350 \text{ K}$ происходит инверсия знака МС. Установлено, что освещение образцов Si<B, Mn>, в которых наблюдается ОМС как интегральным, так и монохроматическим светом с

энергией фотонов $h\nu > 0,5$ эВ, приводит к существенному увеличению значения ОМС, т.е. имеется эффект стимулирования ОМС при освещении. Показано, что такой аномальный эффект возникает в области интенсивностей до $J=200$ люкс, при $J>200$ люкс происходит обратный процесс, т.е. эффект гашения ОМС. Установлено, что управляя интенсивностью освещения, можно увеличить значение ОМС в 5÷6 раз. Другая возможность, установленная из этих результатов, – возможность изменения знака магнетосопротивления с помощью освещения, одно из самых интересных и новых явлений, обнаруженных в сильнокомпенсированном кремнии. Обнаружение этого эффекта, особенно в области низкого уровня освещенности интегрального света, существенно расширяет функциональные и потенциальные возможности приборов магнетоэлектроники.

В табл. 3 приведены обнаруженные магнитные явления и эффекты в сильнокомпенсированном кремнии в зависимости от компенсирующего элемента. На основе этих явлений и эффектов можно разработать принципиально новые фотомагнитные приборы, работающие при комнатной температуре.

Таблица 3

Обнаруженные магнитные явления и эффекты в сильнокомпенсированном кремнии в зависимости от компенсирующего элемента

Материал	Удельное сопротивление, ρ , Ом·см	B, Тл	T, К	Положительное магнетосопротивление	Отрицательное магнетосопротивление	Аномальные явления
Si<Mn>	$4 \cdot 10^3 \div 10^5$ p-тип $5 \cdot 10^4 \div 10^5$ n-тип	0,4- 2	320-120	ПМС	ОМС	АЭХ
Si<Cr>	$10^4 \div 10^5$ p-тип $5 \cdot 10^4 \div 10^5$ n-тип	0,4- 2	320-150	Незначительное	Незначительное	-
Si<Fe>	$10^4 \div 10^5$ p-тип $5 \cdot 10^4 \div 10^5$ n-тип	0,4- 2	320-150	Незначительное	Незначительное	-
Si<Co>	$10^4 \div 10^5$ p-тип $5 \cdot 10^4 \div 10^5$ n-тип	0,4- 2	320-150	Незначительное	Незначительное	-

В сильнокомпенсированном кремнии, легированном примесными атомами, не только обнаружен эффект стимулирования ОМС, но и установлена закономерность изменения значения и характера ОМС в зависимости от интенсивности как интегрального, так и монохроматического света. Эти особенности магнетосопротивления кремния, легированного примесными атомами марганца, хрома и цинка, свидетельствуют об особой природе ОМС в таких материалах. Эти результаты открывают новое интересное и перспективное научное направление – физику полупроводников с магнитными нанокластерами.

Для выяснения природы наблюдаемых явлений и практического использования большой интерес представляет определение температурной области существования ОМС. Установлено, что в сильнокомпенсированном

кремнии с нанокластерами примесных атомов ОМС наблюдается в большом интервале температур – $T=77\div 350$ К, а при $175 < T < 350$ происходит изменение знака, т.е. переход от ОМС к ПМС. Температурная зависимость ОМС при этом имеет ретроградный характер. С понижением температуры ($T < 350$) значение ОМС достаточно быстро увеличивается и достигает предельного значения в области температур $T=230\div 240$ К, при этом значение ОМС достигает величины $\frac{\Delta\rho}{\rho} \sim 300\%$. Дальнейшее уменьшение температуры ($T < 230\div 240$ К) приводит к уменьшению значения ОМС, и при $T=170\div 175$ К МС меняет знак и появляется небольшое ПМС.

В отличие от других полупроводниковых материалов, где в области низких температур наблюдается небольшое ОМС (6÷10 %), в сильнокомпенсированном кремнии в крайне неравновесном состоянии наблюдается аномально большое ОМС, но при высокой температуре. Поэтому этот эффект можно назвать «высокотемпературное ОМС». Такие же результаты были получены при исследовании магнитосопротивления сильнокомпенсированного кремния, легированного примесными атомами хрома и железа. Однако в этих материалах величины магнитосопротивления, а также появление ОМС и ПМС имеют относительно небольшие значения.

В образцах с примесными атомами хрома, железа, кобальта тоже наблюдается эффект чувствительности к магнитному полю и также исследовались ОМС и ПМС. Полученные экспериментальные результаты приведены в табл. 3. Из ее данных видно, что не только в образцах кремния, сильнокомпенсированных Mn, но и в компенсированных хромом, железом, кобальтом кремнии наблюдается некоторая чувствительность к магнитному полю.

Исследование зависимости ОМС от концентрации примеси не только позволяет управлять величиной ОМС, но и является важнейшим доказательством того, что наноструктуры – основной источник для появления ОМС. Обнаруженные перечисленные выше особенности ОМС в кремнии трудно объяснить существующей теорией магнетосопротивления.

Это означает не отсутствие в исследуемых образцах лоренцевского, шиковского вклада, а также МС, связанного со слабой локализацией, а их небольшое значение.

МС можно описать выражением

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_1 + \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_2 - \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_3 - \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\text{сильная локализация}} \quad (5)$$

где 1 – лоренцовское положительное магнетосопротивление, 2 – ПМС неоднородных полупроводников по модели Шика, 3 – ОМС по модели Альтшулера, слабая локализация, 4 – предложенная модель ОМС, связанная с сильной локализацией в наноструктурах.

Эти результаты свидетельствуют о том, что в образцах с нанокластерами, магнитное и электрическое поля противоположно влияют на

подвижность дырок. Результаты исследований показали, что с ростом кратности заряда нанобъемных кластеров наблюдаемые эффекты выявляются еще сильнее. Полученные результаты можно объяснить тем, что собственное магнитное поле и электрический потенциал нанокластеров заставляют носители заряда отклоняться от своего прямолинейного движения, и это будет тем сильнее, чем больше кратность заряда нанобъемных кластеров. Внешнее электрическое поле при этом действует наоборот, т.е. стремится гасить влияние поля нанокластера, поэтому с ростом напряженности поля μ увеличивается. Но при этом следует отметить, что с ростом кратности заряда нанобъемных кластеров созданные ими магнитные поля проявляются сильнее. Если освещать образцы светом, происходит генерация электронно-дырочных пар. При этом электроны, прежде чем рекомбинировать с дырками, захватываются многозарядными нанокластерами и остаются там длительное время, уменьшая при этом кратность заряда нанобъемных кластеров.

В четвертой главе «**Фотоэлектрические свойства сильнокомпенсированного кремния в крайне неравновесном состоянии**» приведены исследования фотоэлектрических свойств сильнокомпенсированного кремния, легированного примесными атомами переходной группы элементов. Эти исследования показали, что фотопроводимость в сильнокомпенсированном кремнии наблюдается в достаточно большом диапазоне энергии инфракрасного излучения. Как известно, модель ИКГ ФП в полупроводниках объясняется наличием двух энергетических уровней в запрещенной зоне полупроводника – очувствляющего центра E_m , который имеет асимметричное сечение захвата носителей заряда ($\sigma_n \gg \sigma_p$, или $S_n \gg S_p$), и центра рекомбинации E_R . Согласно этой модели начало гашения соответствует энергии фотонов, которые освобождают очувствляющий центр от захваченных неосновных носителей тока, $h\nu = E_m$, а максимум гашения имеет место при энергии фотона, когда начинаются двойные оптические переходы через очувствляющий центр, т.е. при $h\nu = E_g - E_0$, где E_g – ширина запрещенной зоны полупроводника. При этом степень гашения определяется соотношением

$$K = \sqrt{\frac{S_{Rp}}{S_{mp}}}, \quad (6)$$

где S_{Rp} и S_{mp} – сечение захвата дырок соответственно на рекомбинационных и очувствляющих центрах. Из экспериментальных данных можно сделать вывод, что двухуровневая модель ИКГ ФП качественно объясняет полученные данные в сильнокомпенсированном кремнии, но вместе с тем имеют место некоторые противоречия:

1) максимум ИКГ ФП наблюдаем при $h\nu = 0,47 \div 0,48$ эВ, что не соответствует началу двойного оптического перехода кремния. Если энергия ионизации очувствляющего центра соответствует $h\nu = 0,4$ эВ, когда

наблюдается область ИКГ, то максимум гашения должен наблюдаться при $h\nu = 0,76$ эВ;

2) максимальное значение ИКГ ФП в основном определяется концентрацией активных атомов примеси и удельного сопротивления материала. Эти результаты исследований невозможно объяснить существующей двухуровневой моделью фотопроводимости;

3) максимальная кратность гашения достигает $K=10^5 \div 10^6$, это означает, что сечение захвата дырок очувствляющего центра в 10^{12} раз больше, чем сечение захвата дырок на центрах рекомбинации $K=(S_{Rp}/S_{mp})^{1/2}$, из расчета можно определить $S_{Rp} \approx 10^{-14}$ см⁻², тогда $S_{mp} \approx 10^{-26}$ см⁻², такое аномально маленькое сечение захвата трудно объяснить наличием простых очувствляющих центров.

Спектральная зависимость кратности ИКГ ФП определяется сечением фотоионизации очувствляющего центра $\alpha_m(h\nu)$. Используя экспериментальные значения $\alpha_m(h\nu)$ для уровня марганца определили $\alpha_m(h\nu)$ при постоянной интенсивности собственного и ИК-освещения в области $h\nu=0,4 \div 0,5$ эВ. Эти расчеты показали, что $\alpha_m(h\nu)$ меняется в этом интервале максимум на 40÷60 %, в то время как экспериментальные результаты показывают, что степень гашения в интервале $h\nu=0,4 \div 0,48$ эВ меняется на несколько порядков.

Таким образом, между расчетными и экспериментальными данными имеются существенные различия не только по величине, но и по характеру ИКГ ФП. Поэтому можно предположить, что в условиях сильной компенсации примесные атомы не имеют строго фиксированных энергетических состояний, т.е. в этом случае состояние примесных атомов не будет определенным и не будет стабильным в решетке кремния. Это означает, что в условиях сильной компенсации, когда концентрация ионизированных примесных атомов превышает на несколько порядков концентрацию равновесных носителей, не только отсутствует локальная электронейтральность, но и существенно меняются условия взаимного влияния примесных атомов между собой и с другими дефектами решетки.

Для объяснения механизма фотопроводимости и наблюдаемого ИКГ ФП нами предложена модифицированная модель неоднородного полупроводника, которая впервые была предложена авторами Шиком и Шейкманом. Для выявления механизма ФП и ИКГ ФП нами был взят сильнокомпенсированный кремний, легированный примесными атомами марганца. Результаты исследования показали, что в кристаллической решетке кремния легко образуются различные комплексы примесных атомов (молекулы типа $(Mn)_2$ и $(Mn)_4$). Дальнейшая ассоциация комплексов приводит к образованию нанобъемных кластеров примесных атомов. В зависимости от природы примесных атомов можно наблюдать разнообразные интересные физические явления.

Например, в условиях сильной компенсации примесные атомы марганца полностью ионизованы $(Mn)^{++}$ и появляются мощные отталкивающие центры

для дырок со сверхантисимметричным сечением захвата носителей тока $\sigma_n \gg \sigma_p$. Чем больше степень компенсации и концентрация участвующих в образовании носителей тока примесных атомов, тем больше будет концентрация сильно заряженных центров.

Таким образом, в сильнокомпенсированном кремнии одновременно будут действовать такие центры, как $(Mn)^+$, $(Mn)^{++}$, $(Mn)_2^{+(2+4)}$, $(Mn)_4^{+(2+8)}$ и примесные кластеры большего размера с различным зарядовым состоянием. В зависимости от степени компенсации (положения уровня Ферми) и концентрации электроактивных атомов марганца в кремнии будут более эффективно действовать только отдельные центры примесных атомов марганца, которые будут определять фотоэлектрические свойства материала.

Из анализа полученных результатов установлено, что в условиях сильной компенсации состояние примесных атомов в решетке существенно изменяется от внешних воздействий и свойства материалов при этом определяются новым состоянием примесных атомов. Меняя степень компенсации и внешние условия, можно эффективно менять положение, зарядовое состояние и энергетические уровни примесных атомов, концентрацию примесных атомов с разными зарядовыми состояниями. Зарядовые состояния кластеров также подвержены значительным изменениям.

Полученные результаты можно объяснить на примере примесных атомов марганца. Из результатов исследований известно, что практически все примесные атомы марганца в компенсированном материале находятся в ионизованном состоянии (Mn^{++}), поэтому время жизни дырок становится существенно больше, чем время жизни электронов $\tau_p \gg \tau_n$.

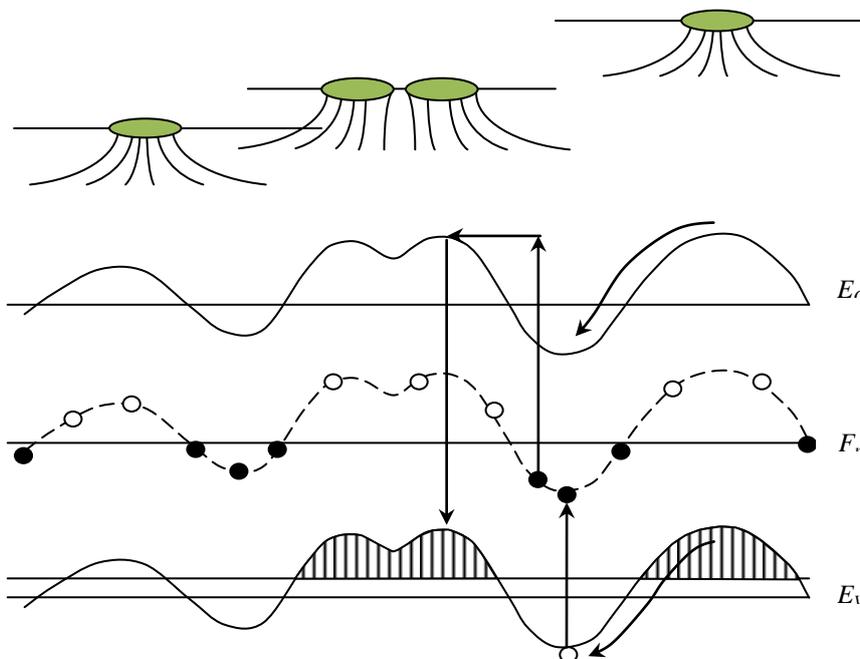


Рис. 2. Энергетическая диаграмма сильнокомпенсированного кремния в крайне неравновесном состоянии

При освещении интегральным светом генерированные электроны захватываются заряженными центрами марганца, а дырки накапливаются в

потенциальных ямах валентной зоны и участвуют в проводимости, переходя на уровни протекания. При этом время жизни дырок и фоточувствительность материала в основном определяются степенью заполнения очувствляющих центров уровней марганца за счет фотогенерации электронов (рис. 2). В случае монополярной инжекции, поскольку в основном инжектируются дырки, степень заполнения очувствляющего центра практически не меняется. Поэтому даже при достаточно низком уровне освещенности фоточувствительность стимулируется в основном за счет инжекции дырок.

Полученные экспериментальные результаты невозможно объяснить только изолированными (Mn^{++}) состояниями примесных атомов марганца в решетке кремния. В компенсированных образцах кремния $p-Si<B, Mn>$, полученных по стандартной высокотемпературной технологии диффузии, где заряженные атомы марганца находятся в основном в состояниях Mn^+ , Mn^{++} , хотя перечисленные выше эффекты и наблюдаются, но их величина и характер существенно отличаются от параметров образцов, полученных по разработанной технологии. На основе наблюдаемых эффектов и результатов ЭПР и АСМ можно с уверенностью сказать, что нанокластеры атомов марганца структуры $[(Mn)_4^{+n} B]^{+(n-1)}$ обладают многократным зарядовым состоянием и мощным магнитным моментом.

В табл. 4 показаны обнаруженные фотоэлектрические явления и эффекты в сильнокомпенсированном кремнии в зависимости от типа примесных атомов.

Таблица 4

Фотоэлектрические явления и эффекты в сильнокомпенсированном кремнии в зависимости от компенсирующего элемента

Примесный полупроводник	Удельное сопротивление ρ , Ом·см	Наблюдаемые явления	Условия наблюдения физических эффектов		
			$T, ^\circ C$	E, B	J
Si<Mn>	$10^2 \div 10^5$	Аномальное поведение подвижности носителей заряда	100–350	10-200	$10^{-3} - 10^2$ люкс
		N и S-образные вольтамперные характеристики	77–300	1÷200	$10^{-3} - 10$ люкс
		Глубокое температурное гашение фотопроводимости	120–180	10–30	$10^{-3} - 10^2$ люкс $10^{-5} - 10^{-9}$ Вт/см ² при $h\nu=1,12\text{эВ}$
		Глубокое инфракрасное гашение фотопроводимости	77–200	10÷50	$10^{-3} - 5 \cdot 10$ люкс
		Суперлинейная люкс-амперная характеристика	77–350	50–250	$10^{-3} - 10$
		Высокая собственная и примесная	77–200	10–30	$10^{-3} - 10$ люкс

		фотопроводимость			$10^{-5}-10^{-9}$ Вт/см ² при $h\nu=1,12\text{эВ}$
		Эффект долговременной релаксации фотопроводимости	77–150	10–50	$10^{-3}-50$
		Эффект аномально высокой остаточной проводимости	77–200	10–50	
Si<Zn>	$10^4 \div 10^5$	N и S-образные вольтамперные характеристики	100–260	50÷400	$10^{-3}-10$ люкс
		Глубокое температурное гашение фотопроводимости	120–180	10–30	$10^{-3}-10^2$ люкс $10^{-5}-10^{-9}$ Вт/см ² при $h\nu=1,12\text{эВ}$
	<i>p</i> -тип	Глубокое инфракрасное гашение фотопроводимости	70–200	70÷350	$10^{-3}-10$, люкс
	$10^4 \div 10^5$	Суперлинейная люксамперная характеристика	77–200	50–250	$10^{-3} -10$, люкс
	<i>n</i> -тип	Высокая собственная и примесная фотопроводимость	77–200	10–30	$10^{-3}-10$; $10^{-5}-10^{-9}$ Вт/см ² при $h\nu=1,12\text{эВ}$
		Эффект долговременной релаксации фотопроводимости	77–150	10–50	$10^{-3}-50$, люкс
		Эффект аномально высокой остаточной проводимости.	77–200	10–50	
Si<S>	$10^4 \div 10^5$	Аномальное поведение подвижности носителей заряда	100–350	60–300	$10^{-3}-10^2$ люкс
		N и S-образные вольтамперные характеристики	77–300	1÷300	$10^{-3}-10$ люкс
	<i>p</i> -тип	Глубокое температурное гашение фотопроводимости	77–280	70–300	$10^{-3}-10^2$ люкс $10^{-5}-10^{-9}$ Вт/см ² при $h\nu=1,12\text{эВ}$
	$10^4 \div 10^5$	Глубокое инфракрасное гашение фотопроводимости	77–280	70÷350	$10^{-3}-5 \cdot 10$ люкс
	<i>n</i> -тип	Суперлинейная люксамперная характеристика	77–250	50–350	$10^{-3}-10$ люкс
	Высокая собственная и примесная фотопроводимость	77–200	60–300	$10^{-3}-10$ люкс; $10^{-5}-10^{-9}$ Вт/см ² при $h\nu=1,12\text{эВ}$	

		Эффект долговременной релаксации фотопроводимости	77–250	60–350	10^{-3} –80 люкс	
		Эффект аномально высокой остаточной проводимости.	77–200	70–350	10^{-3} –80 люкс	
Si<Se>	$10^4 \div 10^5$	Аномальная подвижность носителей заряда	100–300	60–350	10^{-3} – 10^2 люкс	
		N и S-образные вольтамперные характеристики	77–300	1÷350	10^{-3} –10	
	p-тип	Глубокое температурное гашение фотопроводимости	77–280	70–350	10^{-3} – 10^2 люкс 10^{-5} – 10^{-9} Вт/см ² при $h\nu=1,12$ эВ	
		Глубокое инфракрасное гашение фотопроводимости	77–280	70÷400	10^{-3} – $5 \cdot 10$ люкс	
	n-тип	$9 \cdot 10^4 \div 10^5$	Суперлинейная люкс-амперная характеристика	77–250	50–400	10^{-3} –10
			Высокая собственная и примесная фотопроводимость	77–200	60–400	10^{-3} –10 люкс; 10^{-5} – 10^{-9} Вт/см ² при $h\nu=1,12$ эВ
			Эффект долговременной релаксации фотопроводимости	77–250	60–450	10^{-3} –80 люкс
			Эффект аномально высокой остаточной проводимости	77–200	70–450	10^{-3} –80 люкс

Эти результаты показывают уникальные свойства кремния с нанокластерами, позволяющие решить очень важную задачу – возможность создания в середине запрещенной зоны кремния примесной энергетической зоны с определенной шириной, содержащей ряд дискретных энергетических уровней, существенно различающихся сечением захвата носителей тока.

В пятой главе «Термодинамические условия возбуждения стабильных и воспроизводимых автоколебаний тока в сильнокомпенсированном кремнии» приводятся экспериментальные результаты по исследованию особенностей автоколебательных процессов в сильнокомпенсированном кремнии в крайне неравновесном состоянии. Автоколебания тока исследовались в широкой области температур, электрического поля и освещенности с различными примесными атомами (табл. 5).

Таблица 5

Явления автоколебаний в сильнокомпенсированном кремнии в зависимости от компенсирующего примесного атома

№	Материал	Тип проводимости	Удельное сопротивление ρ , Ом см	Освещение		Температурная область, Т, К
				монохроматическое I_{γ} , Вт/см ² с	интегральное I, лк	
1	Si<Mn>	n	$8 \cdot 10^4 \div 2 \cdot 10^5$	$10^{-7} \div 10^{-5}$	$10^{-3} \div 50$	80÷200
		p	$5 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^5$	$10^{-9} \div 10^{-5}$	$10^{-3} \div 50$	80÷200
2	Si<Zn>	n	$10^2 \div 2 \cdot 10^5$	$10^{-8} \div 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3} \div 50$	80÷180
3	Si<S>	p	$3 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^5$	$10^{-8} \div 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3} \div 10$	80÷160
4	Si<Se>	p	$5 \cdot 10^3 \div 10^5$	$10^{-3} \div 10^{-5}$	$10^{-2} \div 10$	80÷150

Установлено, что автоколебательный процесс в сильнокомпенсированном кремнии обладает рядом существенных особенностей и преимуществ по сравнению с автоколебаниями, обнаруженными в других полупроводниковых материалах:

- регулярные, стабильные и воспроизводимые автоколебания тока наблюдаются в области комнатной температуры, температурная область существования автоколебаний достаточно широкая и составляет $T=77 \div 350$ К (рис.3) ;

- пороговая напряженность электрического поля, при которой возбуждаются автоколебания, относительно мала ($E_p \geq 40$ В/см), что в 5÷10 раз меньше, чем в других полупроводниковых материалах (рис.4);

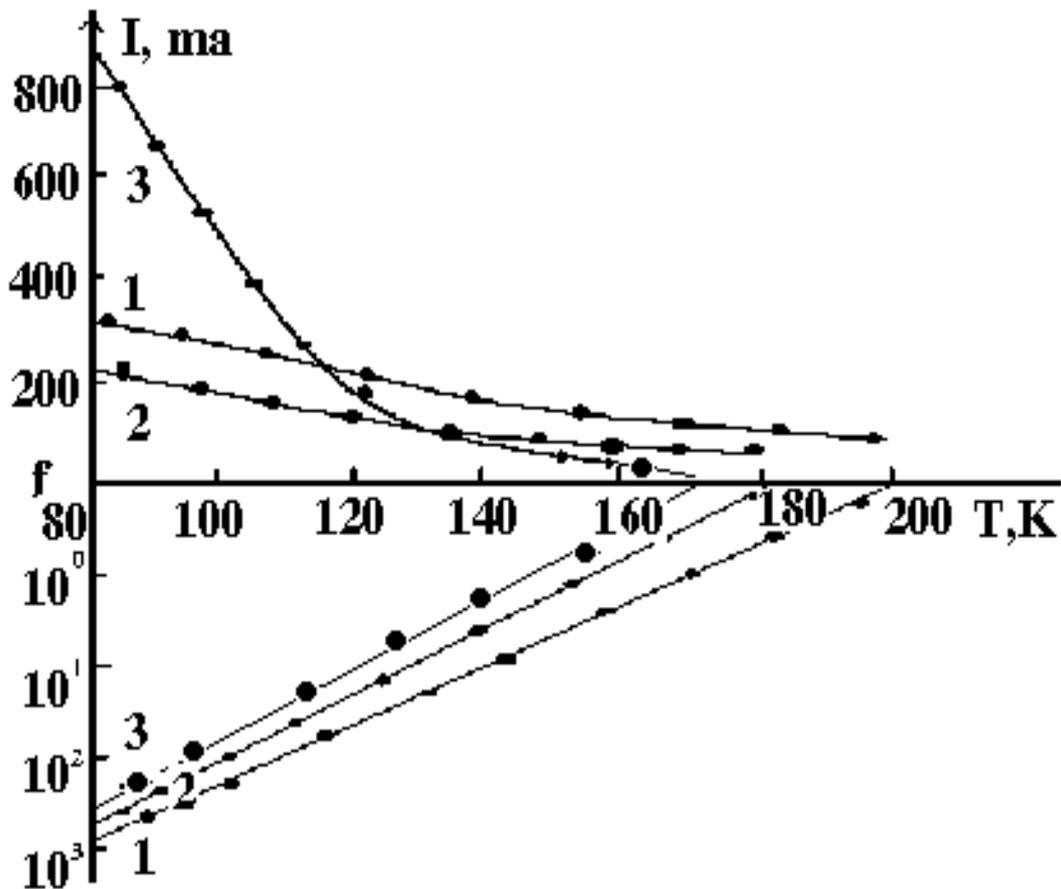
- можно возбуждать автоколебания разной амплитуды – в интервале $I=(10^{-4} \div 1)$ А;

- автоколебания управляются инфракрасным излучением ($h\nu \geq 0,5$ эВ) с невысокой интенсивностью (автоколебания возбуждаются как в темноте, так и при освещении интегральным и $J \sim 10^{-2} \div 10^1$ люкс, $\sim 10^{-8} \div 10^{-5}$ Вт/см²);

- частотой автоколебаний можно управлять с помощью освещения или электрического поля в интервале $\nu=10^{-3} \div 10^5$ Гц;

- коэффициент модуляции колебаний составляет порядка $K=90 \div 100$ %;

- при сохранении условий возбуждения можно получить стабильные, регулярные автоколебания с воспроизводимыми параметрами;

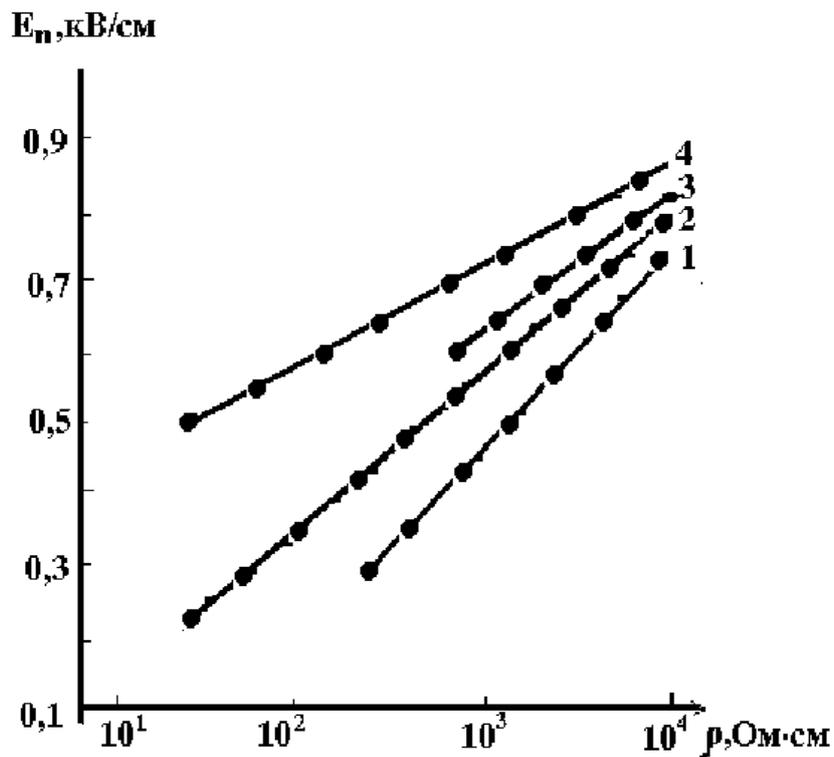


1-Si<Mn>, 2-Si<Zn>, 3-Si<S>, $\rho=8 \cdot 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, $I=10^{-1}$ лк.

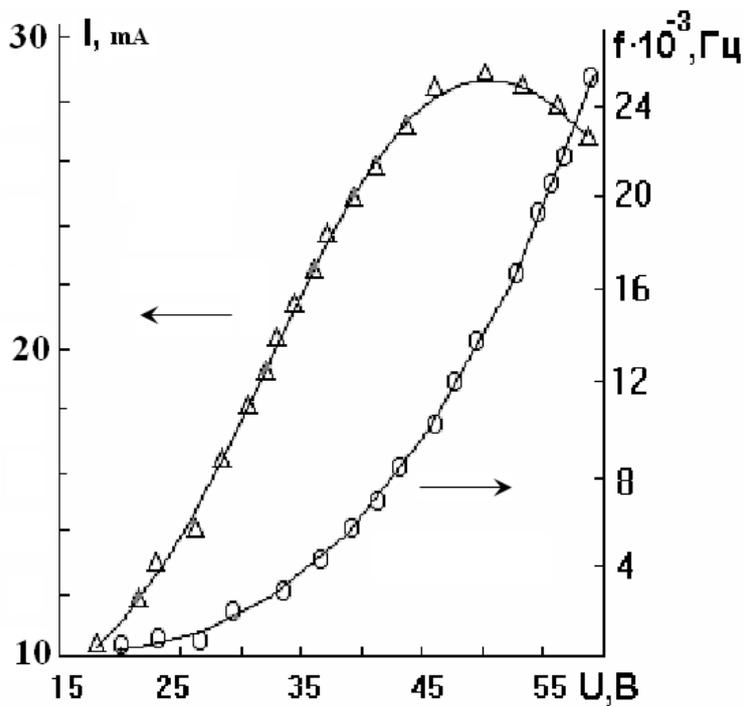
Рис.3. Зависимости амплитуды и частоты автоколебаний тока от температуры в сильнокомпенсированном кремнии.

Исследование показали, что параметры автоколебаний очень чувствительны к внешним воздействиям, таким как температура, электрическое поле, освещенность (как интегрального, так и монохроматического света), магнитное поле и давление.

На основе полученных материала предложены $1 \times 1 \times 0,5 \text{ мм}^3$ размерами твердотельные генераторы легко управляемыми параметрами. Зависимость амплитуды и частоты инжекционных автоколебаний от напряженности электрического поля (рис.5).



1 - Si<B,Mn>, 2 - Si<P,Zn>, 3 - Si<B,S>, 4 - Si<B,Mn> при $T=80\text{ K}$, $I=0,5\text{ лк}$.
 Рис.4. Зависимость порогового поля автоколебания от удельного сопротивления материала



$T=300\text{ K}$, $p^+ - p(\text{Si}<\text{Mn}> - p^+$
 Рис.5. Зависимость амплитуды и частоты инжекционных автоколебаний от напряженности электрического поля.

Таблица 6

Обнаруженные виды автоколебаний в сильнокомпенсированном кремнии в зависимости от компенсирующего элемента

№	Вид автоколебания	Материал	ρ , Ом·см	T, К	E_n , В/см	$J_{осв.,лк}$, $h\nu$, Вт/см ² с λ , мкм	J_{max} , А	J_{min} , А	f, Гц
1	Температурно-электрические неустойчивости	Si<Mn>	$5 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^5$ p-тип $8 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^5$ n-тип	77–200	150–200	$J = 10^{-3} - 50$ лк $I\gamma = 10^{-9} - 10^{-5}$ Вт/см ² с $\gamma = 1 - 3$, мкм	$3 \cdot 10^{-1}$	$10^{-6} - 10^{-8}$	$10^{-3} - 10$
		Si<Zn>	$10^2 - 2 \cdot 10^5$ n-тип	77–180	150–200	$J = 10^{-2} - 10$ лк $I\gamma = 10^{-7} - 10^{-5}$ Вт/см ² с $\gamma = 1 - 2,5$ мкм	$2 \cdot 10^{-1}$	$10^{-4} - 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3} - 10$
		Si<S>	$3 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^5$ p-тип	77–160	500–600	$J = 0,1 - 10$ лк $I\gamma = 10^{-8} - 10^{-5}$ Вт/см ² с $\gamma = 1 - 2$, мкм	1,5	$10^{-4} - 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-3} - 10$
		Si<Se>	$3 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^5$ p-тип	120–300	100–300	$J = 0,05 - 30$ лк $I\gamma = 10^{-8} - 10^{-5}$ Вт/см ² с $\gamma = 1 - 2$, мкм	1,5	$10^{-4} - 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-3} - 10$
2	Рекомбинационные неустойчивости (РВ)	Si<Mn>	$5 \cdot 10^2 - 10^5$ p-тип $10^3 - 10^5$ n-тип	200–350	30–100		10^{-4}	10^{-5}	$10^{-3} - 10^{-4}$
		Si<Zn>	$7 \cdot 10^3 - 7 \cdot 10^4$ n-тип	260–350	50–80		10^{-5}	10^{-6}	$10^{-3} - 10^{-4}$
		Si<S>	$10^2 - 10^5$ p-тип	240–350	40–1300		10^{-4}	$10^{-5} - 10^{-6}$	$10^{-3} - 10^{-4}$
		Si<Se>	$3 \cdot 10^3 - 10^5$ p-тип	120–260	30–600	$J = 0,05 - 30$ лк $I\gamma = 10^{-8} - 10^{-5}$ Вт/см ² с $\gamma = 1 - 2$, мкм	0,5	$10^{-4} - 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-3} - 10$
3	Инжекционная неустойчивость	Si<Mn>	$5 \cdot 10^2 - 10^5$ p ⁺ -p-p ⁺	77–350	20–50		$8 \cdot 10^{-1}$	$10^{-3} - 10^{-4}$	$10^{-2} - 5 \cdot 10^{-4}$
		Si<Se>	$3 \cdot 10^3 - 10^5$ p ⁺ -p-p ⁺	260–300	30–200	$J = 0,05 - 30$ лк $I\gamma = 10^{-8} - 10^{-5}$ Вт/см ² с $\gamma = 1 - 2$, мкм	0,5	$10^{-4} - 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-3} - 10$

В шестой главе показаны «Функциональные возможности практического применения сильнокомпенсированного кремния с примесными атомами в электронике». Как известно, в настоящее время технологии получения самоорганизующихся примесных кластеров изучены недостаточно. Диффузионная технология получения наноразмерных структур не только является более доступным и дешевым способом, способным осуществить широкомасштабное производство, но и позволяет создавать наноразмерные структуры различного типа с заданным распределением и плотностью по объему кристалла.

На основе полученных результатов исследований в диссертационной работе предложена возможность создания следующих многофункциональных полупроводниковых приборов и устройств (табл. 7).

Гигантская фоточувствительность образцов кремния с максимальной кратностью зарядового состояния кластеров позволяет создавать ИК фотоприемников, работающих в области $\lambda=1,5\div 6$ мкм при температуре $T=77-300$ К, такие фотоприемники без существенных изменений параметров работают и при комнатной температуре. При комнатной температуре рабочая спектральная область таких фотоприемников составляет $\lambda=1,5\div 4$ мкм.

Аномально глубокое гашение ФП, наблюдаемое в таких материалах, позволяет создать принципиально новый класс ИК фотоприемников, работающих при наличии фонового интегрального света, с чувствительностью в области $\lambda=1,5\div 4$ мкм. Особенность таких фотоприемников заключается в том, что они могут регистрировать ИК-излучение гораздо меньшей интенсивности, чем интенсивность фонового излучения.

Таблица 7

Новые виды датчиков физических величин на основе автоколебаний тока в сильнокомпенсированном кремнии

Вид полупроводникового датчика	Коэффициент чувствительности по		
	пороговому полю	пороговой частоте	амплитуде колебаний
Термодатчик	$-(2\div 5) \text{ В/см}\cdot\text{К}$	$(2\div 4)\cdot 10^2 \text{ Гц/К}$	$(2\div 5)\cdot 10^{-6} \text{ А/К}$
Фотодатчик	$-(4\div 6) \text{ В/см}\cdot\text{лк}$	$(3\div 5)\cdot 10^2 \text{ Гц/лк}$	$(3\div 5)\cdot 10^{-6} \text{ А/лк}$
Тензодатчик	$-(3\div 5)\cdot 10^{-8} \text{ В/см}\cdot\text{Па}$	$(2\div 5)\cdot 10^{-8} \text{ Гц/Па}$	$(2\div 5)\cdot 10^{-10} \text{ А/Па}$
Магнитодатчик	$-(2\div 5)\cdot 10^{-3} \text{ В/см}\cdot\text{Э}$	$-(5\div 6)\cdot 10^{-3} \text{ Гц/Э}$	$-(5\div 7)\cdot 10^{-11} \text{ А/Э}$

Образование примесной энергетической полосы нанокластерами с управляемой шириной в середине запрещенной зоны кремния позволяет создавать на основе таких материалов более эффективные солнечные элементы, работающие в ИК-области спектра $h\nu \geq 0,5$ эВ. Предварительные

результаты исследований таких фотоэлементов, созданных в лабораторных условиях, показывают, что можно увеличить их эффективность до 20–22%.

Регулярные, стабильные автоколебания тока с воспроизводимыми параметрами дают возможность создавать твердотельные генераторы с управляемыми параметрами ($f=10^{-3}\div 10^5$ Гц, $I=1\div 10^{-5}$ А), работающие в широкой области температур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе экспериментальных исследований, проведенных при выполнении диссертации, были изучены свойства сильнокомпенсированного кремния с нанобъемными кластерами в зависимости от их концентрации и электрических параметров в широком интервале температур при различных внешних воздействиях.

Из анализа полученных данных сделаны следующие выводы.

1. Решена задача разработки технологии получения нового класса полупроводниковых материалов – сильнокомпенсированного кремния с нанобъемными структурами, исследованы его физические свойства для выявления функциональных возможностей при создании на их основе принципиально новых микроэлектронных приборов.

2. На основе разработанной нами новой технологии легирования кремния в решетке кремния были созданы нанобъемные структуры за счет примесных атомов переходных групп и изовалентных элементов VI группы таблицы Менделеева. Физическая сущность новой технологии легирования заключается в проведении диффузионного процесса от комнатной температуры с поэтапным и последовательным повышением температуры до необходимой величины ($1100\div 1200$ °С) и поддержания при этой температуре всего 1,5–2 часа. Это позволило получить сильнокомпенсированный кремний в неравновесном состоянии и без эрозии поверхности.

3. Определен эффект высокотемпературного ($T=180\div 320$ К) отрицательного магнетосопротивления. Установлена закономерность изменения параметров этого явления в зависимости от концентрации, структуры и природы нанобъемных структур в сильнокомпенсированном кремнии.

4. Исследовано аномально высокое отрицательное магнетосопротивление, стимулированное как интегральным, так и монохроматическим освещением. Обнаружена двойная инверсия знака магнетосопротивления – от положительного к отрицательному и опять к положительному. Определен оптимальный уровень освещенности в зависимости от параметров материала, позволяющий получить максимальное ОМС.

5. Определена в сильнокомпенсированном кремнии высокая фоточувствительность в примесной ИК-области спектра $\lambda < 4$ мкм. Такая высокая фоточувствительность не наблюдалась в обычных

полупроводниковых материалах, и ее механизм невозможно объяснить существующей теорией фотопроводимости.

6. Обнаружено аномально большое глубокое инфракрасное гашение в области спектра $\lambda=1,2\div 3$ мкм и температурное гашение фотопроводимости в области температур $T=140\div 200$ К. Величина кратности гашения при этом достигает $5\div 7$ порядков, это значение минимум в $10^3\div 10^4$ раз больше, чем в самых чувствительных полупроводниковых материалах, где был обнаружен этот эффект.

7. Обнаружена гигантская квазиравновесная остаточная фотопроводимость. Величина остаточной проводимости в $10^7\div 10^{10}$ раз больше, чем темновая проводимость. Эффект наблюдается в достаточно широкой области температур как при интегральном, так и при монохроматическом освещении, также наблюдается фотопамять, величина которой существенно зависит от спектра и интенсивности освещения. Это означает, что сильнокомпенсированный кремний обладает высокой спектральной фотопамятью.

8. Комплексно исследованы регулярные, стабильные и воспроизводимые автоколебания тока с управляемыми параметрами ($I=(10^{-4}\div 1)$ А, $f=(10^{-3}\div 10^5)$ Гц). Отличительная особенность этого явления заключается в том, что автоколебания возбуждаются в широкой области температур ($T=77\div 320$ К) с очень низким пороговым напряжением возбуждения автоколебаний ($E\geq 40$ В/см). Установлена четкая закономерность изменения параметров автоколебаний в зависимости от температуры, напряженности электрического поля, спектра, интенсивности освещения, магнитного поля, а также от концентрации, типа и природы наноразмерных структур. Показана возможность создания автоколебательной среды на основе полученных материалов.

9. Исследованы особенности термического и радиационного дефектообразования в сильнокомпенсированном кремнии в зависимости от степени компенсации и характера компенсирующих элементов. Предложен новый способ улучшения термо- и радиационной стойкости кремния, позволяющий сохранить исходные электрические и рекомбинационные параметры материала. Обнаруженные новые физические явления в кремнии с нанобъемными структурами позволяют разрабатывать принципиально новые электронные многофункциональные приборы.

10. На основе сильнокомпенсированного кремния создать фотоприемники, работающие в области $\lambda=1,5\div 4$ мкм монохроматического света, на основе эффекта ИК-гашения ФП создать фотоприемники, которые могут регистрировать ИК-излучение гораздо меньшей интенсивности, чем интенсивность фонового излучения, твердотельные генераторы с легко управляемыми параметрами, а также показана возможность создания датчиков внешних воздействий.

**SCIENTIFIC COUNCIL No.DSc.28.02.2018.FM/T.03.05 ON AWARD
OF SCIENTIFIC DEGREES AT TASHKENT STATE TECHNICAL
UNIVERSITY, NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN**

**TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY NAMED AFTER
ISLAM KARIMOV**

AYUPOV KUTUP SAUTOVICH

**NON-EQUILIBRIUM PROCESSES IN STRONGLY
COMPENSATED SILICON**

01.04.10- Physics of semiconductors

**ABSTRACT OF THE DOCTORAL DISSERTATION (DSc)
ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

Tashkent – 2019

The theme of the doctoral (DSc) dissertation was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under No.B2018.2.DSc/FM122.

The doctoral (DSc) dissertation was carried out at Tashkent State Technical University named after Islam Karimov.

The abstract of the doctoral (DSc) dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at www.tdtu.uz and on the website of «ZiyoNet» Information and Educational Portal at www.ziyo.net.uz.

Scientific consultant: **Zikrillaev Nurullo Fatkhullaevich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Official opponents: **Karimov Abdulaziz Vakhitovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Daliyev Khojakbar Sultanovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Ismaylov Kanatbay Abdremovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Leading organization: **Andijan State University**

The defence of the dissertation will be held on «___» _____2019, at ___ at the meeting of the Scientific Council No.DSc.28.02.2018.FM./T.03.05 of Tashkent State Technical University, National University of Uzbekistan (Address: 2 Universitet str., 100095, Tashkent city. Tel.: (+99871) 246-46-00, Fax: (+99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@edu.uz).

The dissertation can be looked through in the Information Resource Centre of Tashkent State Technical University (registration number___). Address: 2 Universitet str., 100095, Tashkent city. Tel.: (+99871) 246-03-41.

The abstract of the dissertation was distributed on «___» _____2019.

(Registry record No. ___ dated «___» _____2019)

M.K. Bakhadir Khanov
Chairman of the Scientific Council on Award of Scientific Degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician

B.E. Egamberdiev
Scientific Secretary of the Scientific Council on Award of Scientific Degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

A.Z. Rakhmatov
Deputy Chairman of the Scientific Seminar of the Scientific Council on Award of Scientific Degrees, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher

INTRODUCTION (abstract of the DSc dissertation)

The aim of the research is to determine the physical properties of strongly compensated silicon in a non-equilibrium state.

The tasks of the research are:

physically substantiating the technologies for obtaining non-equilibrium electrophysical parameters of strongly compensated silicon;

determining the physical parameters of a strongly compensated material depending on the parameters of the source material and doping process (temperature and diffusion time) and the influence of technology on the state of impurity atoms in the silicon lattice;

determining the optimal conditions for the formation of a strongly non-equilibrium state of implanted impurity atoms in strongly doped silicon;

determining the optimal electrophysical parameters of the source material depending on the nature of the doping impurity atoms;

determining the cause of conflicting results on the concentration of electroactive impurity atoms in silicon and developing optimal thermodynamic and technological conditions for diffusion doping;

investigating electrical, optical properties and establishing the laws of their change from the parameters of the source material and nature of the doping impurity atoms;

investigating photoelectric phenomena, identifying features and new properties of these phenomena in such materials;

studying the magnetic properties of silicon doped with paramagnetic impurity atoms in a strongly non-equilibrium state;

studying the interaction of doping atoms with each other, as well as thermal and radiation defects in silicon, which is in a strongly non-equilibrium state;

determining the capabilities of the obtained new silicon materials to create photoelectric, optoelectric and magnetic sensors, as well as semiconductor devices with high thermal and radiation resistance.

The object of the research was a material with bulk nanoclusters of strongly compensated silicon doped with impurity atoms of manganese, iron, zinc, nickel, sulfur and selenium in a strongly non-equilibrium state.

Scientific novelty of dissertational research consists of the following:

A new technology has been developed and optimal diffusion conditions have been determined, which allow optimizing the interaction of doping atoms with base impurities in the silicon crystal lattice;

The possibility of controlling the electrophysical parameters of the obtained silicon has been determined on the basis of the control of the degree of material compensation;

An abnormally deep thermal quenching of photo and residual conductivity has been found, and the effect of photo and residual conductivity decreasing by 10^4 - 10^6 times when exposed to IR light has been revealed;

The ability to control the mobility of charge carriers in the material has been established, which is due to carrier scattering at the centers created by nano-volume clusters, and the effects of mobility control have been investigated using

external influences;

On the basis of strongly compensated silicon, solid-state generators have been developed with reproducible and easily variable parameters, operating in a wide temperature range;

The increasing effect of the temperature and radiation resistance of strongly compensated silicon has been determined, which is due to the effects of the interaction of impurity atoms and defects in the crystal lattice of the material.

Implementation of research results. Based on the concentration control, the physical properties of a strongly doped silicon material in a non-equilibrium state, and the creation of nano-volume structures by various impurity atoms:

the technology of low-temperature and phased silicon doping was used by «FOTON» Joint-Stock Company in the process of obtaining the structured materials (Certificate No.02/1519 of the Joint-Stock Company «O‘zeltexsanoat» of 9 July 2018). The use of the scientific research results for these purposes has significantly improved the manufacturing technology of detectors;

the obtained results on the control of photovoltaic properties of silicon with multiply charged nanoclusters were used by «FOTON» the Joint-Stock Company when creating photocells based on nanocluster silicon (Certificate No.02/1519 of the Joint-Stock Company «O‘zeltexsanoat» of 9 July 2018). The use of the results of the scientific research has shown the possibility of creating a new type of solar cells with a wide (0.1-3 μm) spectrum of sensitivity;

the obtained results on increasing the interaction of crystal lattice defects with impurity atoms in strongly compensated silicon were used by «FOTON» Joint-Stock Company in the production of high-voltage and high-frequency diodes (Certificate No.02/1519 of the Joint-Stock Company «O‘zeltexsanoat» of 9 July 2018). The use of the results has made it possible to improve the manufacturing technology of high-voltage and high-frequency diodes and significantly improve their stability to external influences (temperature and γ -irradiation);

the theoretical calculations on the main methods and physical mechanisms for obtaining bulk nanostructured materials based on nanoclusters of manganese atoms in silicon were used at the Institute of Solar Energy of the Academy of Sciences of Turkmenistan within the framework of the project «Design and manufacture of fundamentally new photovoltaic cells with broad spectral sensitivity (0.1-3 μm) on the basis of silicon with nanovarison structures» in the processing of experimental data (Certificate No.83 of the Solar Energy Institute AST of 12 July 2018). The use of the scientific results has made it possible to create a new class of photo-electronic and optoelectronic devices operating in infrared radiation (0.8–3 μm).

Publication of the research results. On the theme of the dissertation a total of 51 scientific works including 2 monographs and a certificate for an invention were published. Of these, 16 articles were published in scientific journals recommended by the Supreme Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publishing the main scientific results of doctoral dissertations.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation was presented on 209 pages consisting of an introduction, 6 chapters, conclusions, 45 figures, 15 tables and a list of used literature.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. Бахадырханов М.К., Аюпов К.С., Илиев Х.М. Кремний с кластерами примесных атомов / Монография. ТашГТУ, 2012, 158 с.

2. Аюпов К.С., Бахадырханов М.К., Зикриллаев Н.Ф., Илиев Х.М. Физические явления в кремнии в крайне неравновесном состоянии / Монография. Ташкент: Фан АН РУз. ISBN 978-9943-09-531-1. 2008, 341 с.

3. Бахадырханов М.К., Зикриллаев Н.Ф., Аюпов К.С., Бобонов Д.Т. Патент IAP 20090298 «Твердотельный генератор звуковой частоты». / Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлиги. Расмий ахборотномаси, 2011. №5.С.27-28.

4. Бахадырханов М.К., Зикриллаев Н.Ф., Аюпов К. С. Оптимальные условия легирования для получения кремния с собственной проводимостью. // Приборы. Технология, оборудование и новые материалы. – 2018, № 11 (221). С. 40-42 (Springer, Impact Factor 0.330).

5. Bakhadir Khanov M.K., Mavlonov G.Kh., Isamov S.B., Ayupov K.S., Iliev Kh.M., Sattorov O.E and Tachilin S.A. Photoconductivity of Silicon with Multicharged Clusters of Manganese Atoms [Mn]₄. // Surface Engineering and Applied Electrochemistry, USA, 2010, Vol. 46. No.3, pp.276-280. (№11 Springer, Impact Factor 0,29).

6. Bakhadir Khanov M.K., Ayupov K.S., Mavlonov G.Kh. and Isamov S.B. Negative Magnetoresistance in Silicon with Manganese-Atom Complexes [Mn]₄. // Semiconductors. USA, 2010, Vol.44, No.9, pp.1145-1148. (№11 Springer, Impact Factor 0,29).

7. Бахадырханов М.К., Аюпов К.С., Илиев Х.М., Мавлянов Г.Х., Сатторов О.Э. Влияние электрического поля, освещенности и температуры на отрицательное магнитосопротивление в кремнии, легированном методом низкотемпературной диффузии // Письма в ЖТФ, т. 36, вып. 16. – Санкт-Петербург, 2010. – С. 11-18 (№11 Springer, Impact Factor 0,29).

8. Аюпов К.С., Бахадырханов М.К., Мавлянов Г.Х., Зикриллаев Н.Ф., Нигманходжаев С. Активация нанокластеров атомов марганца в кремнии // Доклады Академии наук Республики Узбекистан. – Ташкент, 2009, №3-4. – С. 58 (01.00.00. №7).

9. Bakhadir Khanov M.K., Ayupov K.S., Iliev Kh.M., Mavlonov G.Kh. and Sattorov O.E. Effect of Electric Field Illumination and Temperature on the Negative Magnetoresistance of Low-Temperature-Diffusion-Doped Silicon. // Technical Physics Letters. USA, 2009. vol 35, №16, pp.741-744. (№11 Springer, Impact Factor 0,735).

10. Бахадырханов М.К., Аюпов К.С., Арзикулов Э.У., Сражев С.Н., Тошбоев Т.У. Термические свойства кремния с кластерами атомов никеля //

Известия высших учебных заведений. Физика. – Томск. 2008, №11(3). – С. 170-172 (№11 Springer, Impact Factor 0,335).

11. Аюпов К.С., Бахадырханов М.К., Зикриллаев Н.Ф., Илиев Х.М., Норкулов Н. О природе глубоких уровней в кремнии // Доклады Академии наук Республики Узбекистан. – Ташкент, 2007, №2. – С. 21-24 (01.00.00. №7).

12. Бахадырханов М.К., Зикриллаев Н.Ф., Аюпов К.С., Бобонов Д.Т., Кадырова Ф.А., Ильхомжонов Н. Спектральная область существования автоколебаний тока в кремнии, легированном марганцем // Журнал технической физики, 2006, т. 76, вып 9, с. 128-129 (№11 Springer, Impact Factor 0,725).

13. Bakhadirhanov M.K., Sattorov O.E., Iiev Kh.M., Ayupov K.S. and Tuerdi Umaier. Stimulation of Negative Magnetoresistance by an Electric Field and Light in Silicon Doped with Boron and Manganese // Semiconductors. USA, 2005. № 7(39). pp.789-791. (№ 11 Springer, Impact Factor 0,575).

14. Ayupov K.S. On IRQ PC in Mn-Doped Silicon // Surface Engineering and Applied Electrochemistry, USA, 2005, №4, pp.91-96. (№ 11 Springer, Impact Factor 0,24).

15. Аюпов К.С. Влияние монополярной инжекции на фотоэлектрические свойства компенсированного кремния // Доклады Академии наук Республики Узбекистан. – Ташкент, 2005, №6. – С. 16-19 (01.00.00.№7).

16. Бахадирханов М.К., Аюпов К.С., Зикриллаев Н.Ф., Кадырова Ф.А. Термодинамические условия возбуждения стабильных и воспроизводимых автоколебаний с заданными параметрами в компенсированном кремнии // Электронная обработка материалов. – Кишинев, 2004, №3. – С. 84-88 (№11 Springer, Impact Factor 0,24).

17. Bakhadirhanov M.K., Iiev Kh.M., Ayupov K.S. and Sattorov O.E. Magnetic Field Sensor Based on Compensated Silicon // Technical Physics Letters. USA, 2003. № 9(29). pp.705-707. (№ 11 Springer, Impact Factor 0,763).

18. Бахадырханов М.К., Илиев Х.М., Аюпов К.С., Зикриллаев Х.Ф., Сатторов О.Э. Отрицательное магнитосопротивление в сильнокомпенсированном кремнии // Электронная обработка материалов. Молдова, Кишинев, 2003, №4. – С. 86–89 (№11 Springer, Impact Factor 0,24).

19. Илиев Х.М., А.Хамидов, Аюпов К.С., Сатторов О.Э., Тачилин С.А. Магнитосопротивление в сильнокомпенсированном кремнии, легированном марганцем // Доклады Академии наук Республики Узбекистан. – Ташкент, 2003, №5. – С. 32-35 (01.00.00.№7).

II бўлим (II часть; part II)

20. Аюпов К.С., Бахадырханов М.К., Илиев Х.М., Мавлонов Г.Х., Шергозиев Ш., Зикриллаев Х.Ф., Тачилин С.А. Новые фотомагнитные явления / Материалы IV Международной конференции по оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах 25-26 мая 2018 года. Фергана. С. 236-237.

21. М.К.Бахадырханов, Н.Ф. Зикриллаев, К.С. Аюпов. Влияние взаимодействия примесей с термическими и радиационными дефектами компенсированного кремния / Материалы IV Международной конференции по оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах 25-26 мая 2018 года. Фергана. С. 231-234.

22. Илиев Х.М., Аюпов К.С., Мавлонов Г.Х., Зикриллаев Х.Ф., Шергозиев Ш.Б., Боликулов Ж.С., Ковешников С.В. Многофункциональный датчик на основе солнечного элемента с кластерами марганца // «Қайта тикланувчи энергетиканинг замонавий муаммолари» Республика илмий-амалий анжумани материаллари тўплами. 18-19 май 2018 йил, г. Карши. – С.74.

23. Аюпов К.С., Бахадырханов М.К., Зикриллаев Х.Ф., Норкулов Н. Основные проблемы в современном полупроводниковом материаловедении. «Научно-методические проблемы инженерной физики» Республика илмий-техник анжуманлар тўплами. Ташкент, 2017 г., 8-9 сентября. – С. 67-68.

24. Исамов С.Б., Зикриллаев Х.Ф., Аюпов К.С., Саттаров О.Э. Энергетические состояние примесных атомов марганца в кремнии. «Научно-методические проблемы инженерной физики» Республика илмий-техник анжуманлар тўплами. Ташкент, 2017 г., 8-9 сентября. – С. 32.

25. Аюпов К.С., Исаметдинов Б.Б. Нанокластерли кремний асосидаги ИҚ фотоприёмниклар // Техника ва технологияларнинг долзарб муаммолари, уларнинг энерготехамкор ва инновацион ечимлари. 20-22 апрель 2016. Фарғона. Б.19-20.

26. Аюпов К.С. Сатаров О.Э. Управление распределением и концентрацией кластеров примесных атомов в полупроводниках / Шестая международная конференция. Москва, 2015. – С. 43.

27. Илиев Х. М., Мавлонов Г. Х., Аюпов К. С., Зикриллаев Н. Ф., Мелибаев Д. Ферромагнитное состояние кремния с магнитными нанокластерами / Международная научная конференция. 11-13 июня 2015 г. Туркменистан, Ашгабад. – С. 158–160.

28. М.К. Бахадырханов, Г.Мавлонов, Х.М.Илиев, К.С.Аюпов, Саттаров О.Э. Магнитные нанокластеры и их влияние на свойство кремния / Международная научно-практическая конференция. 20-22 августа 2012. Бишкек. – С. 34.

29. Аюпов К.С. Сатаров О.Э. Управление распределением и концентрацией кластеров примесных атомов в полупроводниках // Шестая международная конференция. Москва, 2015. – С. 43.

30. Бахадырханов М.К., Илиев Х.М., Аюпов К.С., Мавлянов Г.Х., Исамов С.Б., Сатаров О.Э. Кластеры атомов марганца (Mn)₄ в решетке кремния – многозарядные квантовые точки с магнитным моментом. Кремний–2010, Нижний Новгород. – С. 154.

31. Зикриллаев Н.Ф., Аюпов К.С., Бобонов Д.Т., Курбонова У.Х.. Твердотельные генераторы звуковых частот на основе кремния, легированного селеном. Кремний-2010, Нижний Новгород. – С. 152.

32. Бахадырханов М.К., Аюпов К.С., Мавлонов Г.Х., Суйнбаев Т.А. Остаточная фотопроводимость в кремнии с многозарядными нанокластерами // Наука и производство: Сб. тр. науч.-практ. конф. Казахстан, Алматы, 2009. – С. 379-382.

33. Бахадырханов М.К., Аюпов К.С., Мавланов Г.Х., Исамов С.Б., Зикриллаев Н.Ф., Сатторов О.Э. Управление концентрацией и зарядовым состоянием нанокластеров атомов марганца (Mn)₄ в кремнии / 2-я Международная конференция «Неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах». НУ РУз, Ташкент, 2009. – С. 90-91.

34. Бахадырханов М.К., Аюпов К.С., Саттаров О.Э., Мавлонов Г.Х., Эшниязов Т., Тачилин С.А. Влияние электрического и магнитного поля на магнитосопротивление кремния с нанокластерами атомов марганца // «Неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах». НУ РУз, Ташкент, 2009. – С. 88-90.

35. Аюпов К.С., Рахманов Б.Р., Мавланов Г.Х., Исамов С.Б., Ережепов М., Исанбаев М. Особенности остаточной проводимости в кремнии с нанокластерами примесных атомов / Труды международной научно-практической конференции. Казахстан, 2008. – С. 278-279.

36. Аюпов К.С. Исследования электронного строения и зарядового состояния нанокластеров марганца // Инновация-2007. Сборник научных статей Международной научно-практической конференции. – С. 162-163.

37. Аюпов К.С. Неравновесные эффекты в кремнии с кластерами атомов марганца и использование их в микроэлектронике // Сборник докладов Республиканской научно-практической конференции аспирантов, докторантов и соискателей. Ташкент, 2007. Часть 1. – С. 8-9.

38. Бахадырханов М.К., Аюпов К.С., Коджахмедов Е., Касымбеков Д., Жолдасов Р. Новые чувствительные ИК-фотоприёмники на основе сильнокомпенсированного кремния // Непрерывное образование: проблемы и перспективы. Труды международной научно-практической конференции. – Казахстан, Алматы, 2006. – С. 399-401.

39. Аюпов К.С. Высокочувствительные магнитодатчики на основе отрицательного магнитосопротивления / Высокие технологии XXI века. VII Международный форум. Материалы конференции. – Москва, 24-27 апреля 2006. – С. 130-131.

40. Аюпов К.С., Зикриллаев Н.Ф., Кадырова Ф.А., Бобонов Д.Т. Оптическая и электрическая память в кремнии, легированном селеном / Международная конференция «ПДММ–2005». – Владивосток, Россия, 18-20 мая 2005. – С. 94.

41. Аюпов К.С. Магнитодатчики на основе отрицательного магнитосопротивления в p-Si<В,Мn> // Innovation. Сборник научных статей Международной конференции. Ташкент, 2004. – С. 207-209.

42. Аюпов К.С. Разработка новых элементов оперативной памяти на основе отрицательного магнитосопротивления // XX century in the history of Central Asia. International Conference. Tashkent, August 13, 2004. pp.10-11.

43. Ayupov K.S. Physical principles of elaboration novel class of sensors on compensated semiconductor Si<Se> // XX century in the history of Central Asia. International Conference. – Tashkent, August 13, 2004. pp.1-2.

44. Аюпов К.С. Создание принципиально новых приборов функциональной электроники на основе кремния с наноразмерными структурами // Вестник ТДТУ, 2007, №12. – С. 83-87.

45. Зикриллаев Н.Ф., Аюпов К.С. Динамический хаос и гисторезис автоколебаний в сильнокомпенсированном кремнии // Вестник ТГТУ. Ташкент, 2005, №4. – С. 1418.

46. Аюпов К.С. Термодинамические условия существования автоколебаний с заданными параметрами в компенсированном кремнии Si<B,S>» // Вестник ТГТУ. Ташкент, 2004, №1. – С. 3-11.

47. Аюпов К.С. Состояние примесных атомов с глубокими уровнями в полупроводниках в условиях сильной компенсации // Вестник ТГТУ. Ташкент, 2004, №2. – С. 9-16.

48. Аюпов К.С., Ф.А.Кадырова, Бобонов Д.Т., Х.Ф.Зикриллаев Технология получения компенсированных образцов кремния, легированного селеном // Рост, свойства и применение кристаллов: III национальная конференция. Ташкент, 22-23 октября 2002 г. – С. 24-27.

49. Bakhadirhanov M.K., Ayupov K.S., Zikrillaev N.F., Kadirova F.A. Strongly compensated silicon as a new class of materials for electronics. The Netherlands, Eindhoven, 2002. V.2. pp.699-701.

50. Аюпов К.С., Сатторов О.Э. Зависимость отрицательного магнитосопротивления от степени компенсации в Si<Mn> // Вестник ТГТУ. Ташкент, 2002, №3. – С. 50-53.

51. Аюпов К.С., Кадырова Ф.А. Влияние магнитного поля на условия возбуждения и параметры инжекционных автоколебаний тока в структурах p⁺-p(Si<Mn>)-p⁺ // Вестник ТГТУ. Ташкент, 2001, №2. – С. 29-32.

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари
«Тил ва адабиёт таълими» таъририятида таърирдан ўтказилди.
(14.01.2019 йил)

Босишга рухсат этилди: 15.01.2019 йил.
Бичими 60x84 ¹/₁₆, «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табағи 4,5. Адади: 100. Буюртма: № 6.

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.