

**САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ  
ФАЛСАФА ДОКТОРИ ИЛМий ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ  
PhD.29.08.2017.FM02.04 РАҚАМЛИ ИЛМий КЕНГАШ**

---

**САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ**

**РЎЗИМУРОДОВ ЖАЛОЛ ТЎРАБЕКОВИЧ**

**МАРГАНЕЦ БИЛАН ИОНЛИ ИМПЛАНТАЦИЯЛАНГАН  
КРЕМНИЙНИНГ МАГНИТ ВА ТРАНСПОРТ ХОССАЛАРИ**

**01.04.09 – Магнит ходисалари физикаси**

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

**Самарқанд - 2018**

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

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

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

**Рўзимуродов Жалол Тўрабекович**

Марганец билан ионли имплантацияланган кремнийнинг магнит  
ва транспорт хоссалари ..... 3

**Рузимуродов Жалол Турабекович**

Магнитные и транспортные свойства кремния ионно  
имплантированного марганцем ..... 21

**Ruzimurodov Jalol Turabekovich**

Magnetics and transport properties ion implantation silicon with  
manganese ..... 37

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

Список опубликованных работ  
List of publications ..... 41

**САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ  
ФАЛСАФА ДОКТОРИ ИЛМИЙ ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ  
PhD.29.08.2017.FM02.04 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ**

**РЎЗИМУРОДОВ ЖАЛОЛ ТЎРАБЕКОВИЧ**

**МАРГАНЕЦ БИЛАН ИОНЛИ ИМПЛАНТАЦИЯЛАНГАН  
КРЕМНИЙНИНГ МАГНИТ ВА ТРАНСПОРТ ХОССАЛАРИ**

**01.04.09 – Магнит ҳодисалари физикаси (физика-математика фанлари)**

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

**Самарқанд- 2018**

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида № ВМ2017.2.PhD/FM75 рақам билан рўйхатга олинган.**

Диссертация Самарқанд давлат университетида бажарилган.

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

**Илмий маслаҳатчи:**

**Қувондиқов Облокул**

физика-математика фанлари доктори, профессор

**Расмий оппонентлар:**

**Муқимов Комил Муқимович**

физика-математика фанлари доктори, академик

**Ўсаров Ўктам Туратович**

физика-математика фанлари номзоди, доцент

**Етакчи ташкилот:**

**Тошкент давлат техника университети**

Диссертация ҳимояси Самарқанд давлат университети ҳузуридаги PhD.29.08.2017.FM02.04 рақамли Илмий кенгашнинг 2018 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ соат \_\_\_ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 140104, Самарқанд шаҳри, Университет хиёбони, 15. Тел.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; факс: (99866) 239-11-40; e-mail: rektor@samdu.uz Самарқанд давлат университети Физика факультети, 1-қават, 63-хона).

Диссертация билан Самарқанд давлат университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (№\_\_\_-рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 140104, Самарқанд шаҳри, Университет хиёбони, 15. Тел.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; факс: (99866) 239-11-40.

Диссертация автореферати 2018 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ куни тарқатилди. (2018 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ даги \_\_\_\_\_-рақамли реестр баённомаси).

**Ашуров Мухсинжон Хуррамович**

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

**Ражабов Рустам Мустафоевич**

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

**Семенов Денис Иванович**

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси, ф-м.ф.д

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

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Жаҳонда бугунги кундаги интенсив техник тараққиёт катта ҳажмдаги ахборотларни юқори тезликда узатиш, сақлаш ва қайта ишлашга имкон берувчи янги техник воситаларни талаб қилмоқда. Бу талабларни қондириш учун ишлаш тамойили анъанавийлариникидан тубдан фарқ қилувчи, мутлақо янги турдаги асбоблар авлодини яратиш зарурати туғилмоқда. Замонавий микроэлектрониканинг “спинтроника” деб аталувчи янги соҳасида ахборотларни узатиш, қайта ишлаш ва бошқарида электроннинг заряди билан бир қаторда унинг спинидан ҳам фойдаланилади. Спинтрониканинг фаол материал базаси сифатида бир вақтнинг ўзида ҳам ярим ўтказгич ҳам ферромагнит хусусиятли материаллардан фойдаланиш керак бўлади ва бундай хусусиятга эга бўлган кўплаб магнит аралашмали яримўтказгичлар (МАЯ) ва яримўтказгичли бирикмалар синтез қилинган бўлиб, улар турли-туман электрон асбобларда муваффақият билан қўлланилмоқда.

Ҳозирги кунда дунёда ферромагнит хусусиятга эга бўлмаган кремнийни, унга магнит ионларини имплантация қилиш йўли билан киритиб, магнит киришмали ярим ўтказгичга айлантириш долзарб масалалардан бирига айланди. Бунга асосий сабаб, кўплаб бошқа магнит ярим ўтказгичларга нисбатан, кремний таннархининг арзонлиги, олиниш технологиясининг мукамаллиги ва у асосидаги планар технологиянинг яхши йўлга қўйилганлигидир. Шу нуқтаи назардан кремнийни магнит хусусиятга эга аралашмалар билан легирлаш ёрдамида унда ферромагнит ҳолатни ҳосил қилиш, магнит ва магнитотранспорт хоссаларини ўрганиш ва уларнинг шаклланиш механизмларини аниқлаш яримўтказгич материал-шунослигининг муҳим вазифалардан бири бўлиб ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантиришнинг Ҳаракатлар стратегияси, илмий ютуқларини амалиётга жорий этишнинг самарали механизмларини яратиш масалаларига алоҳида эътибор қаратилган. Жумладан янги магнит яримўтказгичли материаллар олиш технологиясини яратиш, уларнинг электрофизик, фотоэлектрик, гальваномагнит, магнитотранспорт ҳамда оптик хоссаларини тадқиқ қилишга ва амалиётда қўллашга катта эътибор қаратилмоқда. Фаол тадбиркорлик, инновацион ғоялар ва технологияларни қўллаб-қувватлаш йилида олинган илмий натижаларни ҳозирги замон талабларига жавоб берадиган даражага олиб чиқиш алоҳида эътиборга сазовор, жумладан, яримўтказгичли материалларда кечаётган физик жараёнлар асосида ишлайдиган асбобларнинг янги авлодини яратиш ва уларни амалиётга татбиқ этиш натижасида, мавжудларидан тубдан фарқ қилувчи, арзон ва тежамкор технологияларни яратиш орқали микро-электроника саноати маҳсулотларининг рақобатбардошлиги ва самарадорлигини ошириш муҳим аҳамиятга эга.

Ушбу диссертация тадқиқоти Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида» ги Фармо-

нини, Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 13 февралдаги ПҚ–2772 -сон «2017–2021 йилларда электротехника саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги Қарорини ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга муайян даражада хизмат қилади.

**Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги.** Ушбу диссертация Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялар ривожланишининг III. «Энергетика, энергоресурс тежамкор, транспорт, машина ва асбобсозлик, замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника ва электрон асбобсозлиги» деб номланувчи устувор йўналиши доирасида бажарилган.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Бугунги кунда монокристаллик кремнийни ионлар имплантацияси усули ёрдамида темирнинг ўтиш гуруҳи элементлари бўлган Fe, Cr, Co, Mn каби аралашмалар ионлари билан легирлаб унда ферромагнит ҳолатни ҳосил қилиш, Кюри нуқтасини хона температурасидан юқорига кўтариш, замонавий яримўтказгичли материал-шуносликнинг долзарб муаммолардан бири бўлиб ҳисобланади. Кремнийга киритилган магнит аралашма ионинг 3d электрон қобигидаги локаллашган электронлар магнит моментлари ҳисобига юқори спинли ҳолатнинг, магнит киришма ионлари орасида алмашинув таъсирлашуви юзага келишлари, ярим ўтказгич матричасида юқори спинли нанокластерлар шаклланиши бўйича кўплаб илмий ишлар қилинган. Киришмали магнит ярим ўтказгичлар назарий ва экспериментал жиҳатдан атоқли олимлар Л. Ж. Гао (Хитой), Б. Кане, Д. Дреюа Р. Вебб, М. Болдук в.б.лар (АҚШ), Ю. Фессбендер (Германия), Э. Л. Нагаев, А. Б. Грановский, С. В. Вонсовкий, А. К. Звездин (Россия), Т. Дэйтл (АҚШ), томонидан ўрганилган. Бугунги кунда кремнийни ионлар имплантацияси усули ёрдамида магнит киришмалар билан легирлаб, ферромагнит ҳолат ҳосил қилиш имкониятлари мавжуд эканлиги аниқланган.

Таъкидлаш керакки, бу соҳанинг ривожланишига Ўзбекистонлик олимлардан, академиклар М.К.Баҳодирхонов, К.М.Мукимов, профессор О.Қ.Қувондиқовлар ҳам катта ҳисса қўшган.

Охирги йиллардаги ўтказилган экспериментал ва назарий тадқиқотлар таҳлили шуни кўрсатадики, марганец билан имплантация қилинган кремнийда хона ҳароратида ферромагнит ҳолатнинг юзага келиши, унда юқори спинли нанокластерларнинг шаклланиши механизмлари тўлиқ аниқланмаган, магнит, магнитотранспорт, фотоэлектрик ва электрофизик хоссалари яхши ўрганилмаган.

**Тадқиқотнинг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация иши Самарқанд давлат университети илмий-тадқиқот ишларининг бош илмий мавзуси доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** ионлар имплантацияси усули ёрдамида марганец ионлари билан легирланган, кучли компенсирланган монокристалл кремнийда ферромагнит ҳолатни ҳосил қилиш, юқори спинли магнит

нанокластерлардаги алмашинув ўзаро таъсирлашув табиатини аниқлаш ва уларнинг ток транспортига таъсирини ўрганишдан иборат.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

ионлар имплантацияси усули ёрдамида марганец ионлари билан легирланган, кучли компенсирланган  $Si\langle B, Mn \rangle$  намуналарини олиш;

кучли компенсирланган  $Si\langle B, Mn \rangle$  намуналари сиртининг морфологиясини атом куч микроскопида тадқиқ қилиш билан марганец ионлари иштирок этган нанокластерларининг шакли ва ўлчамларини аниқлаш;

кучли компенсирланган  $Si\langle B, Mn \rangle$  намуналарининг магнитланишини тажрибада ўлчаш ва магнитланиш механизмини аниқлаш;

кучли компенсирланган  $Si\langle B, Mn \rangle$  намуналарининг вольт-ампер ва люкс-ампер тавсифномаларини хона ва 80 К ҳароратларда тадқиқ қилиш;

кучли компенсирланган  $Si\langle B, Mn \rangle$  намуналарининг магнит, магнитотранспорт, фотоэлектрик ва электрофизик хоссаларини экспериментал тадқиқ қилиш орқали марганец ионлари имплантация қилинган кремний матрицасида шаклланган юқори спинли нанокластерларнинг ток транспортига таъсирини тушунтирувчи моделни таклиф этиш.

**Тадқиқотнинг объекти** ионлар имплантацияси усули ёрдамида марганец ионлари билан легирланган, кучли компенсирланган монокристалл кремний намуналари.

**Тадқиқотнинг предмети** бўлиб ионлар имплантацияси усулида кремний монокристаллида ферромагнит фазанинг юзага келиши ва текширилган намуналардаги бу ҳолатга ҳамда ток ташувчилар транспортига юқори спинли магнит нанокластерлари таъсири ҳисобланади.

**Тадқиқотнинг усуллари.**  $Si\langle B, Mn \rangle$  намуналар сиртини тадқиқ қилиш учун замонавий атом куч микроскопи, магнитланишни ўлчашнинг Фонер усули, вольт-ампер ва люкс-ампер тавсифномалари ҳада магнит қаршилигини ўлчашда эса бундай тадқиқотларда қўлланиладиган стандарт усуллардан фойдаланилди.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** куйидагилардан иборат:

биринчи марта марганец ионлари имплантация қилинган кремнийда таркибида асосан марганец ионларидан ташкил топган нанокластерлар мавжуд бўлган, ферромагнит хоссали, кучли компенсирланган кремний олиш мумкинлиги кўрсатилган;

марганец билан ионли легирланган, кучли компенсирланган  $Si\langle B, Mn \rangle$  намуналарида юқори спинли магнит нанокластерлар ҳосил бўлиши аниқланган;

кучли компенсирланган  $Si\langle B, Mn \rangle$  намуналарида хона ҳароратида ферромагнетизмнинг мавжуд бўлиши аниқланган;

биринчи марта кучли компенсирланган  $Si\langle B, Mn \rangle$  намуналарида магнит нанокластерлар билан боғлиқ бўлган мусбат магнитоқаршилик, магнит қаршилик кинетикаси ва гистерезиси кузатилган;

кучли компенсирланган  $Si\langle B, Mn \rangle$  намуналари ВАТ ва ЛАТларини  $T = 300 \text{ K}$  ва  $T = 80 \text{ K}$  температураларда ўрганиш орқали марганец ионлари

иштирокидаги бу нанокластерларнинг ўлчанган тавсифномаларга таъсири юқори температурали диффузия усули билан олинган намуналарникига қараганда сезиларли фарқ қилиши аниқланган;

кучли компенсирланган  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  намуналарида ферромагнитизмга олиб келувчи, кластерлар ичида ва кластерлараро алмашиш ўзаро таъсир модели таклиф қилинган;

**Тадқиқотнинг амалий натижаси бўлиб**, номагнит кремнийга марганец ионлари имплантация қилинганда ва  $T = 1050$  °C температурада 1 соат давомида куйдирилганда ферромагнит ҳолат юзага келиши, бу ҳолат юқори спинли нанокластерлар ичидаги ва кластерлараро алмашинув ўзаро таъсири туфайли эканлиги, марганец билан имплантация қилинган кучли компенсирланган кремний намуналарини эса замонавий спинтроника учун янги фаол материал сифатида таклиф этилганлиги ҳисобланади.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** тадқиқотда замонавий, текширилган намуналарнинг магнитланиши, ВАТ, ЛАТ ва магнит қаршилигини тадқиқ қилишда ишончли ва илмий тадқиқотларда кенг қўлланиладиган экспериментал текширув усуллари ва қурилмаларнинг қўлланилгани; турли усуллар ёрдамида олинган экспериментал натижаларнинг ўзаро мувофиқ келиши; ўлчаш хатоликлари таҳлили билан; олинган натижаларнинг умумфизик тасаввурлар ва мавжуд адабиётларда келтирилган маълумотларга зид келмаслиги билан тасдиқланган.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти, номагнит кремнийга магнит табиатли киришмалар киритиб унинг магнит хоссаларини бошқариш мумкинлиги, уларда шаклланган марганец ионлари иштирокидаги нанокластерларида юқори спинли ҳолат билвосита алмашинув ўзаро таъсирлашуви оқибатида юзага келиши ҳақидаги тасаввурларни ривожлантирганлиги ҳамда замонавий магнит ярим ўтказгичлар физикаси соҳасидаги билимларини кенгайтирганлигидан иборат.

Тадқиқотнинг амалий аҳамияти, тадқиқотлар натижасида ферромагнит кремний олинганлиги ва уни спинтроникада янги, дискрет ҳамда интеграл элементлар яратишда фаол хом ашё сифатида қўлланилиши мумкинлигидан иборат.

**Тадқиқот натижаларининг амалиётга жорий қилиниши.** Ионлар имплантацияси усули билан олинган  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  намуналарининг сирт морфологиясини ўрганиш ва магнит, магнитотранспорт, фотоэлектрик ҳамда электрофизик хоссаларини тадқиқ қилиш натижасида:

кучли компенсирланган  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  намуналаридаги марганец ионларининг юқори спин ҳолати модели II.9.1.3-«Физические свойства нанокрис-таллических и низкоразмерных магнетиков» (2010-2012 й.й.) лойиҳасини бажаришда магнит наноструктуралари спин ҳолати моделини қуришда қўлланилган (Россия ФА Сибирь бўлими Физика институтининг 2017 йил 25 декабрдаги 356-12-215 сонли маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш металл/кремний планар наноструктураларда ўтиш

гурухи металлари силидцидлари магнит хоссалари ва фаза шаклланиши жарёнларини аниқлаш имконини берган;

кучли компенсирланган кремний  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  намуналарида магнит нанокластерлар билан боғлиқ бўлган мусбат магнитоқаршилик, магнит қаршилик кинетикаси ва гистерезиси пайдо бўлишига олиб келувчи намуналарни олиш технологияси ва режимлари N06-02-16604 рақамли “Магнитные, магнитотранспортные и магнитооптические свойства разбавленных магнитных полупроводников и мультислоев” (2006-2008 й.й.) лойиҳасини бажаришда имплантация дозасини ва куйдириш режимини танлашда қўлланилган (Москва давлат университетининг 2017 йил 19 декабрдаги маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш  $\text{Si}:\text{Mn}$  намуналарини олиш технологияси режимларини тўғри танлаш имконини берган;

марганец магнит нанокластерларидаги билвосита алмашинув таъсирлашуви мавжудлиги ва назарий модели ҳамда магнитланиш ва магнит кластерлар концентрациялари қийматлари «The project of the Ukrainian State program Nanotechnologies and nanomaterials» лойиҳаси доирасидаги “Research of resonance excitation of evanescent waves in periodic nanostructures made of semiconductors and superconductors” (2010-2014 й.й.) лойиҳасини бажаришда ярим ўтказгичлар ва ўта ўтказгичлардаги даврий наноструктураларда сўнувчи тўлқинларни уйғотиш жараёнини тадқиқ қилишда қўлланилган (Украина ФА Радиоастрономия институтининг 2017 йил 26 декабрдаги 237-687/20-сонли маълумотномаси). Илмий натижанинг қўлланилиши марганецнинг магнит нанокластерлари спин ҳолатининг ва кластер ичидаги алмашинув таъсирлашувининг даврий наноструктураларда сўнувчи тўлқинларни резонансли уйғотишдаги таъсирини аниқлаш ва таҳлил қилиш имконини берган.

$\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  намуналари марганец билан ионли легирланганда юқори спинли магнит нанокластерлар ҳосил бўлиши механизми, магнит қаршилик, аниқланган магнит қаршилик кинетикаси ва гистерезиси ҳамда уларнинг электрофизик ва магнит хоссаларига доир ўлчаш натижалари, ҳамда  $\text{Mn}^{+2}$ ,  $\text{Mn}^{+4}$  типдаги юқори спинли магнит нанокластерлардаги алмашинув таъсирлашувлари моделлари Ф2-ФҚ-0-47339 Ф2-015 рақамли «Квант ўлчамли наноструктуралар физикаси» (2012-2016) фундаментал лойиҳасини бажаришда нанокластерларда сочилиш механизмларини таҳлил қилишда қўлланилган (Ўзбекистон Республика Фан ва технологиялар агентлигининг 2017 йил 7 декабрдаги ФТА – 02-11/1282 - сонли маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши юқори спинли ва катта латерал ютиш юзасига эга бўлган нанокластерли ярим ўтказгичлар олишга ва уларнинг қўлланилиш соҳаларини топишга, нанокластерларнинг ток ташиш характериға таъсири жараёнларини аниқлаш имконини берган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Мазкур тадқиқотнинг асосий натижалари 5 та халқаро ва 7 та республика миқёсидаги илмий-амалий анжуманларида маъруза қилиниб тегишли муҳокамалардан ўтган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.** Диссертация ишининг асосий мазмуни асосан 17 та илмий ишларда чоп қилинган бўлиб, улардан 12 тасини халқаро ва республика миқёсидаги конференция

тезислари, 5 тасини эса Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг фалсафа доктори (PhD) диссертацияларининг асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда чиққан мақолалар ташкил қилади.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати 36 та расм ва 4 та жадваллардан иборат бўлиб, ҳажми 118 бетни ташкил этади.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Диссертациянинг «**Кириш**» қисмида мавзунинг долзарблиги ва зарурати, республика фан ва технологиялар ривожланишининг асосий устувор йўналишлари билан мослиги, диссертация у бажарилган олий таълим муассасаси ва чет эллик илмий-тадқиқотчилар бажарган илмий-тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги, муаммонинг ўрганилганлик даражаси, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, объекти, предмети ва тадқиқот усуллари ёритилган. Бундан ташқари диссертация ишининг илмий янгилиги, амалий аҳамияти, тадқиқот натижаларининг ишончлилиги баён қилинган.

Диссертациянинг «**Таркибида киришмалар нанокластерлари бўлган магнит ярим ўтказгичлар ҳақида назарий ва экспериментал ишлар бўйича адабиётлар шарҳи**» деб аталган биринчи бобда ҳозирги кунда мавжуд бўлган магнит ярим ўтказгичларнинг магнит ва электрофизик хусусиятлари ҳақидаги адабиётлар шарҳи келтирилган. Шунингдек адабиётлар шарҳида таркибида марганец мавжуд бўлган ёки турли усулларда марганец атомлари билан легирланган кремнийнинг электрофизик, оптик ва магнит хоссалари ҳақида ҳам маълумотлар келтирилган.

Тадқиқот мақсади ва кўйилган вазифаларига биноан магнит киришмалардан иборат магнит нанокластерларнинг ярим ўтказгичларнинг магнит хусусиятларига ва магнит қаршилигига таъсири, киришмали ярим ўтказгичлар магнит хоссаларининг шаклланишида билвосита алмашинув таъсирлашувининг роли ва аҳамиятининг назарий ҳамда экспериментал жиҳатлари қараб чиқилган. Адабиётлар шарҳи темирнинг ўтиш гуруҳига мансуб бўлган киришмаларидан ташкил топган юқори спинли марказларга эга ва асосий урғу марганец билан легирланган ярим ўтказгичларни ўрганишга бағишланган мақолаларга қаратилган.

Адабиётлар шарҳидан кўринадики таркибида кластерлар бўлган паст ўлчамли тузилмалар, юпқа пардалар аномал магнит хоссаларга эга бўлишар экан. Бундай аномал хоссаларга гигант ва колосалл магнит қаршилик, металл-изолятор фаза ўтишлари, аномал ва квант Холл эффекти ва ҳ.к.лар мисол бўлади. Барча кўриб чиқилган тузилмаларда магнит ва транспорт хоссаларининг характери киритилган Mn ионлари ёки турли механизмлар билан ўзаро боғланган Mn ионлари тузилмалари белгилайди.

Кремний асосидаги микроэлектрон қурулмалар яратишнинг мукамал технологияси, марганец ионларини имплантация қилиш орқали олинган Si<B,Mn> намуналарини олиш технологияси билан уйғунлаштирилса, бирваракайига иккита вазифани: процессор ва катта ҳажмга эга хотира қурилмаларини битта кристаллда яратиш имкони пайдо бўлади. Маълумки бундан ташқари ионлар имплантацияси натижасида киритилган Mn кремнийда чуқур энергетик сатҳлар ҳосил қилади ва улар ўз навбатида материалнинг генерацион-рекомбинацион хоссаларини кескин ўзгартириб юборади. Шу жиҳатидан ҳосил бўлган бу сатҳлар тўғрисидаги маълумотларни билиш ҳам муҳим ҳисобланади. Биричи бобда қилинган адабиётлар шарҳи асосида қуйидаги мақсад ва вазифалар кўйилди :

ионлар имплантацияси усулида олинган  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  намуналарида паст ўлчамли тузилмалар ( $\text{Mn}$  кластерлари ёки  $\text{Mn}$  иштирокидаги комплекслар) мавжудлигини назарий ва экспериментал тадқиқ қилиш;

ионлар имплантацияси усулида олинган  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  намуналарида юқори температурали куйдиришдан кейин  $\text{Mn}$  кластерлари концентрацияси ва уларнинг заряд ҳолатини баҳолаш.  $\text{Mn}$  кластерлари ичидаги ҳамда кластерлараро алмашинув ўзаро таъсирлашув характери ва механизмини аниқлаш;

магнит нанокластерларнинг таъсирини ҳисобга олган ҳолда кучли компенсирланган  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  намуналарининг электрофизик ва фотоэлектрик хоссаларини (ВАТ ва ЛАТ) назарий тушунтириш;

кучли компенсирланган  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  намуналари магнит қаршилигини ўлчаш ва натижаларни таҳлил қилиш;

кучли компенсирланган  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  намуналари магнитланишини ўлчаш ва натижаларни таҳлил қилиш;

Диссертациянинг «**Экспериментал қурилмалар, эксперимент методикаси**» деб номланган иккинчи бобида экспериментал тадқиқотларнинг қурилмалари, усуллари ва экспериментал тадқиқот техникаси баёни келтирилган. Қўйилган мақсад ва вазифалар асосида куйидаги эксперимент усуллари ва техникаси танланди: магнитланишни ўлчашнинг Фонер усули, намуналар сирти морфологиясини тадқиқ қилишнинг атом куч микроскопи усули, хона ва 80 К ҳароратларида ВАТ ва ЛАТларини тадқиқ қилиш ҳамда намуналарнинг хона температурасидаги магнит қаршилигини ўлчашнинг стандарт усуллари.

Бу экспериментал тадқиқот усуллари биргаликда ионлар имплантацияси усулида олинган  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  намуналарининг магнит, магнитотранспорт, фотоэлектрик ва электрофизик хоссалари тўғрисида тўлиқ маълумот бера олади ва олинган натижалар асосида назарий хулосалар қилиш мумкин.

Кичик ўлчамли структураларнинг мавжудлигини тўғридан тўғри атом куч микроскопида олинган тасвирлардан фойдаланиб аниқлаш мумкин. Уларнинг мавжудлиги билвосита ВАТ, ЛАТ ва магнит қаршилигини ўлчаш натижаларида фойдаланиб аниқлаш мумкин. Номагнит яримўтказгичда магнит нанокластерлари ёки магнит марказлари бор бўлганида намунанинг магнитланганлиги нанокластерлар ёки магнит марказлари магнит моментларининг йиғиндисидан иборат бўлганлиги боис, магнитланганликни ўлчаш учун сезгир бўлган вибрацион магнитометр методи танланди.

Бу бобда тажрибалар усули ва техникаси ҳақида батафсил маълумот берилган.

Диссертациянинг учинчи боби «**Кучли компенсирланган  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  намуналарининг магнит хоссалари**» деб аталиб, унда  $\text{Mn}$  билан ионли легирланниб олинган кучли компенсирланган  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  намуналарининг магнит хоссалари ва бу хоссаларнинг юзага келиш механизмлари тадқиқоти натижалари баён қилинган.

Солиштирма қаршилиги  $\rho = 10$  Ом·см бўлган  $p$ -типли кремний пластинасига марганец ионлари ИЛУ-3 қурилмасида 40 кэВ энергия билан ва

$\sim 10^{16} \div 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> дозада оралиғида имплантация қилинди. Пластиналардан ўлчамлари  $5 \times 3 \times 0,5$  мм<sup>3</sup> бўлган намуналар қирқиб олинди ва кварц ампулаларда  $1000^\circ - 1200^\circ\text{C}$  ҳарорат оралиғида бир соат давомида куйдирилди. Намуналарни совутиш уларни совуқ сувга ёки трансформатор ёғига  $\sim (600-800)^\circ\text{C}/\text{с}$  совутиш тезлиги билан ташлаш орқали амалга оширилди. Юқоридаги усул хона ҳароратида ҳам  $n$  – типли, ҳам  $p$  - типли, солиштира қаршилиги  $\rho = 10^2 \div 10^5$  Ом см оралиғида бўлган кучли компенсирланган Si<B,Mn> намуналарини олиш имконини берди.

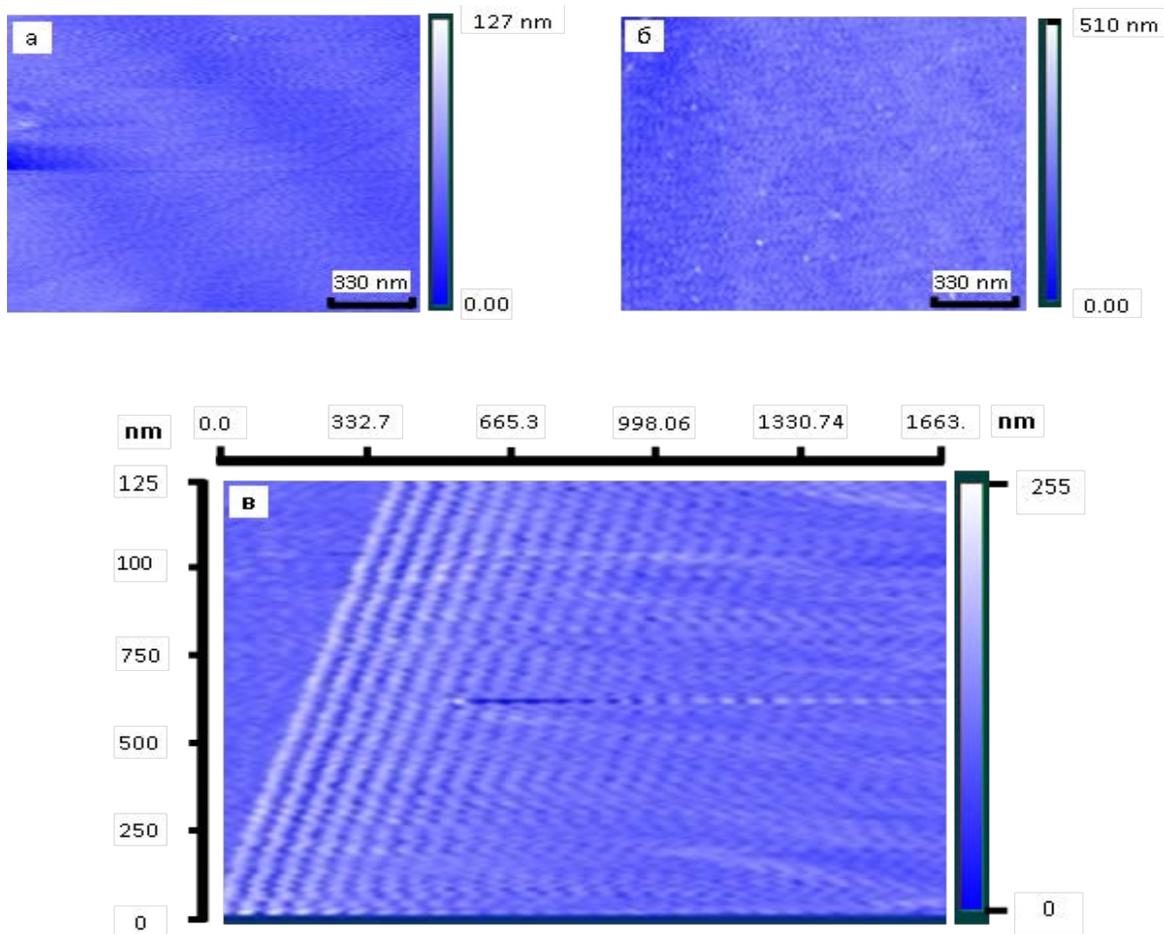
Марганец асосидаги нанокластерлар ҳосил бўлиши имкониятларини текшириш учун келтирилган усул<sup>1</sup> ёрдамида назарий ҳисоблашлар ўтказилди. Назарий ҳисоблашлар йўли билан икки ва ундан ортиқ киришма атомлардан ташкил топган нанокластерлар сонининг киришма атомлари коцентрациясига боғлиқлиги аниқланган. Кремнийда нанокластерлар пайдо бўлиши учун имплантация дозаси  $\sim 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup> дан юқори бўлиши керак. Ионлар имплантацияси ёрдамида нанокластерлар шаклланиши учун зарур бўлган имплантация дозасининг оралиқ қийматлари аниқланган. Кремний монокристаллининг турли координатсион сферларида жойлашган ва билвосита алмашинув ўзаро таъсирлашуви билан боғланган магнит нанокластерлари модели таклиф қилинган.

Атом куч микроскопи билан олинган тасвирлар (1-расм) орқали намуналарда ўлчамлари 5-20 нм тартибдаги бўлган, марганецнинг аралашма атомларидан таркиб топган, бир-бирлари билан билвосита ўзаро таъсирлашадиган, пирамидасимон нанокластерлар шаклланиши исбот қилинган. 1а, б, в–расмда кремний монокристалли сиртининг имплантацияга қадар ва ундан кейинги ҳолати морфологиясининг тасвири келтирилган. 1а–расмдан кўринадики намуналар сирти имплантациядан олдин тоза ва имплантация дозаси  $10^{16}$  ион/см<sup>2</sup> га етгандан бошлаб нанокластерлар шакллана бошлайди (1б-расмдаги оролчалар), имплантация дозаси  $\sim 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> етганда эса кластерлар узунлиги орта бошлайди ва эни  $\sim 20$  нм га етади ва кремний монокристалли сиртида тўлқинсимон наноструктура шаклланади (1в-расм).

Кучли компенсирланган Si<B,Mn> намуналарида марганецнинг магнит нанокластерлари билан юзага келган ферромагнетизмнинг мавжудлиги назарий асосланган ва экспериментда исботланган. Хона температурасида кучли компенсирланган Si<B,Mn> намуналаридаги магнитланишни тадқиқ қилиш, уларда магнитланишнинг тўйиниши ва гистерезиси борлигини кўрсатди (2–расмга қаранг). 2–расмдан кўришиб турибдики, текширилган намуналарда магнитланишнинг тўйиниши, магнит майдони индукциясининг 750 мТл тенг бўлган қийматида юз беради ва унинг қиймати  $4 \times 10^{-3}$  emu/g ( $A \times m^2/kg$ ) га тенг. Бундан ташқари магнитлашнинг сезиларли гистерезиси кузатилади ва у фақат ферромагнит моддаларга хос. Кучли компенсирланган Si<B,Mn> намуналарида хона температурасида

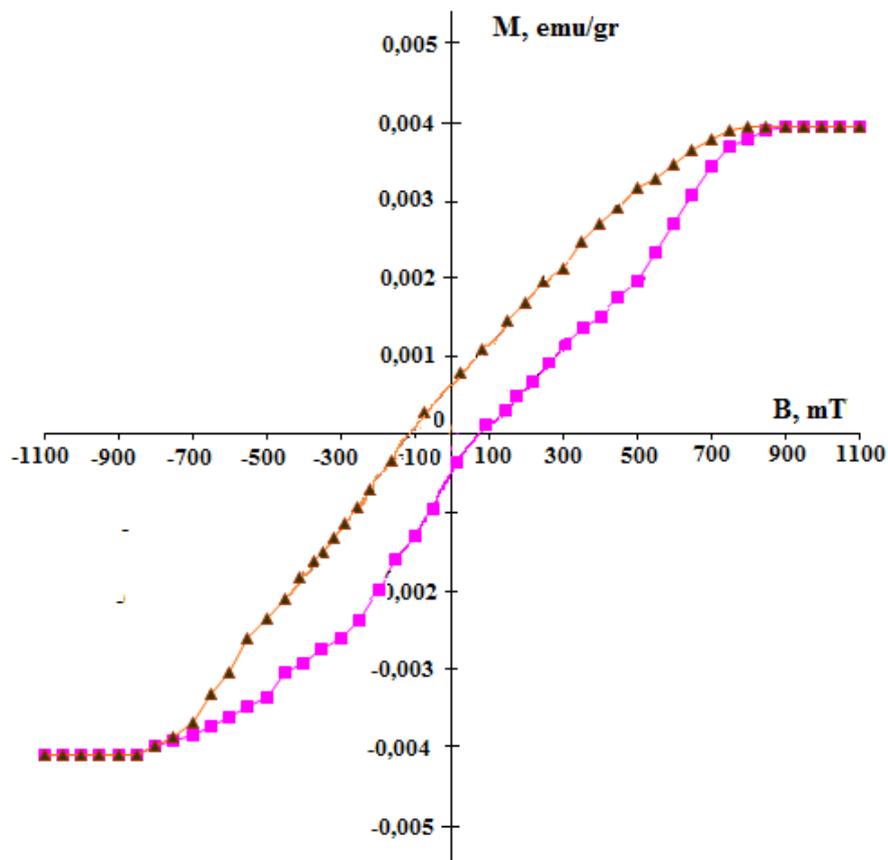
<sup>1</sup> В. Б. Гиноман. Труды физического института им. П.Н. Лебедева АН СССР. –Москва. 1978. Т. 104. с.54.

магнитланишнинг тўйиниши ва унинг сезиларли гистерезиси бу намуналарнинг ферромагнит хоссага эканлигини исботлайди. Магнитланишнинг кузатилган сезиларли кинетикаси, нанокластерлар магнит моментларининг магнит майдони таъсирида тартибланиши ва иссиқлик таъсирида тартибсизланиши ўртасида рақобат борлигидан далолат беради. Текширилаётган намуналарни 10 минут давомида индукцияси 1 Тл (10 кОе) бўлган магнит майдонида ушлаб туриш улар магнитланиши қийматининг 25% дан кўпроққа ошишига олиб келади. Магнит майдон кучланганлиги қиймати  $H > 10$  кОе бўлган майдонларда кластер ичидаги ўзаро таъсир характерининг, структура ўзгаришлари ёки электронлар локализация даражасининг ошиши билан боғлиқ ўзгаришлари юз беради. Кучли компенсирланган Si<B,Mn> намуналаридаги ферромагнетизм табиати асосан марганец ионлари бўлган юқори спинли кластерлар ўртасидаги билвосита ўзаро таъсир билан боғланган.



(а) –  $Mn^{+}$  ионлари имплантациясидан олдин, (б) – имплантация дозаси  $D = 10^{16} \text{ см}^{-2}$ , (в) – имплантация дозаси  $D = 10^{17} \text{ см}^{-2}$  бўлганда,  $E = 40$  кэВ.

**1-расм. Атом куч микроскопида олинган Si<B,Mn> намуналари сирт морфологияси**



**2-расм. Si<B,Mn> намуналари магнитланишининг магнит майдонига боғлиқлиги**

Кучли компенсирланган кремний Si<B,Mn> намуналаридаги кластерлар таркиби асосан  $Mn^{2+}$ ,  $Mn^{3+}$ ,  $Mn^{4+}$  ионларлардан иборат. Киришмалар концентрацияси  $N_D=5 \cdot 10^{17} \div 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  бўлганда алмашинув таъсирлашувининг жуфт моделини қўллаб бўлмайди, чунки бундай концентрацияларда кластерлар ухта ва ундан кўп сондаги киришма атомлардан иборат бўлади. Бундан ташқари марганец ионининг 3d қобиғида бешта электрон бўлиб, уларнинг спинлари бир томонга йўналган ва у кремний матрицасида ҳам юқори спинли ҳолатнинг ҳосил бўлишига омил бўлади. Кремний матрицасидаги тўғридан тўғри алмашинув таъсирлашувга эга бўлган марганец киришмалар жуфти концентрацияси жуда кичик ва магнитланишга қўшадиган хиссаси жуда кам. Бундан, намуналардаги марганец ионларининг ферромагнит ҳолатга олиб келадиган примитив кластернинг умумий кўриниши, Зинернинг қўш алмашинув моделига кўра ферромагнит ҳолатни юзага келтирувчи,  $M^{3+}-O^{2-}-M^{4+}$  бўлган комплекслардан таркиб топган<sup>2</sup> деб хулоса қилиш мумкин. Бунда Si<B,Mn> намуналарида анион сифатидаги кислород ионлари ( $O^{2-}$ ) ўрнига концентрацияси  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  бўлган бор ( $B^-$ ) ионлари ҳам бўлиши

<sup>2</sup> Л. И. Королева. Магнитные полупроводники. –М.: Физический факультет МГУ, 2003. –313 с. см.с 236.

мумкин, лекин бор ( $V^-$ ) ионлари концентрацияси кислород конценрациясидан  $10^3$  тартибга кам бўлгани учун алмашинув таъсирлашувида кислороднинг роли асосий бўлади деб ҳисоблаш мумкин. Чохралский усулида ўстирилган кремнийда, одатда концентрацияси  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  кислород мавжуд бўлиши бунга замин бўлади.

Олинган натижалар асосида, ўрганилган нанокластерлар юқори спинли магнит кластерлари эканлигини ва юқори спинли ҳолатни уларни ташкил қилган марганец ионлари орасидаги Зинернинг қўш алмашинув моделига кўра алмашинув ўзаро таъсирлашуви ҳосил қилади деб айтиш мумкин. Аммо, бу намунада макроскопик ферромагнит ҳолатни юзага келтириш учун етарли эмас. Бундай ҳолат юзага келиши учун фақат кластерлар ичида эмас балки кластерлар орасида ҳам алмашинув ўзаро таъсирлашуви мавжуд бўлиши ва бу ўзаро таъсир бутун намунанинг ферромагнит ҳолатида бўлишини таъминлаши керак.

Кластерлараро алмашиш ўзаро таъсир табиати РККИ (Рудерман - Киттел - Касуя - Иосида) модели билан тушунтирилиши мумкин. Бу моделда ўтказувчанлик электронлари (s-электронлар) ва локаллашган электронлардан (d(f)-электронлар) иборат коллективлашган иккита тизим қаралади. Бу тизим учун гамильтониан қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$H = H_M + H_A + H_B$$

бу ерда  $H_M$  — магнит тизим гамильтониани (одатда гейзенбергча кўринишда берилади  $H_M = J_{ij} S_i S_j$ ; бу ерда  $J_{ij}$  —  $i$ -чи ва  $j$  —чи атомлар учун алмашинув интегралли,  $S_i$ ,  $S_j$  — мос спин операторлари),  $H_A$  — ўтказувчанлик электронлари ва магнит ионлари спинлари орасидаги алмашинувни тавсифловчи гамильтониан,  $H_B$  — ҳаракатчан заряд ташувчилар (электронлар, коваклар) гамильтониани.

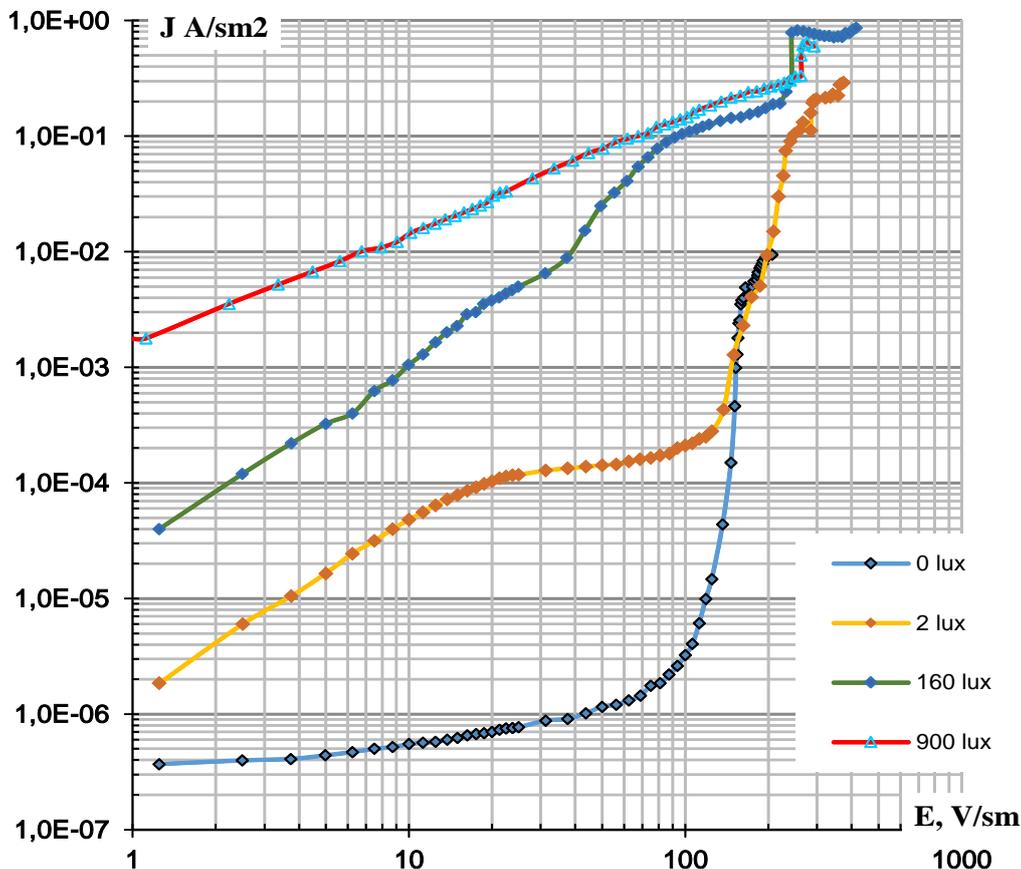
Шундай қилиб, тадқиқотларимиз, кластерлараро таъсирлашувни тавсифлаш учун  $H_A$  гамильтониандан фойдаланиш мақсадга мувофиқлигини кўрсатади.

Диссертациянинг тўртинчи боби «**Магнит нанокластерли кучли компенсирланган Si<V,Mn> намуналарининг кинетик хоссалари (ВАТ ва ЛАТ)**» деб аталиб, бу бобда тадқиқот объектининг кинетик хоссалари айнан, вольт-ампер, люкс-ампер тавсифномалари ва магнит қаршилигини тадқиқ қилиш натижалари келтирилган. Si<V,Mn> намуналарининг бу физик хоссалари намуналарда квант нуқталар борлиги ҳақида фундаментал маълумотларни бериши, балки уларнинг амалиётда қўлланилиш соҳасини белгилаши керак.

Кинетик хоссалар табиатини белгилаб берувчи вольт-ампер, люкс-ампер тавсифномалар ва магнит қаршилиқнинг пайдо бўлишини эркин заряд ташувчилар транспортига магнит нанокластерларнинг таъсири билан тушунтирилган.

3-расмда суюқ азот ҳароратида олинган ВАТ оиласи келтирилган. 3-расмдан кўринадикки ВАТ чуқур энергетик сатҳ ҳосил қилувчи киришмалар киритилган яримўтказгич намуналар учун хос бўлган,  $I=U^n$  боғланишга эга бўлган бир нечта характерли соҳалардан иборат. Қоронғулик ВАТнинг

кўриниши ярим ўтказгичга тушаётган ёруғлик интенсивлигининг ўзгариши билан сезиларли ўзгаради ва бунга заряд ташувчиларни ютиш латерал юзасига катта бўлган марказлар (нанокластерлар) мавжудлиги сабаб бўлади. Уларнинг ёруғлик ва температура таъсирида қайта зарядлашуви ВАТ кўриниши ҳамда ток транспортига сезиларли таъсир кўрсатади.

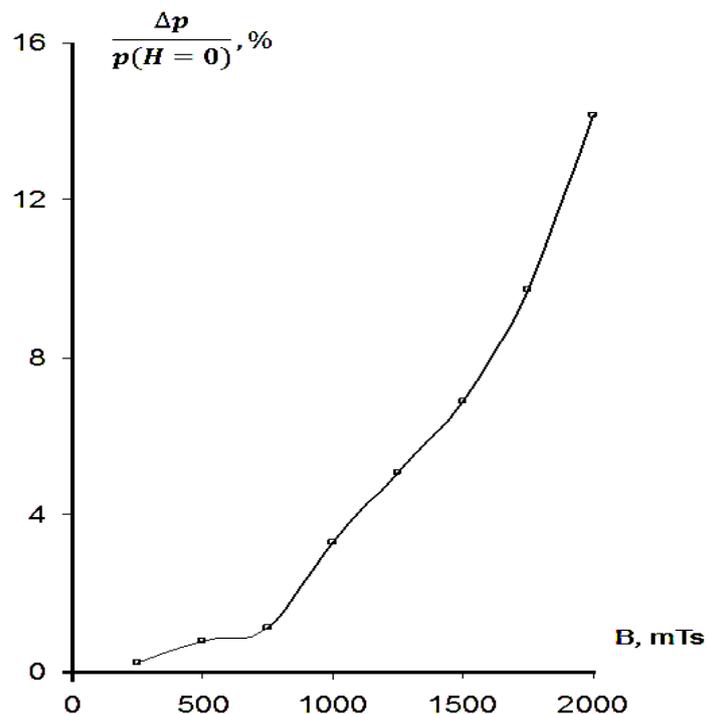


**3-расм. Si<B,Mn> намуналарининг 80 К ҳароратда, турли интеграл ёруғлик интенсивлигидаги ВАТси**

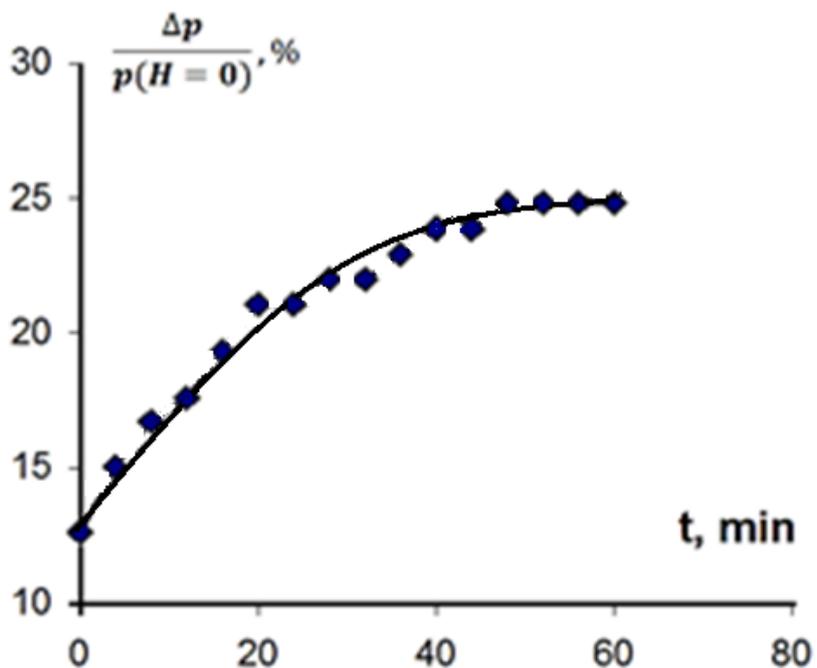
Марганец ионлари билан имплантация қилинган кремний намуналари магнит қаршилигини ўрганиш бўйича тажриба натижалари 4–расмда келтирилган. Расмдан кўринадикки, ўрганилган намуналарнинг хона температурасидаги магнит қаршилиги мусбат бўлиб, экспериментда эришилган энг катта магнит индукцияси қийматида 15% ни ташкил қилади. Бундан ташқари текширилаётган намуналарда хона температурасида магнит қаршилик қийматининг кинетикаси ҳам кузатилади (5-расм).

Кучсиз магнит майдонларида ( $H \approx 0,7$  kOe) намуна 45 минут давомида магнит майдонида ушлаб турилганида магнит қаршилик 25% гача ортади ва унинг магнит майдонига йўналишига боғлиқлигида сезиларли гистерезис кузатилади.

Кучли компенсирланган Si<B,Mn> намуналарида ферромагнетизмнинг пайдо бўлишига кластер ичида марганец ионларининг бор ионлари ёки технологик киришмалар орқали билвосита алмашинув ўзаро таъсири сабабчидир.



4-расм. Si<B,Mn> намуналари магнит қаршилигининг магнит майдон индукциясига боғлиқлиги



5-расм. Ҳона ҳароратида Si<B,Mn> намуналари магнит қаршилиги кинетикаси

Шу билан бирга ўтказувчанлик зонасидаги заряд ташувчилар ёки кристалл дефектлари орқали амалаг ошадиган кластерлараро билвосита алмашинув таъсирлашуви ҳам мавжуд бўлиб, у ҳам магнит тартибланишга олиб келиши мумкин.

Аномал катта магнит қаршиликнинг юзага келиши айнан юқори спинли магнит нанокластерлар мавжудлиги билан тушунтирилади. Магнит қаршилик кинетикасининг кузатилиши яқин тартибли кластерлараро таъсирлашув мавжудлигини билдиради.

## ХУЛОСА

Ионлар имплантацияси усулида олинган кучли компенсирланган кремний намуналарининг магнит, магнитотранспорт, фотоэлектрик ва электрофизик хоссаларини тадқиқ қилиш натижалари асосида қуйидаги хулосалар қилинди:

1. Биринчилардан бўлиб, марганец ионлари имплантация қилиниб кучли компенсирланган, марганец киришмалари бор бўлган ферромагнит кремний намуналарини олиш имкони борлиги кўрсатилган.
2. Кремний монокристалли ичида марганец ионлари бор бўлган нанокластерлар структураси ўрганилиб уларнинг ўлчамлари 5-20 нм гача етиши ва бу нанокластерлар таркибида  $Mn^{2+}$ ,  $Mn^{4+}$  ионлари мавжуд бўлиши, бу ионларнинг кластер ичидаги билвосита алмашинув ўзаро таъсири нанокластерларнинг юқори спинга эга бўлишига сабабчи бўлиши аниқланган.
3. Ионлар имплантацияси усули ёрдамида олинган  $Si\langle B, Mn \rangle$  намуналарида хона ҳароратида 25% миқдорида мусбат магнит қаршилик кузатилди. Бундан ташқари магнит қаршилик катталигининг вақтга боғлиқлиги (кинетикаси) мавжудлиги аниқланган ва уларга асосий сабаб заряд ташувчиларнинг марганецнинг юқори спинли магнит нанокластерларидан спинга боғлиқ сочилиши бўлиб ҳисобланади. Мусбат магнит қаршиликнинг тажрибаларда кузатилган вақтга боғлиқлик кинетикаси эса марганецнинг юқори спинли магнит нанокластерлари магнит моментлари ориентациясининг иссиқлик майдони томонидан тартибсизланиши ва ташқи магнит майдони томонидан тартибланиши орасидаги рақобат таъсирида эканлиги кўрсатади.
4. Биринчи бўлиб кучли компенсирланган  $Si\langle B, Mn \rangle$  намуналарида таркиби Mn ионларидан ташкил топган, алмашинув ўзаро таъсирлашуви билан боғланган, юқори спинли нанокластерларнинг ток транспортига таъсир қилиши кўрсатилган.
5. Биринчи бўлиб, кучли компенсирланган  $Si\langle B, Mn \rangle$  намуналарида хона ҳароратида ферромагнит фаза мавжудлиги аниқланди.

6. Ионлар имплантацияси билан олинган кучли компенсирланган Si<B,Mn> намуналаридаги нанокластерлар Mn<sup>2+</sup>, Mn<sup>4+</sup> ионларнинг билвосита алмашинув ўзаро таъсирлашуви билан боғланганлиги, юқори спинли магнит нанокластерларининг тадқиқ қилинган намуналардаги ферромагнит ҳолатга жавобгарлиги кўрсатилган.
7. Ионлар имплантацияси ёрдамида ўтиш гуруҳи металлари билан кучли компенсирланган ҳолатгача кремнийни легирлаш унда ферромагнит ҳолатнинг пайдо бўлишига олиб келиши ва бу кучли компенсирланган Si<B,Mn> намуналарини спин транзисторлар ёки спинтрониканинг дискрет элементлари учун янги материал сифатида тавсия қилиш мумкинлиги кўрсатилди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.29.08.2017.FM02.04 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)  
ПРИ САМАРКАНДСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**  

---

**САМАРКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**РУЗИМУРОДОВ ЖАЛОЛ ТУРАБЕКОВИЧ**

**МАГНИТНЫЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ  
ИОННО ИМПЛАНТИРОВАННОГО МАРГАНЦЕМ**

**01.04.09 – Физика магнитных явлений**

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

**Самарканд – 2018**

**Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № VM2017.2.PhD/FM75**

Диссертация выполнена в Самаркандском государственном университете.

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

**Научный руководитель:**

**Кувандиков Облокул**

доктор физико-математических наук,  
профессор

**Официальные оппоненты:**

**Мукимов Камил Мукимович**

доктор физико-математических наук,  
академик

**Ўсаров Ўктам Туратович**

кандидат физико-математических наук,  
доцент

**Ведущая организация:**

**Ташкентский государственный  
технический университет**

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании ученого совета PhD.29.08.2017.FM02.04 при Самаркандском государственном университете. (Адрес: 140104, г. Самарканд, Университетский бульвар, 15. Тел.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; факс: (99866) 239-11-40; e-mail: rektor@samdu.uz, Самаркандский государственный университет, Физический факультет, 1-этаж, 63-аудитория).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Самаркандского государственного университета (зарегистрирована под №\_\_\_). Адрес: 140104, г. Самарканд, Университетский бульвар, 15. Тел.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; факс: (99866) 239-11-40.

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 года (протокол реестра № \_\_\_ от «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 года).

**Ашуров Мухсинжон Хуррамович**

Председатель научного совета по присуждению ученых степеней, д.ф.н., академик

**Ражабов Рустам Мустафиевич**

Ученый секретарь научного совета по присуждению ученых степеней, к.ф.н.

**Семенов Денис Иванович**

Председатель научного семинара при научном совете по присуждению ученых степеней, д.ф.н.

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** Сегодняшний интенсивный технический прогресс во всём мире требует создание новых технических средств, которые могут быстро передавать, хранить и обрабатывать большие объемы информации. Для удовлетворения этих потребностей необходимо создать новое поколение приборов, принцип работы которых должен принципиально отличаться от существующих. В новой отрасли микроэлектроники, известной как «спинтроника» для передачи, переработки и хранения информации наряду с зарядом электрона используется его спин. В качестве активной материальной базы спинтроники необходимо использовать материалы имеющие одновременно как с полупроводниковые так и ферромагнитные свойства. На сегодняшний день синтезировано множество разбавленных магнитных полупроводников (РМП) и полупроводниковых соединений с такими свойствами, которые успешно используются в различных электронных устройствах.

В настоящее время во всем мире одним из актуальных вопросов является получение ферромагнитного кремния из немагнитного путём имплантации магнитных ионов. Основными причинами этого являются, низкая стоимость кремния по сравнению с другими магнитными полупроводниками, достигшее своего совершенствования технология получения и превосходная планарная технология создания интегральных приборов. В связи с этим одной из важнейших задач полупроводникового материаловедения является формирование ферромагнитных свойств в кремнии путем легирования его магнитными примесями, изучение магнитных и магнитотранспортных свойств.

В соответствии со Стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан, наиболее важным является обратить особое внимание на разработку эффективных механизмов внедрения достижений научных исследований. В частности, особое внимание выделяется на создание технологии получения новых магнитных полупроводников, исследование электрофизических, фотоэлектрических, магнитных и магнитотранспортных а также оптических свойств и применения их на практике. В год поддержки инновационных идей и технологий, активного предпринимателя поднятие на современный уровень полученных научных результатов. В частности, повышение конкурентоспособности и эффективности изделий микроэлектронной промышленности созданием дешевых, экономичных и принципиально отличающихся от существующих технологий, на основе физических явлений наблюдаемых в магнитных полупроводниковых материалах.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Постановлении Президента Республики Узбекистан №-УП-4947 «О мерах по дальнейшей реализации Стратегии действий по развитию Республики Узбекистан в 2017-2021 годах» от 7 февраля 2017 года и в Постановлении Президента Республики

Узбекистан ПК-№2772 от 13 февраля 2017 года «О приоритетных направлениях развития электронной промышленности 2017-2021 годах» а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Диссертация выполнена в рамках приоритетных направлений развития науки и технологий Республики Узбекистан III. «Энергетика, энергоресурс сбережение, транспорт, машино- и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

**Степень изученности проблемы.** В настоящее время, одним из актуальных проблем современного полупроводникового материаловедения является получение ферромагнитного состояния в кремнии и повышение температуры Кюри выше комнатной, путем введения ионов переходной группы железа Fe, Cr, Co, Mn методом ионной имплантации. Выполнено большое количество работ посвященных исследованиям по образованию высокоспинового состояния и возникновению обменного взаимодействия между магнитными ионами примесей в матрице монокристаллического кремния при его легировании примесями имеющих локализованные магнитные моменты на 3d оболочке. Нанокластерами образованные марганцем или 3d примесями переходных элементов железа приводящие к ферромагнетизму за счет обменного взаимодействия. Разбавленные магнитные полупроводники теоретически и экспериментально изучены известными учеными – Л. Ж. Гаой (Китай), Б. Канеом, Д. Дреюаой, Р. Веббой, М. Болдуком (США), Ю. Фессбендером (Германия), Э. Л. Нагаевым, А. Б. Грановским, С. В. Вонсовким, А. К. Звездиным (Россия) и Т. Дэйтлом (АКШ). На сегодняшний день выявлена возможность формирования ферромагнитного состояния в кремнии при легировании его магнитными примесями методом ионной имплантации.

Следует отметить, что учеными из Узбекистана, академиками М.К.Баходирхоновым, К.М.Мукимовым и профессором О. Кувандиковым также внесен определенный вклад в развитие этого направления.

Однако анализ экспериментальных и теоретических работ последних лет, показывает, что возникновение ферромагнетизма при комнатной температуре и механизмы формирования высокоспиновых нанокластеров ионнолегированным марганцем кремния полностью не определено, а также хорошо не изучены магнитные, магнитотранспортные, фотоэлектрические и электрофизические свойства кремния имплантированного марганцем.

**Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами высшего учебного заведения, где выполнена работа.** Диссертация выполнена по главной теме Самаркандского государственного университета.

**Цель исследования** является создания ферромагнитного состояния в сильно компенсированном монокристаллическом кремнии, легированного ионами марганца методом ионной имплантации, исследование обменного взаимодействия высокоспиновых магнитных нанокластеров и выявление их влияния на транспорт тока.

### **Задачи исследования:**

получить сильнокомпенсированные образцы  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  легированного марганцем методом ионной имплантации;

определить форму и размеры нанокластеров марганца по исследованиям морфологии поверхности сильнокомпенсированных образцов  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  с применением атомного силового микроскопа;

экспериментально измерить намагниченность образцов сильнокомпенсированного кремния  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  и определить механизм намагничивания;

экспериментально исследовать вольтамперные и люксамперные характеристики сильнокомпенсированных образцов  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  при температурах 80 и 300 К;

на основе экспериментальных результатов исследований магнитных, магнитотранспортных, фотоэлектрических и электрофизических свойств сильнокомпенсированных образцов  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$ , предложить модель объясняющую влияние высокоспиновых нанокластеров на транспорт тока в исследованных образцах.

**Объектом исследования** являлись образцы сильно компенсированного монокристаллического кремния легированного марганцем, полученного методом ионной имплантации.

**Предметом исследования** являются процессы формирования ферромагнитной фазы в монокристаллах кремния и ответственности за образования этой фазы и на транспорт тока исследованных образцах, высокоспиновых магнитных нанокластеров.

**Методы исследования.** В качестве основного метода исследования морфологии поверхности образцов  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  использовались атомно-силовая микроскопия (AFM), для определения намагниченности образцов метод Фонера, а для измерения вольтамперных (ВАХ) и люксамперных характеристик (ЛАХ) и магнитосопротивления исследованных образцов использовались стандартные методы, применяемые в таких экспериментах.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

впервые, показана возможность получения на основе кремния сильнокомпенсированного кремния с нанокластерми марганца обладающего ферромагнитными свойствами при ионной имплантации марганца;

обнаружено образование высокоспиновых магнитных нанокластеров в сильнокомпенсированных образцах  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  при ионном легировании кремния марганцем;

обнаружено появление ферромагнетизма в сильнокомпенсированных образцах  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  при комнатной температуре;

впервые, обнаружено положительное магнитосопротивление, его кинетика и гистерезис связанного с магнитными нанокластерами марганца в сильнокомпенсированных образцах  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$ ;

по результатам исследования ВАХ и ЛАХ сильнокомпенсированных образцов  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  при температурах 80 и 300 К, определена существенная разница этих характеристик связанных с нанокластерами содержащих ионы

марганца по сравнению образцами полученных высокотемпературной диффузией;

предложена модель внутрикластерного и межкластерного обменного взаимодействия приводимая к ферромагнетизму в сильнокомпенсированных образцах  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$ .

**Практические результаты исследования** заключаются в том, что при имплантации марганца в немагнитный кремний и при его отжиге  $T = 1050$  °С в течении 1 часа образуется ферромагнитное состояние и ответственными за это состояние являются внутри кластерные и межкластерные обменное взаимодействие, а также возможности использования образцов сильнокомпенсированного кремния ионнолегированным марганцем в качестве нового активного материала для нужд современной спинтроники.

**Достоверность и обоснованность** подтверждается использованием комплекса современных методов исследования намагниченности, ВАХ, ЛАХ и магнитосопротивления исследованных образцов; согласованностью экспериментальных результатов, полученных разными методами, между собой; анализом ошибок измерений; непротиворечивостью полученных результатов общефизическим представлениям и имеющимся литературным данными.

#### **Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость исследований заключается в том, что возможностью управление магнитных свойств кремния введением магнитных примесей, расширение представлений о природе высокоспиновых состояний нанокластеров, образованных в исследованных сильнокомпенсированных образцах  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  с участием ионов марганца связанных с косвенным обменным взаимодействием, а также в расширение представлений о физике магнитных полупроводников.

Практическая значимость работы состоит в получении ферромагнитного кремния, а также использовании его в качестве активной элементной базы при создании новых, дискретных и интегральных приборов спинтроники.

**Внедрение результатов исследования.** На основе результатов исследований морфологии поверхности, магнитных, магнитотранспортных, фотоэлектрических и электрофизических свойств сильнокомпенсированных образцов  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  полученных методом ионной имплантации:

Приведенная в данном диссертационной работе модель высокоспинового состояния марганца в образцах сильнокомпенсированного кремния использовались при исследовании магнитных свойств тонких монокристаллических пленок магнитных силицидов в рамках базового проекта П.9.1.3 «Физические свойства нанокристаллических и низкоразмерных магнетиков» (2010-2012 г.г.) (Институт Физики Сибирского отдела АН РФ, справка от 5 декабря 2017 года, №356-12-215) при построении модели спинового состояния магнитных наноструктур, магнитных силицидов железа и позволило определить закономерности формирования фаз и

свойства магнитных силицидов переходных металлов в планарных наноструктурах металл/кремний;

факт существования магнитосопротивления, её кинетики и гистерезиса, а также методика получения образцов использована в исследованиях гранта N06-02-16604 “Магнитные, магнитотранспортные и магнитооптические свойства разбавленных магнитных полупроводников и мультислоев” (2006-2008 г.г.) (Московский государственный университет РФ, справка от 19 декабря 2017 года). Применение этих научных результатов исследований позволило правильно подобрать режим и методику получения ферро-магнитного кремния;

факт существования и модель косвенного обменного взаимодействия в магнитных нанокластерах марганца использовались при исследовании резонансного возбуждения затухающих волн в периодических наноструктурах полупроводников и сверхпроводников в рамках Украинского национального проекта «The project of the Ukrainian State program "Nanotechnologies and nanomaterials»” Research of resonance excitation of evanescent waves in periodic nanostructures made of semiconductors and superconductors” (Радиоастрономический институт Национальной АН Украины, справка от 26 декабря 2017 года, №237-687/20). Применение этих научных результатов исследований позволяет определить роль спинового состояния магнитных кластеров марганца и внутрикластерного обменного взаимодействия на резонансное возбуждение затухающих волн в периодических наноструктурах;

механизм образования высокоспиновых нанокластеров при ионном легировании образцов кремния марганцем и магнитосопротивления, кинетика и гистерезис магнитосопротивления, электрофизические и магнитные свойства, модели обменного взаимодействия в высокоспиновых нанокластерах типа  $Mn^{2+}$ ,  $Mn^{4+}$  были использованы при выполнении проекта Ф2-ФК-0-47339 Ф2-015 - «Физика квантооразмерных наноструктур» (2012-2016 г.г.) (Справка Агенства по науке и технологиям РУз от 7 ноября 2017 года ФТА – 02-11/941). Использование научных результатов позволило получить магнитные полупроводники содержащие высокоспиновые нанокластеры с большими латеральными сечениями захвата и найти области их практического применения, а также дало возможность определить влияние нанокластеров на процессы токопрохождения.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 5 международных и 6 республиканских научно-практических конференциях.

**Публикации результатов исследования.** Основное содержание диссертации опубликовано в 17 научных работах, из них 12 тезисов, и 5 статей, в журналах рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы. Работа содержит 118 страниц машинописного текста, 36 рисунков и 4 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** диссертации раскрываются актуальность темы, ее соответствие основным направлениям развития науки и технологий в республике, связь диссертационного исследования с научными исследованиями высшего учебного заведения, в котором оно выполнено, и зарубежными исследованиями, степень изученности проблемы, цели и задачи, объект, предмет и методы исследования. Также изложены научная новизна и практическая значимость, достоверность результатов исследования.

В первой главе диссертации «**Литературный обзор теоретических и экспериментальных работ по разбавленным магнитным полупроводникам с нанокластерами примесей**» приводятся литературный обзор экспериментальных и теоретических работ имеющиеся на данный момент связанные с магнитными и электрофизическими свойствами разбавленных магнитных полупроводников. Кроме того, в обзоре приведены краткое содержание работ посвященных изучению электрофизических, оптических и магнитных свойств кремния, легированного марганцем, различными методами.

Исходя из цели и поставленной задачи исследований, рассмотрены экспериментальные и теоретические аспекты влияния магнитных нанокластеров состоящих из магнитных примесей на магнитные свойства и магнитосопротивления полупроводников, роль и влияние косвенного обмена в образовании магнитных свойств разбавленных магнитных полупроводников. Обзор сделан на примере полупроводников содержащих высокоспиновые центры, состоящих из примесей переходных элементов группы железа, в частности, особой акцент сделан работам посвященным изучению полупроводниковых материалов, легированных марганцем, различными методами.

Анализ литературного обзора показал, что низкоразмерные структуры и тонкие плёнки содержащие кластеры обладают аномальными свойствами. Примерами таких аномальных свойств можно считать гигантское и колоссальное магнитосопротивление, фазовый переход металл-диэлектрик, аномальный квантовый и дробно квантовые эффекты Холла и др. Во всех описанных структурах характер их магнитных и транспортных свойств определяют внедренные ионы Mn или структуры на основе ионов Mn образованные различными механизмами химических связей.

Если сочетать технологию создания микроэлектронных устройств, достигшего своего совершенствования с технологией получения сильно-компенсированного кремния ионнолегированного марганцем, станет возможным получение процессора и памяти с большой емкостью в одном

кристалле. Кроме того, при введении марганца в кремний методом ионной имплантации, последний образует глубокие уровни в запрещенной зоне кремния, которые в свою очередь сильно изменяет генерационно-рекомбинационные свойства материала. Поэтому важными является знать информацию о таких глубоких уровнях. На основе обзора сделанного в первой главе были поставлены следующие цели и задачи:

Экспериментальное и теоретическое исследования низкоразмерных структур (кластеры состоящий только из атомов марганца или комплексы образованные с участием ионов марганца) в сильнокомпенсированных образцах  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  полученных методом ионной имплантации;

Оценка концентрации кластеров образованных с участием ионов марганца и их зарядовые состояние в сильнокомпенсированных образцах  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  полученных методом ионной имплантации;

Теоретическое объяснение электрофизических и фотоэлектрических свойств (ВАХ, ЛАХ) сильнокомпенсированных образцов  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  с учетом влияния магнитных нанокластеров;

Измерение и анализ результатов магнитосопротивления сильно компенсированных образцов  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$ ;

Измерение и анализ результатов намагниченности сильно компенсированных образцов  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$ .

Во второй главе «**Экспериментальные установки, методика эксперимента**» приводится описание установки, методов и техники экспериментальных исследований. На основе поставленной задачи диссертационной работы были выбраны следующие методы эксперимента:

- измерение намагниченности образцов методом Фонера.
- получение изображения морфологии поверхности образцов на атомном силовом микроскопе.
- измерение электрофизических параметров как ВАХ и ЛАХ при различных температурах стандартными методами.

Эти методы измерения в совокупности дают полную информацию о магнитных и электрофизических свойствах ионноимплантированного, сильнокомпенсированного  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  исходя из которых, можно делать определенные теоретические выводы.

Наличие наноразмерных структур можно определить на прямую, из снимка полученного атомно-силовым микроскопом, а косвенно из результатов измерения ВАХ, ЛАХ, магнитосопротивления. При наличии магнитных нанокластеров или центров, в немагнитном полупроводнике, намагниченность образцов определяется суммой магнитных моментов этих нанокластеров или магнитных центров и поэтому для измерения намагниченности был выбран чувствительный метод измерения намагниченности – метод вибрационного магнитометра.

В этой главе приведена подробная описания методика экспериментальных установок.

В третьей главе диссертации «**Магнитные свойства сильнокомпенсированного  $\text{Si}\langle\text{B}, \text{Mn}\rangle$** » приводится технология получения сильно-

компенсированных образцов Si<B,Mn> легированного марганцем методом ионной имплантации, результаты исследование магнитных свойств, а также механизмов их возникновения.

Имплантация ионов марганца на полированную поверхность кремниевых пластин *p*-типа с удельным сопротивлением  $\rho = 10$  Ом·см, осуществлялась на установке ИЛУ-3 при энергии ионов 40 кэВ с дозой имплантации в интервале  $\sim 10^{16} \div 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>. Из пластин вырезались образцы размерами  $5 \times 3 \times 0,5$  мм<sup>3</sup> и помещались в кварцевые ампулы, отжигались в интервале температур 1000°-1200°С в течение одного часа. После отжига ампулы с образцами охлаждались со скоростью  $\sim (600-800)^{\circ}\text{C}/\text{с}$  выбрасыванием их в воду или трансформаторное масло. Вышеизложенные условия легирования позволили изготовить сильно компенсированные образцы Si<B,Mn> как *n*- так и *p*- типа с удельными сопротивлениями в интервале  $\rho = 10^2 \div 10^5$  Ом см при комнатной температуре.

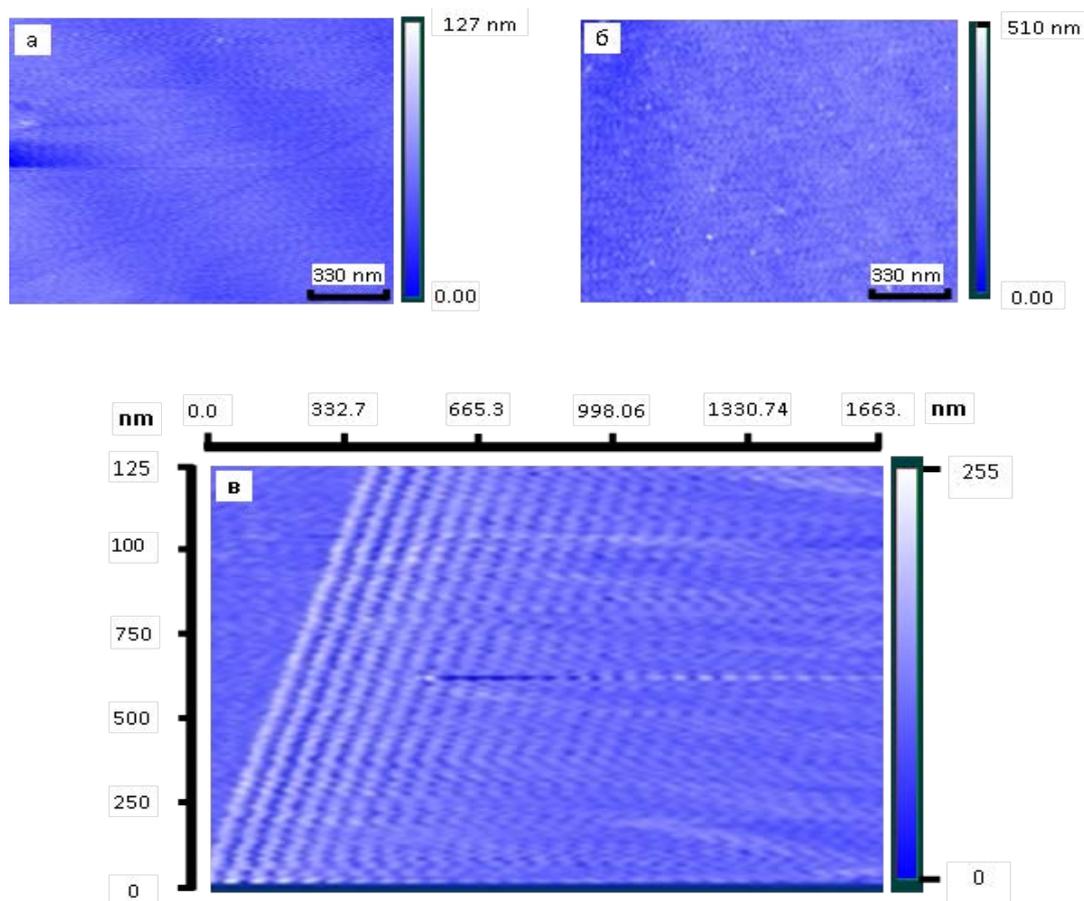
Для проверки возможности образования кластеров с участием атомов марганца были проведены теоретические расчеты на основании известной методики<sup>1</sup>. Теоретическим путем вычислена зависимость вероятности образования кластеров, состоящих из двух и более примесных атомов, от концентрации примесей. Для образования нанокластеров в кремнии доза имплантации должна быть выше порядка  $\sim 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>. Были определены граничные дозы имплантации для образования нанокластеров с помощью ионной имплантации. Предложена модель магнитных нанокластеров, которые расположены в различных координационных сферах монокристалла кремния и связанных между собой косвенным обменным взаимодействием.

С помощью изображений (см. рис. 1) полученных атомным силовым микроскопом доказано образование пирамидаобразных нанокластеров имеющих геометрические размеры порядка 5–20 нм, состоящих из примесных атомов марганца и взаимодействующих между собой косвенным обменным взаимодействием. На рисунках 1а,б,в приведена морфология поверхности монокристаллического кремния до и после имплантации. Из рис.1а видно, что поверхность образцов до имплантации «чистая», а после имплантации дозой  $10^{16}$  ион/см<sup>2</sup> начинается образование нанокластеров (островки в рис.1б), при достижении дозы имплантации до  $\sim 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> начинает расти длина кластеров, а ширина достигает до  $\sim 20$  нм и на поверхности монокристаллического кремния образуется волнообразная наноструктура (рис.1в).

Приведено теоретическое обоснование и экспериментальные доказательства существования ферромагнетизма, обусловленного магнитными нанокластерами марганца в сильно компенсированных образцах Si<B,Mn>. Исследование намагниченности сильнокомпенсированных образцов Si<B,Mn> при комнатной температуре, показывает насыщение намагниченности и наличие гистерезиса (см. рис. 2). Как видно из рис. 2,

<sup>1</sup> В. Б. Гиноман. Труды физического института им. П.Н. Лебедева АН СССР. –Москва. 1978. Т. 104. с.54.

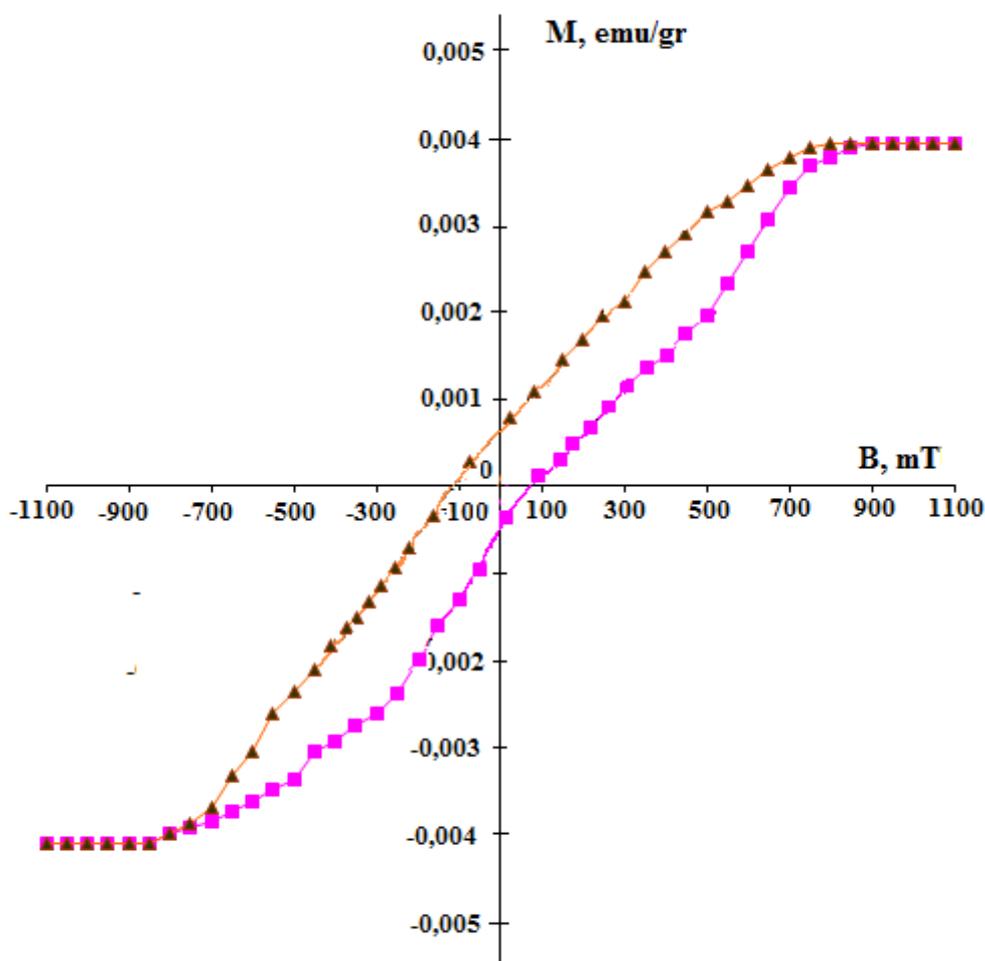
намагниченность образцов насыщается при магнитном поле 550 мТл и его значения составляет  $4 \times 10^{-3}$  едг/г ( $A \times m^2 / kg$ ).



(а) – до имплантации ионов  $Mn^+$ , (б) – доза имплантации  $D=10^{16} \text{ см}^{-2}$ , (в) – доза имплантации  $D=10^{17} \text{ см}^{-2}$ ,  $E = 40 \text{ кэВ}$ .

**Рис.1. Изображение морфологии поверхности образцов монокристаллического кремния, полученного на атомном силовом микроскопе (AFM)**

Кроме того, наблюдается заметный гистерезис намагниченности, который присущ только ферромагнитным материалам. Наличие насыщения намагниченности и гистерезиса при 300 К в сильнокомпенсированных образцах  $Si\langle B, Mn \rangle$  полученного ионной имплантацией доказывают, что они по свойствам является ферромагнитными. Наблюдаемая кинетика намагниченности свидетельствует о существовании конкуренции между ферромагнитным упорядочением и тепловым разупорядочением магнитных моментов нанокластеров. Установлено что при выдержки образцов в магнитном поле выше 1 Тл (10 kOe) в течении 10 минут, значения намагниченности образцов повышается более чем на 25%. Это объясняется тем, что при полях  $H > 10 \text{ kOe}$ , происходят изменения в характере внутрикластерных взаимодействий, обусловленное структурными изменениями или ростом степени локализации электронов. Природа ферромагнетизма в сильно компенсированных образцах  $Si\langle B, Mn \rangle$  в основном связана косвенным обменным взаимодействием между высокоспиновыми кластерами содержащие ионы марганца.



**Рис.2. Намагниченность образцов Si<B,Mn>**

В случае сильнокомпенсированных образцов Si<B,Mn> в состав кластера в основном входят ионы  $Mn^{2+}$ ,  $Mn^{3+}$ ,  $Mn^{4+}$ . При концентрациях  $N_D = 5 \cdot 10^{17} \div 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  парная модель обменного взаимодействия не применима, поскольку, в таких концентрациях атомы примесей образуют кластеры, состоящих из трех или намного большего числа атомов. Кроме того, в  $3d$  оболочке марганца имеется 5 электронов с параллельными спинами, и это способствует образованию высокоспинового состояния в матрице кремния. При этом концентрация парных примесей марганца с прямым обменом очень мала и не влияют на намагниченность. Поэтому можно сделать вывод, что по модели Зинера<sup>2</sup> вид примитивных кластеров в образцах ионно-легированных марганцем состоит из комплексов в общем виде  $M^{3+}—O^{2-}—M^{4+}$ . При этом в образцах Si<B,Mn> анионами служат ионы  $B^-$  или ионы кислорода  $O^{2-}$  концентрация которого в пределах  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  в кремнии выращенного по Чохральскому. Но концентрация ионов  $B^-$   $10^3$

<sup>2</sup> Л. И. Королева. Магнитные полупроводники. –М.: Физический факультет МГУ, 2003. -313 с. см.с 236.

порядка меньше чем концентрация кислорода и можно сказать в двойном обмене основной роль играют ионы кислорода.

На основе полученных результатов исследований можно сказать, что нанокластеры содержащие ионы марганца имеют высокоспиновое магнитное состояние и взаимодействие двойного обмена по Зинеру между ними, приводят к ферромагнитному состоянию. Но это недостаточно для формирования макроскопического ферромагнетизма в сильно компенсированных образцах  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$ . Для возникновения такого состояние необходимо существование обменного взаимодействия не только внутри кластеров, но и между кластерами, и такое взаимодействие необходимо обеспечить ферромагнитное состояние образцов в целом. Природа такого межкластерного обмена может быть объяснена на основе теории обмена Рудермана–Киттеля–Касуя–Иосиды (РККИ).

В этой модели рассматривается две электронные подсистемы с коллективизированными электронами проводимости ( $s$ -электроны) и локализованные  $d(f)$ -электроны. Гамильтониан в этой модели имеет следующий вид:

$$H = H_M + H_A + H_B,$$

где  $H_M$ –гамильтониан магнитной подсистемы (обычно он берется в гейзенберговском виде  $H_M = J_{ij}S_iS_j$ ; здесь  $J_{ij}$ –обменный интеграл для  $i$ -го и  $j$ -го атомов,  $S_i, S_j$ –соответствующие спиновые операторы),  $H_A$ – гамильтониан описывающий обмен между электронами проводимости и спинами магнитных ионов,  $H_B$ –гамильтониан подвижных носителей заряда (электронов, дырок).

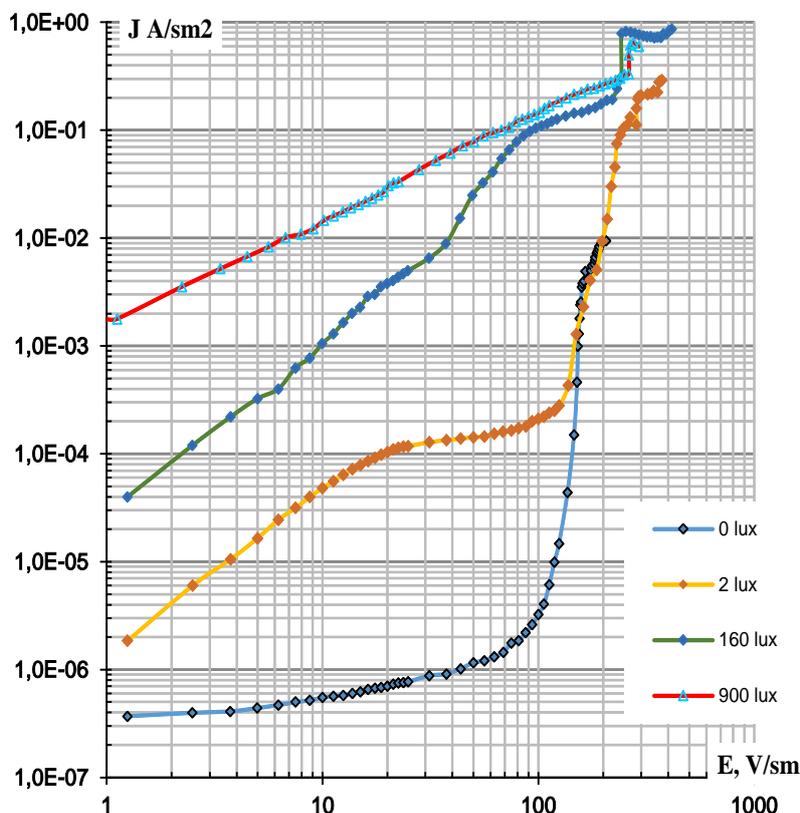
Таким образом, показано, что для описания межкластерных взаимодействий наиболее предпочтительно использовать гамильтониан  $H_A$ .

В четвертой главе диссертации «**Кинетические свойства (ВАХ и ЛАХ) сильнокомпенсированных образцов  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  с магнитными нанокластерми**» приводятся результаты по исследованию кинетических свойств сильнокомпенсированных образцов  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  ионноимплантированного марганцем, а именно вольтамперные, люксамперные характеристики и магнитосопротивление образцов. Эти физические характеристики образцов  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  должны дать не только фундаментальные сведения о наличии квантовых точек с магнитными свойствами ферромагнитного характера, а также определяют сферу их практических применений.

Вольтамперные и люксамперные характеристики определяющие характер кинетических свойств и возникновения магнитосопротивления объяснены влиянием магнитных нанокластеров на транспорт свободных носителей.

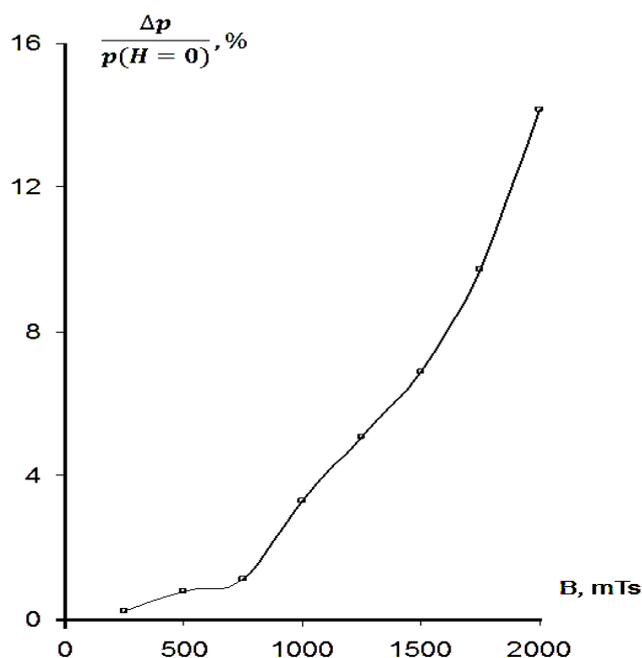
На рис.3 приведены ВАХ измеренные при температуре жидкого азота при различных значениях освещенности. Из рис.3 видно, что кривая ВАХ в зависимости от интенсивности освещения  $L$  состоит из нескольких характерных участков, свойственных полупроводникам содержащих глубокие уровни, описываемых отношением вида  $I=U^n$ . Вид теневого ВАХ

существенно меняется с повышением интенсивности освещения и причиной этому является наличие центров (нанокластеров) с большим латеральным сечением захвата носителей заряда, перезарядка которых существенно влияет на вид ВАХ и характер транспорта тока. Электрические, фотоэлектрические и другие свойства сильно компенсированного кремния существенным образом зависят от степени компенсации  $K$  и от концентрации примесей.

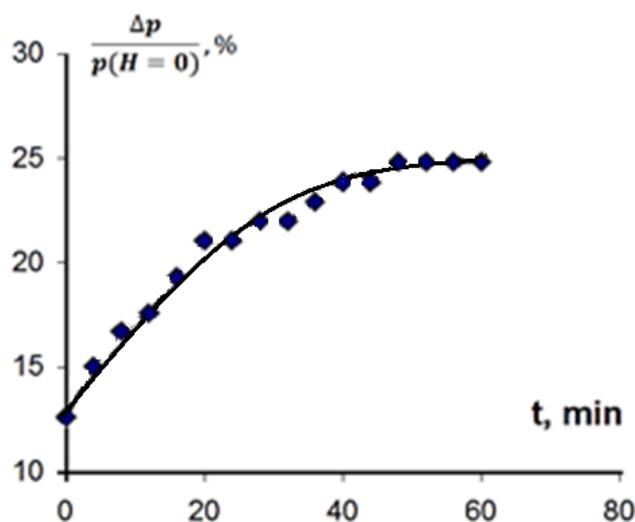


**Рис.3. ВАХ образцов Si<B,Mn> при 80 К и различных значениях интенсивности освещения интегрального света**

Результаты экспериментов по изучению магнитосопротивления образцов кремния, имплантированных ионами марганца приведены на рис. 4. Как видно из рис.4 сильнокомпенсированные образцы Si<B,Mn> имеет положительное магнитосопротивление и его значения при наибольшем значении магнитной индукции, достигнутые в экспериментах составляет 15%. Кроме того, наблюдается кинетика магнитосопротивления (рис.5.) при комнатной температуре. Установлено, что при слабых магнитных полях ( $H \approx 0,7$  kOe) выдержка образцов в магнитном поле в течении 45 минут приводит к увеличению магнитосопротивления на 25% и наблюдается заметный гистерезис в зависимости от направления магнитного поля, а также наблюдался заметный гистерезис магнитосопротивления при комнатной температуре.



**Рис.4. Зависимость магнитосопротивления образцов Si<B,Mn> от величины магнитной индукции**



**Рис.5. Кинетика магнитосопротивления образцов Si<B,Mn> при комнатной температуре**

Возникновение ферромагнетизма в сильнокомпенсированных образцов Si<B,Mn> обусловлено внутрикластерным косвенным обменным взаимодействием посредством ионов примеси бора или технологических примесей. Существует еще косвенное обменное взаимодействие межкастерного характера через зоны проводимости или через дефекты кристалла.

Возникновение аномального большого магнитосопротивления обусловлено именно наличием высокоспиновых магнитных нанокластеров. Наличие, кинетики магнитосопротивления указывает на межкастерное взаимодействие ближнего порядка.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведённых исследований по изучению магнитных, магнитотранспортных, фотоэлектрических и электрофизических свойств сильнокомпенсированных образцов Si<B,Mn> можно сделать следующие выводы:

1. Впервые показана возможность получения ферромагнитных образцов сильнокомпенсированного кремния с примесью марганца с помощью метода ионной имплантации.
2. По исследованиям структуры нанокластеров в монокристаллах кремния установлено, что их размеры составляет порядка 5-20 нм и в основном содержит ионы  $Mn^{2+}$  и  $Mn^{4+}$ , а причиной высокоспинового состояния в них является внутрикластерное косвенное обменное взаимодействия между ионами  $Mn^{2+}$  и  $Mn^{4+}$ .
3. В образцах Si<B,Mn>, полученных методом ионной имплантации наблюдается положительное магнитосопротивление достигающие более чем 25 % при комнатной температуре. Кроме этого, при 300 К и при слабых магнитных полях наблюдается кинетика положительного магнитосопротивления. Причиной этому является спинзависимое рассеяние носителей заряда от высокоспиновых магнитных нанокластеров марганца. Наблюдаемая временная кинетика положительного магнитосопротивления указывает на существования конкуренцию между тепловым разупорядочением и упорядочением внешним магнитным полем, ориентацию магнитных моментов высокоспиновых магнитных нанокластеров марганца.
4. Впервые показано влияние высокоспиновых нанокластеров состоящих из ионов Mn на транспорта тока в сильнокомпенсированных образцов Si<B,Mn>.
5. Впервые установлено существование ферромагнитной фазы в сильнокомпенсированных образцах Si<B,Mn> при 300 К.
6. Показано, что в сильнокомпенсированных образцах Si<B,Mn> полученного методом ионной имплантации, образуется высокоспиновые магнитные нанокластеры типа  $Mn^{2+}$ ,  $Mn^{4+}$  связанные между собой косвенным обменным взаимодействием и эти нанокластеры является ответственными за ферромагнитное состояние в исследованных образцах.
7. На основе результатов исследований показано, что при легировании кремния атомами элементов переходной группы железа до высокой степени компенсации могут привести его в ферромагнитную фазу и это указывает на возможность применения сильнокомпенсированных образцов Si<B,Mn> в качестве активной элементной базы спиновых транзисторов и других дискретных элементов спинтроники.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARD OF THE SCIENTIFIC DEGREE  
DOCTOR OF PHILOSOPHY PhD.29.08.2017.FM02.04  
SAMARKAND STATE UNIVERSITY**

---

**SAMARKAND STATE UNIVERSITY**

**RUZIMURODOV JALOL TURABEKOVICH**

**MAGNETICS AND TRANSPORT PROPERTIES ION IMPLANTATION  
SILICON WITH MANGANESE**

**01.04.09 – Physics of magnet phenomena**

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

**Samarkand – 2018**

**The theme of doctor of philosophy (PhD) on physical-mathematical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number BM2017.2.PhD/FM75**

The dissertation has been prepared at Samarkand State University.

The abstract of the dissertation is posted in three (Uzbek, Russian, English (Resume)) languages on the website [www.samdu.uz](http://www.samdu.uz) and on the website of «ZiyoNet» information and educational portal ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)).

**Scientific supervisor:**

**Kuvandikov Oblokul**

Doctor of physical-mathematical sciences, professor

**Official opponents:**

**Mukimov Komil Mukimovich**

Doctor of physical-mathematical sciences, academic

**Usarov Uktam Turatovich**

candidate of physical-mathematical sciences, dotsent

**Leading organisation:**

**Tashkent State Technical University**

Dissertation defense will be held on «\_\_\_» \_\_\_\_\_2018 at \_\_\_\_\_ at the meeting of Scientific Council number PhD.29.08.2017.FM.02.04 at Samarkand State University. (Address: University Boulevard 15, Samarkand, 140104, Uzbekistan, Ph.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; fax: (99866) 239-11-40; e-mail: rektor@samdu.uz. cabinet 105, ground floor, the department of Physics, Samarkand State University).

Dissertation is possible to review in Information-resource centre at Samarkand State University (is registered №\_\_\_\_\_) (Address: University Boulevard 15, Samarkand, 140104, Uzbekistan, Ph.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; fax: (99866) 239-11-40.

Abstract of dissertation sent out on «\_\_\_» \_\_\_\_\_2018 year  
(Mailing report № \_\_\_\_\_ on «\_\_\_» \_\_\_\_\_2018 year)

**M.Kh.Ashurov**

Chairman of scientific council  
on award of scientific degrees,  
D.F.-M.S., academician AS UzR

**R.M.Radjabov**

Scientific secretary of scientific council  
on award of scientific degrees,  
C.F.-M.S., docent

**D.I.Semenov**

Chairman of scientific seminar under scientific  
council on award of scientific degrees,  
D.F.-M.S.

## INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

**The aim of the research work** was definitions of possibility of creation of a ferromagnetic condition in a highly compensated monocrystalline silicon doping by method ion implantations and complex investigation of formation nanocluster structures, and also to research of electrophysical, magnetic properties.

**The object of the research work are** Si<B,Mn> samples of highly compensated silicon obtained by ion implantation method and magnetic nanoclusters of manganese and them ferromagnetism.

### **Scientific novelty of the research work:**

for the first time, is shown, possibility of obtaining by ion implantation method monocrystalline highly compensated semiconductor, containing high spin nanoclusters with ferromagnetic properties;

for the first time, it is revealed formations high spin magnetic nanoclusters manganese at ion implantation and under certain conditions annealing of samples;

it was found ferromagnetism of samples Si <B, Mn> at a room temperature;

for the first time, it is revealed positive magnetoresistance and a kinetics and hysteresis of magnetoresistance connected with magnetic nanoclusters of manganese in an ion implanted samples Si <B, Mn>;

it is revealed the mechanism of magnetization and existence of the ferromagnetic condition, influencing transport properties of samples;

existence of a ferromagnetic condition it is explained by existence of exchange interaction between electrons of ions of impurity in a clusters and interaction between clusters;

it was found out that interaction between clusters and exchange interaction in clusters is not entered within the limits of one theory.

**Implementation of the research results.** On the basis of the results obtained in the research of the magnetic and transport properties of samples of highly-compensated silicon:

the fact of the existence of magnetoresistance, the kinetics of magnetoresistance and hysteresis, as well as the method for obtaining samples was used in the research of the grant N06-02-16604 (Department of Magnetism, Moscow State University, certificate dated December 7, 2017). The application of these scientific research results allowed us to correctly select the regime and method for obtaining ferromagnetic silicon;

the fact of existence and the model of indirect exchange interaction in magnetic nanoclusters of manganese were used in the research of resonant excitation of damped waves in periodic nanostructures of semiconductors and superconductors on the Ukrainian National Project "The Project of the Ukrainian State Program" Nanotechnologies and nanomaterials" " Research of resonance excitation of evanescent waves in periodic nanostructures made of semiconductors and superconductors "(Radio Astronomical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, certificate dated December 26, 2017.) Application of these scientific results The sequence allows to determine the role of the spin state of

magnetic manganese clusters and intracluster exchange interaction on the resonant excitation of damped waves in periodic nanostructures;

The mechanism of the formation of high-spin nanoclusters in the lining of samples of Si <B, Mn> manganese and their electrophysical and magnetic properties, models of high-spin nanoclusters of the  $Mn^{+2}$ ,  $Mn^{+4}$  type were used in the project F2-015 - "Quantum-dimensional nanostructures physics" (2012-2016 (reference of the Agency for Science and Technology of the Republic of Uzbekistan on November 7, 2017 FTA - 02-11 / 941). The use of scientific results made it possible to compare theoretical conclusions about the magnetic properties and the spin state of quantum dots.

**Structure and scope of the dissertation.** The structure of the dissertation consists of introduction, four chapters, conclusion, and a list of used literature. It is set out on 118 pages of text, contains 36 figures, 4 tables and a list of used literature consists of 132 titles.

**ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED PAPERS**

1- бўлим (1 часть; part1)

1. E.U. Arzikulov, J.T. Ruzimurodov. Formation of high-spin molecular manganese clusters in a monocrystalline silicon matrix and the associated positive magnetic resistance // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. –Berlin. –2006. –V.42, –№3. –pp.102-105. [№11, SPRINGER, IF=0.289]
2. E.U. Arzikulov, J.T. Ruzimurodov. Magnetic Resistance of Silicon Specimens with Manganese Impurities // Journal of Communications Technology and Electronics. –Berlin. –2007. –V.52, –№ 9. –pp. 1049-1053. [№11, SPRINGER, IF=0.446]
3. Э.У. Арзикулов, Ж.Т. Рўзимуродов, А.М. Умаров, О.А. Норқулов. Влияние продольного и поперечного магнитного поля на параметры автоколебаний фототока в кремнии имплантированного марганцем // СамДУ илмий тадқиқотлар ахборотномаси. –Самарканд. –2009. –№3. с.39-42. [01.00.00 №2]
4. О.К. Кувандиков, Э.У. Арзикулов, Ж.Т. Рuzимуродов. Ферромагнетизм кремния ионноимплантированного марганцем // Доклады Академии наук Республики Узбекистан. –Ташкент. –2012. –№5. с.28-31. [01.00.00 №7]
5. Е. У. Арзикулов, Ж.Т. Рўзимуродов. Квант нуқтали кучли компенсирланган кремний намуналари вольт–ампер ва люкс-ампер тавсифномалари // СамДУ илмий тадқиқотлар ахборотномаси. –Самарканд. –2017. –№5. с.87-92. [01.00.00 №2]

2- бўлим (часть 2; part 2)

6. О. К. Кувандиков, Ж.Т. Рuzимуродов. Природа ферромагнетизма в кремнии ионно имплантированного марганцем // Материалы республиканской научно-практической конференции «Актуальные проблемы физики». –2017. 14 Октябрь. Ташкент, –С. 210-212. 80%
7. О.К. Кувандиков, Ж.Т. Рuzимуродов. Магнитосопротивление и кинетика магнитосопротивления в сильно компенсированном Si<B,Mn> // Материалы IV Международной конференции «Актуальные проблемы молекулярной спектроскопии конденсированных сред». –2013. Май 29-31. Самарканд, –С.117-118. 80%
8. Э. У. Арзикулов, Ж. Т. Рuzимуродов. Образование магнитных кластеров в кремнии ионно-имплантированного марганцем // Материалы I научно-практической конференции (с международным участием) «Зелёная химия» в интересах устойчивого развития». –2012. Март 20-28. Самарканд, –с.323-325. 80%

9. О.К. Кувандиков, Э.У. Арзикулов, Ж.Т. Рузимуродов. Ферромагнетизм кремния ионно имплантированного марганцем // Материалы V Байкальской международной конференции «Магнитные материалы. Новые технологии» –2012. Сент. 21-25. Иркутск, –с. 145-146. 60%
10. Ж.Т. Рузимуродов. Магнит киришмали Si<B,Mn> намуналарининг магнит хусусиятлари // «Замонавий физиканинг долзарб муаммолари» Республика илмий-амалий конференцияси материаллари. –2012. Бухоро, –18-19 б.
11. J.T Ruzimurodov. Ferromagnetism Mn ion implanted silicon samples // Proceeding of the International Conference on Electrodynamics of complex Materials for Advanced Technologies, PLASMETA'11. –2011. Sept. 21-26. Samarkand, –P. 27. 100%
12. Ж.Т. Рузимуродов. Mn билан легирланган кремний намуналарининг магнитланиши ва магнит хоссалари // «Физика ва физик таълимнинг замонавий муаммолари» Республика илмий анжумани. –2009. Декаб. 11-12. Самарқанд, –51-52 б.
13. Э. У. Арзикулов, J.T Ruzimurodov. Magnetic properties of mono-crystalline samples of silicon with quantum dots // Symposium on Optics & Photonics. – 2005. July 31-4 Aug. –San Diego CA, USA. –p. 90. 50%
14. Ж.Т. Рузимуродов. Кремний асосидаги квант нуқталарнинг люкс-ампер тавсифномаси // «Яримўтказгичлар физикасининг фундаментал ва амалий муаммолари» Халқаро илмий-услубий конференция материаллари. –2005. Декаб. 20-21. Андижон, –С. 123-124. 100%
15. E.U. Arziqulov, J.T Ruzimurodov. Formation of High-Spin Molecular Clusters Mn<sup>6</sup> and Mn<sup>12</sup> in Monocrystal Silicon Matrix and the Related Positive Magnetoresistance // MRS. Spring Meeting. –2004. April 12-16. San Francisco, CA. USA. –p. 293. 80%
16. Э.У. Арзикулов Ж.Т. Рузимуродов. Образование высокоспиновых молекулярных кластеров Mn<sup>6</sup> и Mn<sup>12</sup> в монокристаллической матрице кремния и связанные с ними положительное магнитосопротивление // Материалы международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». –2003. Нояб. 26-29. Ташкент, –с. 158 60%
17. Э.У. Арзикулов Ж.Т. Рузимуродов. О возможности образования квантовых точек атомов марганца внедренных в монокристаллический кремний методом ионной имплантации и высокотемпературной диффузии // Материалы международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». –2003. Нояб. 26-29. Ташкент, –с. 189 50%

*Автореферат СамДУ «Илмий ахборотнома» журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилиб, ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари ўзаро муофиқлаштирилди (03.02.2018 йил)*

*2008 yil 19-iyun 68-buyruq.  
2018yil 28-yanvarda noshirlik bo‘limiga qabul qilindi.  
2018 yil 6-fevralda original-maketdan bosishga ruxsat etildi.  
Bichimi 60x84/ 1,16. «Times New Roman» garniturasini.  
Ofset qog‘ozini.Shartli bosma tabog‘i 2,5.  
Nashriyot hisob tabog‘i 2,0. Adadi 100 nusxa. 32 -buyurtma.*

---

*SamDU bosmaxonasida chop etildi.  
140104, Samarqand sh., Univyersitet xiyoboni, 15.*



