

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР  
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ, САМАРҚАНД ДАВЛАТ  
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ  
DSc.27.06.2017.FM/Т.34.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ИСЛОМ КАРИМОВ НОМИДАГИ  
ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**МАВЛУНОВ ҒИЁСИДДИН ҲАЙДАРОВИЧ**

**КИРИШМА АТОМЛАРИ НАНОКЛАСТЕРЛАРИГА ЭГА  
БЎЛГАН КРЕМНИЙНИНГ МАГНИТ ХОССАЛАРИНИ БОШҚАРИШ**

**01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси**

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc)  
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**ТОШКЕНТ – 2018**

**Докторлик (DSc) диссертацияси автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата докторской (DSc) диссертации**

**Contents of the Doctoral (DSc) Dissertation Abstract**

**Мавлонов Ғиёсиддин Ҳайдарович**

Киришма атомлари нанокластерларига эга бўлган

кремнийнинг магнит хоссаларини бошқариш .....3

**Мавлонов Ғиёсиддин Ҳайдарович**

Управление магнитными свойствами кремния с

нанокластерами примесных атомов .....27

**Mavlonov Giyosiddin KHaydarovich**

Control of the magnetic properties of silicon

with nanoclusters of impurity atoms .....51

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works.....60

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР  
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ, САМАРҚАНД ДАВЛАТ  
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ  
DSc.27.06.2017.FM/Т.34.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ИСЛОМ КАРИМОВ НОМИДАГИ  
ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**МАВЛУНОВ ҒИЁСИДДИН ҲАЙДАРОВИЧ**

**КИРИШМА АТОМЛАРИ НАНОКЛАСТЕРЛАРИГА ЭГА  
БЎЛГАН КРЕМНИЙНИНГ МАГНИТ ХОССАЛАРИНИ БОШҚАРИШ**

**01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси**

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc)  
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**ТОШКЕНТ – 2018**

**Физика-математика фанлари бўйича доктор (DSc) диссертацияси мавзуси  
Ўзбекистан Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий Аттестация  
комиссиясида B2017.1.DSc/FM79.рақам билан рўйхатга олинган**

Диссертация Ислон Каримов номидаги Тошкент давлат техника университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида [fti.uz](http://fti.uz) ҳамда «Ziyonet» Ахборот-таълим портали [www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz) манзилларида жойлаштирилган.

**Илмий маслаҳатчи:** **Илиев Халмурод Маджитович,**  
Физика-математика фанлари доктори, профессор

**Расмий оппонентлар:** **Рембеза Станислав Иванович**  
Физика-математика фанлари доктори, профессор

**Зайнобидинов Сирожиддин**  
Физика-математика фанлари доктори, академик

**Камалов Амангелди Базарбаевич**  
Физика-математика фанлари доктори, доцент

**Етакчи ташкилот:** Тошкент ахборот технологиялари университети

Диссертация ҳимояси Физика-техника институти, Ион-плазма ва лазер технологиялари институти, Самарқанд давлат университети ҳузуридаги DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2018 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ соат \_\_\_\_\_ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100084, Тошкент ш., Бодомзор йўлиқўчаси, 26-уй. Физика-техника институти мажлислар зали. Тел./факс: (99871) 235-42-91, e-mail: [info.fti@uzsci.net](mailto:info.fti@uzsci.net))

Диссертация билан Физика-техника институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин ( \_\_\_\_\_ рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 100084, Тошкент ш., Бодомзор йўли қўчаси, 26-уй. Физика-техника институтининг маъмурий биноси, мажлислар зали. Тел./факс: (99871) 235-30-41.

Диссертация автореферати 2018 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ да тарқатилди.

(2018 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ даги \_\_\_\_\_ рақамли реестр баённомаси).

**С.А. Бахрамов**  
Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш раиси,  
ф.-м.ф.д., профессор, академик

**А.В. Каримов**  
Илмий даражалар берувчи Илмий  
кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф.д., профессор

**И.Г. Атабаев**  
Илмий даражалар берувчи Илмий  
кенгаш қошидаги илмий семинар раиси,  
ф.-м.ф.д., профессор

## **КИРИШ (докторлик (DSc) диссертациясининг аннотацияси)**

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Жаҳон миқёсида бугунги кунда жадаллик билан ривожланаётган яримўтказгичлар соҳасида истиқболли йўналишлардан бири бўлган магнит наноструктурали материалларни ва улар асосида катта интеграция даражасидаги ҳажмий интеграл микросхемаларни олиш, магнит хотирали элементларни, магнит қаршиликли сенсорларни, янги турдаги сезгир магнит датчикларни, фотомагнит асбобларни яратиш ҳамда уларни такомиллаштириш бўйича илмий изланишлар олиб борилмоқда. Бу борада наноэлектроника ва саноат электроникасининг асосий хомашёси бўлган кремнийнинг кристалл панжаралари ва фаза таркибини сезиларли даражада бузилишга олиб келмаган ҳолда, магнит хусусиятга эга бўлган наноструктураларни ҳосил қилиш ва уларнинг магнит хоссаларини бошқариш муҳим вазифалардан бири бўлиб ҳисобланади.

Бугунги кунда жаҳонда ионли имплантация, радиациали нурлар, эпитаксияли ўстириш ҳамда кимёвий усуллар ёрдамида турли қотишма ва гетероструктураларда магнит хусусиятли нанокластерларни ҳосил қилишга катта аҳамият берилмоқда. Бу борада, мақсадли илмий тадқиқотларни жумладан, қуйидаги йўналишлардаги илмий изланишларни амалга ошириш муҳим вазифалардан ҳисобланади: кремний панжарасида, паст ҳароратли босқичма-босқич диффузияли легирлаш ёрдамида марганец атомларининг магнит хусусиятли нанокластерларини шакллантириш, магнит наноструктурали материалларини олиш усулини ишлаб чиқиш; нанокластерлар структурасини, ўлчамини ва магнит моментини ҳамда нанокластерларга эга кремнийнинг магнит сингдирувчанлигини ва магнитланишини аниқлаш; кремнийнинг магнит хоссаларини ундаги магнит хусусиятли нанокластерларининг концентрациясига ва электрофизик параметрларига боғлиқ равишда ҳароратнинг кенг соҳасида турли ташқи таъсирлар ёрдамида бошқариш; ҳароратнинг паст соҳасида кремнийни ферромагнит ҳолатга ўтишини аниқлаш.

Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантиришнинг Ҳаракатлар стратегиясида белгиланган вазифаларни амалга оширишда, илмий ва инновация ютуқларини амалиётга жорий этишнинг самарали механизмларини яратиш масалаларига алоҳида эътибор қаратилмоқда. Фаол тадбиркорлик, инновацион ғоялар ва технологияларни қўллаб-қувватлаш йили олинган илмий натижаларни ҳозирги замон талабларига жавоб берадиган даражага олиб чиқиш алоҳида эътиборга сазовор. Бу борада яримўтказгичли материалларни сиртида наноструктураларни ҳосил қилишнинг янги усулларини яратиш ва тадқиқ қилиш асосида янги турдаги яримўтказгичли асбоблар, ёруғлик, босим, намлик ва ҳарорат датчиклари, юқори кучланишли ва частотали диодлар ишлаб чиқиш масалаларига алоҳида эътибор қаратилган, кремнийда эрувчанлиги катта бўлган нодир ер элементлари (гадолиний, европий, голмий, саммарий) билан легирлашнинг оптимал усуллари аниқланган. Бу борада материалнинг бутун ҳажми бўйича

электрофизик параметрлари бошқариладиган магнит хусусиятли нанокластерларни шакиллантириш ва улар ҳисобига материалнинг магнит хоссаларини бошқариш муҳим аҳамиятга эга.

Ушбу диссертация тадқиқоти маълум даражада Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли “Ўзбекистон Республикасини янада ривожланиши бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”ги Фармони, 2017 йил 13 февралдаги ПҚ-№2772-сонли “2017-2021 йилларда электроника саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида”ги ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-№2789-сонли “Фанлар академиясининг фаолиятини, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга хизмат қилади.

**Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги.** Диссертация иши Ўзбекистон Республикаси фан ва технологияларни устувор ривожлантиришни: III. «Энергетика, энергия ресурс тежамкорлиги, транспорт, машина ва асбобсозлик» йўналишига мос ҳолда бажарилиб, замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника, спинтроника ва электрон асбобсозликни ривожланишида муҳим аҳамиятга эга.

**Диссертация мавзуси бўйича ҳорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи<sup>1</sup>.** Материалларнинг магнит хоссаларини тадқиқ қилиш соҳасидаги илмий тадқиқотлар жаҳоннинг етакчи илмий марказлари ва олий таълим муассасаларида, жумладан: Токио университети (Япония), Флорида давлат университети (АҚШ), Небраска – Линколн университети (АҚШ), Юонси университети (Ж.Кореа), Квантфункционали тадқиқот маркази (Ж.Кореа), Кюпнок миллий университети (Ж.Кореа), Лил фан ва технология университети (Франция), Лондон нанотехнология маркази (Англия), Мурсия университети (Испания), Хитой технология университети (Хитой Халқ Республикаси), Москва давлат университети (Россия), Физика - техника институти (Санкт-Петербург, Россия), Воронеж давлат университети (Россия), Физика - техника институти (Украина), Ўзбекистон миллий университети (Ўзбекистон), Самарқанд давлат университети (Ўзбекистон) да олиб борилмоқда.

Квантфункционали тадқиқот марказида (Ж.Кореа) ҳароратнинг паст соҳасида яримўтказгичли материалларни ферромагнит ҳолатига ўтишини тадқиқ қилинган, Dalhousie университети (Канада) Al-Pd-Mn-V кристаллининг магнит хоссаларини тадқиқ қилиш натижасида бу материалда магнит қаршилиқ кузатилган, Калифорния технология институти (АҚШ) ҳамда Микроэлектрон технология марказида (Калифорния, АҚШ)

---

<sup>1</sup>MnZnFe nanoparticles for self-controlled magnetic hyperthermia //J. Magn. Mater. 2012. Vol. 324. P. 3620-3628., Negative magnetoresistance produced by hall fluctuations in a ferromagnetic domain structure // Applied. Physics. Letters. – 2001.–V.79.– N.7.– P. 979- 981., Alexandr D., Michel D., et al. Classical origin for a negative magnetoresistance and for its anomalous behavior at low magnetic fields in two dimensions // Revista Mexicana De Física 2006. S 52 №3. C.185–189.

$\text{La}_{0,7}\text{Ca}_{0,3}\text{MnO}_3$  юққа қатламини магнит хусусиятга эга эканлигини, Монтпеллер университети (Франция) AlAs-GaAs бирикмасини кремнийга қўшиш натижасида манфий магнит қаршиликни ҳосил бўлиши тадқиқ қилган. Париж-суд университети (Франция) ва Қаттиқ жисим физикаси илмий тадқиқот институтида (Германия) темир ва хром элементларидан ташкил топган қатламда юқори магнит қаршиликни ҳосил қилиб, қаттиқ дискларда маълумотларни ёзиш ва сақлаш имкониятлари очиб берилган.

Ҳозирги вақтда жаҳонда магнит хусусиятли яримўтказгич материалларини ҳосил қилиш ва уларнинг магнит хусусиятларини тадқиқ қилиш бўйича бир қатор устивор йўналишларда тадқиқотлар олиб борилмоқда жумладан: Спинтроника йўналишини ривож учун магнит структурали материалларни яратиш; паст ҳароратларда кузатилаётган ўта катта магнит қаршиликларни хона ҳароратига олиб чиқиш; магнит қаршиликли сенсорларни яратиш ва уларнинг сезгирлигини ошириш; кремний асосида сезгирлиги юқори бўлган магнит датчиклар ва магнит сезгир яримўтказгич асбобларни яратиш ҳамда уларнинг ишлаш вақтини ва ҳароратга барқарорлигини ошириш.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Кейинги вақтларда яримўтказгичларда кришма атомларини магнит нанокластерларини шакллантириш ва ҳамда уларни хоссаларидан фойдаланиш ҳам етарли даражада ўрганилмоқда. G.W. Ludwig, Н.Н. Woodbury муаллифларни ишларида, J.Kreissl, W.Gehlhoff муаллифларни ишларида, шунингдек Ўзбекистон олимларидан К.П. Абдурахманов, С. Зайнабидинов, Т.С. Камиллов, Ш.Б. Утамурадоваларнинг ишларида марганец билан легирланган кремнийни диффузиядан кейин секин совутишда, марганецни 4 та атомидан иборат нанокластерлари ҳосил бўлиши аниқланган. Аммо, совутиш тезлигини бошқариш асосида электрофизик параметрлари такрорланадиган намуналарини олиш имконини берадиган технология яратилмади, ҳамда амалда киришма нанокластерларини таркиби, структурасининг ўлчами, магнит моменти, наноструктурага эга бўлган кремнийни магнит ва электрофизик хусусиятлари ўрганилмаган.

Т.И.Воронина, Т.С.Лагунова, М.П.Михайлова, К.Д. Моисеева, А.Ф. Липаева, Ю.П. Яковлеваларнинг ишларида GaInAsSb/InAs:Mn, гетероструктураларнинг хоссаларини тадқиқ қилишга мўлжаллаб, ўстирилган юқори концентрацияли ( $n > 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) Mn атомлари билан легирланганда структураларда аномал Холл эффекти ва манфий магнит қаршилик мавжудлиги аниқланган ва у Mn ионларининг InAs гетероўтиш чегарасидаги юқори ҳаракатчан электронларни каналдаги ўзаро алмашуви сабабли ҳосил бўлиши исботлаб берилган.

В.Э. Каминскийнинг ишида квантланувчи магнит майдонидаги матрицани зичлиги учун кинетик тенглама ечилган. Бу тенгламани ечишда олинган натижа шуни кўрсатадики, кўндаланг манфий магнит қаршилиги кузатилиши, тасодифий потенциалсиз электрон газида кузатилиши мумкин. Бу эса магнит квантлашни кетма-кет олишни ҳисобини натижаси ҳисобланади.

А.Д. Таланцев, О.В. Коплак, Р.Б. Моргунов муаллифларнинг ишларида MnSb кластерларида GaMnSb юпқа қатламидаги ковакларни концентрацияси таъсири натижасида ферромагнитизм кузатилган. Ковакларни юқори концентрацияси Шоттки тўсиғи орқали кластер-кристалл панжара чегарасида туннелланишига ва бу кластерларни магнитланишини ўзгаришига олиб келади. Юпқа қатламларни магнит қаршилиги, ташқи магнит майдонида кластерларни магнитланганлиги ҳисобига бошқариладиган ковакларни спин қутбланишига боғлиқлиги кўрсатилган.

**Диссертация мавзусини диссертация иши бажарилган олий таълим муассасаси илмий-тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги.** Диссертация иши Тошкент давлат техника университетини “Рақамли электроника ва микроэлектроника” кафедрасида бажарилган: Ф2-47 рақамли «Магнит кластерли кремнийнинг ферромагнит ҳолатлари шаклланишининг физикавий асосларини тадқиқ қилиш» (2012-2016 йй.), Ф2-44 рақамли «Ярим ўтказгичларда киришма атомларининг ўз-ўзини ташкиллаштириш механизмини ва уларнинг параметрларини бошқаришни тадқиқ қилиш» (2012-2016 йй.) шунингдек, ҳозирги вақтдаги ОТ-Ф2-55 «Янги функционал имкониятларга эга наноматериалларнинг янги синфи сифатидаги киришма атомлари нанокластерларини шаклланиши негизда хажмий структуралашган кремнийни олишнинг илмий асосларини ишлаб чиқиш» (2017-2020 йй.) мавзудаги фундаментал лойиҳалар доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** кремнийнинг магнит хоссаларини марганец киришмалари атомларининг магнит хусусиятли нанокластерлари концентрацияси ва электрофизик параметрларига боғлиқ равишда ҳароратнинг кенг соҳасида турли ташқи таъсирлар ёрдамида бошқаришдан иборат.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

паст ҳароратли босқичма-босқич диффузияли легирлаш усули ёрдамида кремний панжарасида марганец атомларининг магнит нанокластерларини шакллантириш ҳисобига, магнит наноструктурали материалларни олиш технологиясини ишлаб чиқиш;

ҳарорат, электр ва магнит майдонларнинг кенг оралиғида магнит нанокластерли кремнийнинг магнит қаршилигини бошқариш имкониятларини тадқиқ қилиш;

магнит нанокластерли кремнийнинг таркибидаги нанокластерларнинг концентрациясига боғлиқ равишда, магнит қаршилигини ўзгариш қонуниятини аниқлаш;

магнит нанокластерли кремнийнинг фотомагнит хусусиятини, фон (оқ) ҳамда инфрақизил спектр соҳасидаги нурлар билан ёритилганида тадқиқ қилиш;

Турли ташқи таъсирларнинг (ҳарорат, электр майдони, ёритилганлик) бир вақтдаги таъсирида манфий магнит қаршилиқни тадқиқ этиш;

магнит кластерларни шакллантириш йўли билан ферромагнит кремнийни олиш имкониятини кўрсатиш ва илмий асослаш;

тажриба натижалари асосида марганец атомларини

нанокластерларининг магнит моментини, ҳамда магнит нанокластерли кремнийнинг магнит сингдирувчанлиги ва магнитланганлигини аниқлаш.

**Тадқиқотнинг объекти** сифатида электроника саноатида фойдаланиладиган КДБ- 2; 3; 5; 10; 100 маркали кремний монокристалли танлаб олинди. Киришма сифатида парамагнит атом бўлиб ҳисобланган марганец танланиб, у  $S=5/2$  спинли  $3d^5 4s^2$  электрон структуралардан иборат.

**Тадқиқотнинг предмети** кремнийда магнит хусусиятларига эга бўлган марганец киришмалари диффузияси жараёнлари ва кенг ҳарорат соҳасида ташқи таъсирлар натижасида кремнийни бир ҳолатдан иккинчи ҳолатга ўтишнинг физик-технологик шартларидан иборат.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Кремний панжарасидаги марганец атомларининг ҳолатини замонавий электрон парамагнит резонанс ва атом кучлари микроскопи ҳамда рентген структурали таҳлил замонавий усуллардан фойдаланиб амалга оширилган.

Намуналарни фотоманит хоссалари ИКС-21 (Инфрақизил спектр) ва электромагнит асосида яратилган махсус қурилма ёрдамида тадқиқ қилинди. Бу қурилма электр ва магнит майдонини, ҳароратни, шунингдек инфрақизил нурланишнинг тўлқин узунлиги ва қувватини кенг оралиқда ўзгартириш имконини беради.

Намуналарни паст ҳарорат соҳасидаги ферромагнит ҳолати СКВИД (ўта ўтказувчи квантли интерференцияли датчик - сверхпроводящий квантовый интерференционный датчик) -магнитометр қурилмаси ёрдамида тадқиқ қилинган. (Жанубий Кореянинг Сеул шаҳридаги Донгук университетининг яримўтказгичларни квантофункционал тадқиқот марказида, ижодий ҳамкорликда)

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

кремний панжарасида ҳажм бўйича тенг тақсимланган ва параметрлари бошқариладиган марганец атомларининг магнит хусусиятли нанокластерларини шакллантириш имкониятини берадиган паст ҳароратли босқичма-босқич амалга ошириладиган диффузия технологиясининг режимлари оптималлаштирилган;

марганец атомлари нанокластерларининг ҳароратга барқарорлиги ҳисобига, марганец атомлари билан легирланган кремнийнинг электрофизик параметрларини юқори ҳароратларда турғунлигини ошириш усули ишлаб чиқилган;

кремнийдаги марганец атомларининг магнит хусусиятга эга бўлган нанокластерлари концентрациясини  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  гача ошириш ҳисобига хона ҳароратида ўта юқори қийматдаги манфий магнит қаршилиги кузатилиши аниқланган;

марганец атомларининг магнит хусусиятли нанокластерларига эга бўлган кремнийда, магнит майдон индукцияси ортиши билан, манфий магнит қаршилигининг қиймати чизикли ортиши аниқланган;

бир вақтнинг ўзида кучли магнит моментга ва зарядга эга бўлган нанокластерларнинг зарядларини интеграл (оқ) ва инфрақизил ёруғлик

таъсирида камайиши ҳисобига манфий магнит қаршилиқнинг қийматини 100 мартагача сўниш эффекти топилган;

кремнийда магнит моментига эга бўлган марганец атомлари нанокластерларининг спинларини, ҳароратнинг 30 К дан паст соҳасида, тартибли йўналиш ўрнатилиши ҳисобига, кремнийни ферромагнит ҳолатга ўтиши аниқланган;

нанокластерли кремнийнинг 10 К ҳароратдаги, тажриба асосида аниқланган магнитланганлик ( $\chi_{Mn}$ ) қиймати ёрдамида марганец атомлари нанокластерларининг магнит моменти ҳисобланган;

энергия (кТ) ортиши билан нанокластерларнинг спинларини тартибланган йўналишининг бузилиши ҳисобига, кремнийнинг магнитланганлигини ҳарорат ошиши билан чизикли камайиши аниқланган;

электр майдон кучланганлигини 0,1 - 600 В/см ва магнит майдон индукцияси 0,2-2 Тл оралиғида, ҳамда 240 К ҳароратда, нанокластерли кремнийнинг магнит қаршилигини 6 мартабагача ошириш имконияти кўрсатилган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

кристаллни бутун ҳажми бўйича марганец атомларининг наноструктурасига эга бўлган кремнийни олиш технологияси ишлаб чиқилган;

кремний таркибидаги нанокластерларининг концентрациясини кўпайтириш ҳисобига, манфий магнит қаршилиқнинг қийматини ошириш усули ишлаб чиқилган. Бу ўз навбатида, магнит хусусиятли нанокластерларга эга бўлган кремний асосида сезгирлиги юқори бўлган магнит датчикларни ишлаб чиқаришга имкон яратади;

марганец атомлари нанокластерларининг ҳароратга барқарорлиги ҳисобига, марганец атомлари билан легирланган кремнийнинг электрофизик параметрларини юқори ҳароратларга турғунлигини ошириш усули ишлаб чиқилган. Бу ўз навбатида кремнийда юқори ҳароратларга барқарор наноструктураларни олиш, ҳамда юқори ҳароратларга ва кучланишларга барқарор юқори частотали диодларни ишлаб чиқариш имконини берган;

юқори ҳароратли манфий магнит қаршилиқ қийматини ташқи таъсирлар ёрдамида (ҳарорат, ёритилганлик, электр майдон) бошқариш мумкинлиги аниқланган ва олинган натижалар асосида физик катталикларни ўлчовчи функционал датчикларни яратиш имкони борлиги кўрсатилган.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** кремнийдаги марганец атомлари нанокластерларнинг тузилишларини аниқлашда интеграл сезгирлиги  $\sim 5 \cdot 10^{10}$  спин/Гс ва уларни ўрнатиш аниқлиги 0,001% ни ташкил қиладиган электрон парамагнитик резанатор, замонавий атом кучли микроскопии, рентген структурали таҳлил усуллари ҳамда олинган материалларнинг электрофизик хусусиятларини аниқлашда Холл усули ва кремнийнинг ферромагнит ҳолатини аниқлашда СКВИД магнитометр қурилмасини қўлланилганликлари билан изоҳланади.

### **Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.**

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти монокристалл кремний панжарасида марганец атомларининг магнит нанокластерларини шаклланишининг физик механизларини тушунтириш, юқори ҳароратларда бундай материалларда аномал юқори манфий магнит қаршиликни кузатилишининг физикасини асослаб бериш ва уни қийматини ташқи таъсирлар ёрдамида бошқариш қонуниятларини ҳамда янги фотоманит материал сифатида магнит нанокластерли кремний хоссаларини бошқариш имконини яратади.

Ишнинг амалий аҳамияти шундан иборатки, марганец атоми нанокластерларига эга бўлган кремний асосида юқори сезгирликка эга бўлган магнит ва фотоманит асбоблар, физик катталикларни ўлчаш имконини берадиган кўп функцияли датчикларни ишлаб чиқиш мумкинлиги, шунингдек ферромагнитли кремнийни олиш имконини беради.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши:** Кремнийнинг магнит хоссаларини унда шакллантирилган марганец атомларининг магнит хусусиятли нанокластерларнинг концентрациясига ва электрофизик параметрларига боғлиқ равишда ҳароратнинг кенг соҳасида турли ташқи таъсирларнинг ёрдамида бошқаришни тадқиқ қилиш натижалари асосида:

кремнийни паст “ҳароратли ва босқичма-босқич” легирлаш технологияси «FOTON» акциядорлик жамияти томонидан наноструктурали ферромагнит хусусиятига эга бўлган кремний кристалларини олишда фойдаланилган («Ўзэлтехсаноат» акциядорлик компаниясининг 2017 йил 6 октябрдаги 02/2074-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш юқори частотали диодларнинг ташқи таъсирга чидамлилигини ошириш имконини берган;

нанокластерларнинг зарядларини интеграл (оқ) ва инфрақизил ёруғлик таъсирида бошқариш натижалари Туркменистон Фанлар академияси Куёш энергияси институтида бажарилган «Наноўзгарувчан зонали кенг спектрал сезгирликка эга (0.1-3 мкм) янги фотоэлементларни тайёрлаш ва ишлаб чиқиш» (2012–2015) мавзудаги лойиҳасида зоналари ўзгариб борувчи наноструктурали гетероўтишларда инфрақизил соҳадаги сезгирлигини бошқаришда қўлланилган (Туркменистон Фанлар академияси Куёш энергияси институтининг 2017 йил 9 ноябрдаги 162/17-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш металл-яримўтказгич структурали спектрометрик элементларнинг спектрал сезгирлигини узун тўлқин томонига кенгайтириш имконини берган;

киришмани диффузияда фаоллашиш энергияси кичик бўлган паст ҳароратли кўп босқичли диффузия ўтказиш тартиби ПФИ ФЗ-ФА-0-56434 рақамли «Куёш элементлари ва яримўтказгич асбоблар учун юпқа қатламли ва нанокатламли структураларни шакллантиришнинг физикавий қонуниятлари» (2012–2016) мавзусидаги лойиҳани бажаришда карбид кремний кристаллининг фаол соҳасида бор ва алюминий киришма атомлари диффузиясини амалга оширишда қўлланилган (Фан ва технологиялар агентлигининг 2017 йил 24 октябрдаги ФТА-02-11/940-сон маълумотномаси).

Илмий натижалардан фойдаланиш юпқа қатламли тажрибавий намуналар олиш имконини берган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Ишни асосий натижалари 8 халқаро ва 10 та республика илмий-амалий анжуманларда маруза қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.** Диссертация материаллари бўйича 33 та илмий иш нашр қилинган, улардан 2 таси монография, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий нашрларини чоп этишга тавсия этилган илмий нашрларда 13 та мақола нашр этилган.

**Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши.** Диссертация кириш, 6 та боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг ҳажми 200 бетни ташкил қилади.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

**Кириш** қисмида диссертация мавзусини долзарблиги ва замонавий илмий тадқиқотлар талабига мослиги асосланган, фан ва технологияни асосий устувор ривожланиш йўналишлари билан тадқиқотнинг боғлиқлиги аниқланган, халқаро илмий тадқиқотларни диссертация мавзуси бўйича таҳлили ва муаммони ўрганилиш ҳолати келтирилган. Муаммо ҳолатини таҳлили ва мавзуни долзарблиги асосланган, танланган йўналишнинг илмий янгилиги, ишнинг мақсади ва муаммонинг ечимини ҳал қилишдаги асосий вазифалар ҳамда амалга ошириладиган тадқиқотларни илмий ва амалий аҳамияти ёритилган.

Диссертациянинг **“Яримўтказгичли материалларнинг магнит хоссалари”** деб номланган биринчи бобида соҳа бўйича илмий адабиётлар таҳлил қилинган. Турли яримўтказгичларда манфий магнит қаршилик (МаМК) ва мусбат магнит қаршилик (МуМК) ни ўрганиш бўйича тадқиқотларнинг энг сўнги маълумотлари ва уларни аҳамияти, шунингдек физик механизмлари ҳамда ферромагнит материалларни олиш технологиялари баён қилинган.

Диссертациянинг **“Магнит нанокластерларга эга бўлган кремний намуналарини тайёрлаш технологиясини ишлаб чиқиш ва уларни электрофизик хусусиятларини ўлчаш”** деб номланган иккинчи бобида паст ҳароратли босқичма-босқич диффузияли легирлаш ёрдамида кремний панжарасида киришма марганец атомларининг нанокластерларини шаклланиши ҳисобига магнит наноструктурали материални олишнинг қулай усули, шунингдек тажрибани ўтказиш усуллари ҳақида маълумотлар келтирилган.

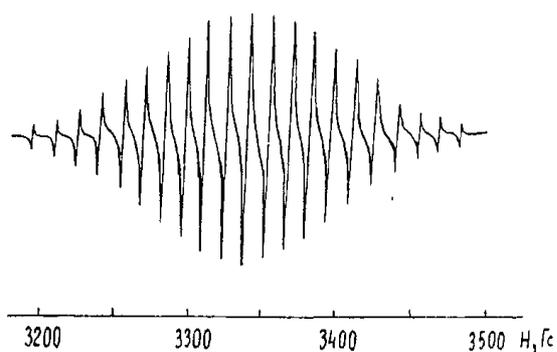
Танланган легирлаш усули, босқичма-босқич ҳароратни маълум бир тезликда ошириш орқали диффузияни ўтказишга асосланган. Бу усул нанокластерларни шакллантириш жараёнида марганец киришма атомларининг максимал иштирокини таъминлашга имкон беришидан ташқари, кремний материалнинг бутун ҳажми бўйича магнит хусусиятли нанокластерларнинг тенг тақсимланиш имкониятлари кўрсатилган. Диффузия жараёнида киришма атомларининг фаоллашиш энергиясининг тажрибада аниқланган қиймати ва унга мос равишда диффузияни ҳароратга боғлиқлиги  $D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$ , юқори ҳароратли диффузия асосида киришмаларни кремнийдаги эрувчанлик формуласидан паст ҳароратли диффузия шароитда фойдаланиш мумкин эмаслиги тўлиқ асослаб берилди. Паст ҳароратли диффузия жараёни юқори ҳароратли диффузиядан анча тез содир бўлади ва тугунлараро киришма атомларининг диффузияси ҳақидаги фарзани тўлиқ тасдиқлайди.

Янги технология билан кремний панжарасига киритилган марганец атомларининг ҳолати замонавий электрон парамагнитли резонанс (ЭПР), атом кучли микроскоп (АКМ) ҳамда рентген структурали таҳлил усулларда тадқиқ қилинган.

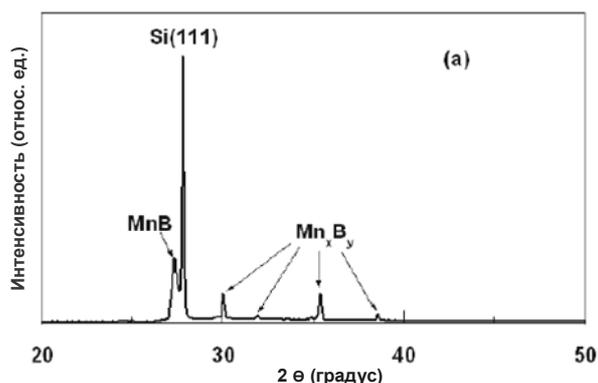
Кремний панжарасидаги марганец атомлари ҳолатининг табиати ЭПР спектри ёрдамида «Брокер» курилмасида 77 К ҳароратда тадқиқ қилинди. Унда ЭПР спектрларини қайт қилиш учун тўлқин узунлигини 3-х сантиметрли диапазонда ишлайдиган спектрометрдан фойдаланилди. Асбобни интеграл сезгирлиги  $\sim 5 \cdot 10^{10}$  спин/Гс бўлиб, ўлчашни ўрнатиш аниқлиги 0,001% ни ташкил қилди. Кузатилаётган спектрдаги g-факторни аниқлаш  $g=2,0024$  маркер чизиғи бўйича амалга оширилди.

Тадқиқот натижалари шуни кўрсатдики, Ферми сатҳи  $F=E_V+(0,38 \div 0,45)$  эВ ораликдаги янги технология бўйича олингани  $p\text{-Si} \langle \text{B}, \text{Mn} \rangle$  намуналарда 21 та чизиғидан иборат бўлган ўта юпқа ЭПР спектри аниқ кузатилди (1а-расм). Бу нанокластерларнинг таркиби тўртта марганец атомидан ташкил топганини тасдиқлайди. Ферми сатҳи  $F=E_V+(0,38 \div 0,45)$  дан тақиқланган соҳани ўртасигача  $F=E_V+(0,52 \div 0,55)$  эВ силжиганда,  $\text{Mn}^{++}$  ҳолатидаги атомлар концентрациясини камайиши ва мос ҳолда  $\text{Mn}^+$  ҳолатидаги атомлар концентрациясини ошиши ҳисобига ЭПР спектрининг интенсивлигини сусайиши кузатилди.

Жанубий Кореанинг Сеул шаҳридаги Донггук университетининг яримўтказгичларни Квантофункционал тадқиқот маркази жамоаси билан ҳамкорликда олиб борилган изланишлар учун магнит нанокластерига эга бўлган кремний намуналари тайёрланди. Рентген дифрактометрида Mn билан легирланган Si намуналарининг структурасини таҳлили амалга оширилди. 1б-расмда Si (111) да марганец атомларининг нанокластерлари бўлган намуналарида кузатилган дифракцион чўкқилари келтирилган, бу  $(\text{Mn}_4\text{B})$  марганец-бор комплексини ҳосил бўлишини кўрсатади.



1а- расм. Кремнийда 4 та марганец атомидан иборат бўлган нанокластерни ЭПР спектри



1б -расм. Магнит кластерларини рентгенографик тасвири

Диффузия жараёнида аниқ термодинамик шароитларни билиш, кремний панжарасида кластерларни ҳосил бўлишининг энг кичик потенциал энергиясини аниқлаш имконини берди. Марганец атомларининг ўзаро кулон таъсирлашиши ҳамда марганец атомлари билан бор атомларининг ўзаро таъсирини ҳисобга олиб амалга оширилган назарий ҳисоблашлар асосида

нанокластерларнинг ўлчами аниқланди. Бу 0,7 дан 1,4 нм гача қийматни ташкил этар экан.

Шундай қилиб, паст ҳароратли диффузия жараёнида нафақат сирти эрозияга учрамаган ва сирт ости соҳасида силицидлар ҳосил бўлмаган кремний намуналарини олиш, ҳамда кремний намуналарида белгиланган чуқурликда ва концентрацияда марганец киришма атомларини бир текис тақсимлаб легирлаш мумкинлиги кўрсатиб берилди.

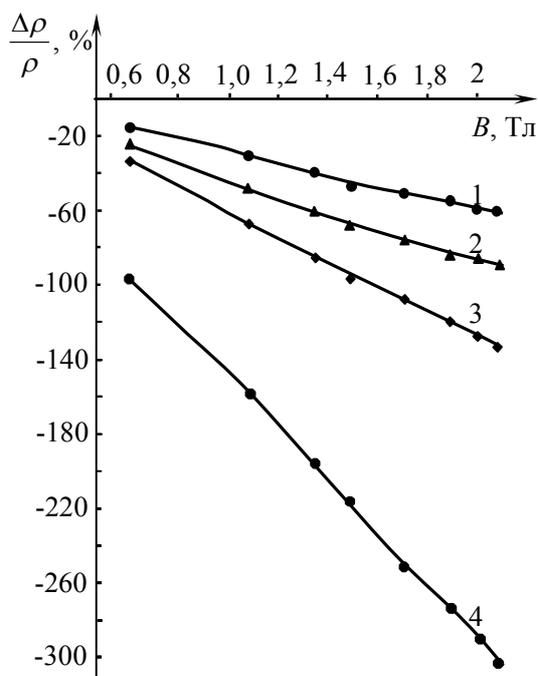
Диссертациянинг **“Марганец атомларининг магнит нанокластери бўлган ва нанокластерлар ҳосил бўлмаган марганец атомлари билан легирланган кремнийнинг магнит қаршили”** деб номланган учинчи бобида, марганец атомларининг магнит нанокластерларига эга *p*-турдаги кремнийни ва ошириб компенсацияланган *n*-турдаги намуналарни ҳамда нанокластерсиз намуналарнинг магнит қаршилигини тадқиқ қилишдаги аниқланган янги илмий натижалар келтирилган. Кремнийнинг магнит хоссасини магнит майдонининг қийматиға боғлиқлиги, МаМҚ ни пайдо бўлишида магнит нанокластерларини ҳиссаси, ҳамда МаМҚ эффекти кузатилишининг ҳарорат чегараларини аниқлашдаги натижалар берилди.

МаМҚ ҳосил бўлишида магнит нанокластерларнинг ҳиссасини билиш учун турли концентрацияда нанокластерлари бўлган бир хил солиштирма қаршиликли намуналар тайёрланди. Тажриба натижалари шуни кўрсатдики, магнит нанокластерларининг концентрацияси ортиши билан МаМҚ ни қиймати сезиларли ошди (2а- расм).  $N=10^{15}$  см<sup>-3</sup> нанокластерлар концентрациясига эга бўлган намуналарда хона ҳароратида ва электр майдон кучланганлиги  $E=100$  В/см бўлганда қиймати жуда катта  $\Delta\rho/\rho\sim 300$  % бўлган МаМҚ кузатилди ва бунда магнит майдонининг сезгирлиги  $\alpha=150$  %/Тл ни ташкил қилди.

Олинган натижалар кремний намуналарида МаМҚ ни пайдо бўлиши ва уни табиатини бевосита панжарадаги марганец атомлари нанокластерини мавжудлиги билан боғлиқ эканлиги, ҳамда нанокластерларни концентрациясини ўзгартириш йўли билан МаМҚ қийматини кенг ораликда бошқариш имкониятлари мавжудлигини тасдиқлади. Нанокластерларнинг концентрациясини  $2\cdot 10^{13}\div 10^{15}$  см<sup>-3</sup> ораликда ошириш билан, бир хил тажриба шароитида МаМҚ ни қиймати 8÷10 марта ошиши аниқланди ва бунда намуналарнинг магнит майдонига сезгирлигини  $\alpha=28$  %/Тл дан  $\alpha=150$  %/Тл гача ошириш мумкинлиги кўрсатиб берилди. Замонавий усуллар асосида такомиллаштирилган диффузион технологиядан фойдаланилиб олинган намуналарда нанокластернинг концентрациясини  $N=10^{17}$  см<sup>-3</sup> гача етказиш мумкинлиги аниқланди. Бунда намуналардаги МаМҚ нинг қийматини 1,5 даражагача катта бўлишини кушиш мумкин.

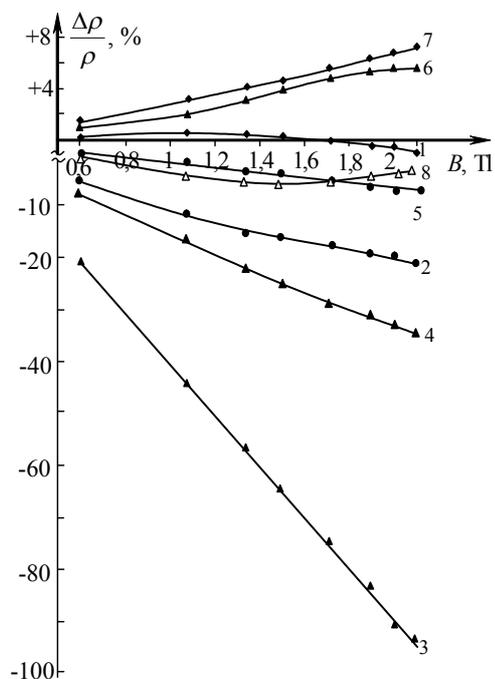
2.б - расмда Ферми сатҳининг ҳолати  $F=E_V+0,29\div E_V+0,48$  эВ ораликда бўлган *p*-Si<В,Мn> нанокластерли намуналарнинг ҳамда ошириб компенсацияланган Ферми сатҳи  $F=E_C-(0,35\div 0,54)$  эВ ораликда бўлган *n*-Si<В,Мn> намуналарни магнит қаршилигига магнит майдон қийматининг таъсири натижалари тасвирланган. *p*-турдаги Ферми сатҳи  $F\leq E_V+0,28$  эВ

бўлган намуналарда унча катта бўлмаган МуМҚ кузатилди ва унинг қийматини ўзгариши магнит майдонига кучсиз боғланганлиги аниқланди. Ферми сатҳи  $F \geq E_V + 0,29$  эВ га силжиганда магнит майдонини кичик қийматларда, қиймати унча катта бўлмаган МуМҚ кузатилди ва унинг қиймати магнит майдонини ошиши билан камайди. Магнит майдон индукцияси  $B \geq 1,8 \div 1,9$  Тл бўлганда бу намуналарнинг магнит қаршилигини ишораси ўзгарди, яъни МуМҚ дан МаМҚ га ўтди (2б –расм, 1-эгри чизик).



1- $N_{(Mn)4} = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , 2- $N_{(Mn)4} = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  
3-  $N_{(Mn)4} = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , 4- $N_{(Mn)4} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

**2а-расм. Турли концентрациядаги нанокластерларга эга бўлган намуналаридаги МаМҚ ни магнит майдонига боғлиқлиги.  $T=300$  К,  $E=100$  В/см**



$p$ -турдаги: 1- $F = E_V + 0,29$  эВ, 2- $F = E_V + 0,32$  эВ, 3- $F = E_V + 0,385$  эВ, 4- $F = E_V + 0,434$  эВ, 5-  $F = E_V + 0,48$  эВ.  
 $n$ -турдаги: 6- $F = E_C - 0,45$  эВ, 7- $F = E_C - 0,384$  эВ.,  
 $p$ -турдаги нанокластерсиз: 8-  $F = E_V + 0,385$  эВ

**2б-расм. Ферми сатҳини турли ҳолатларида  $p$ -Si<B,Mn> и  $n$ -Si<B,Mn> намуналаридаги МҚ ни магнит майдонига боғлиқлиги.  $E=100$  В/см,  $T=300$  К**

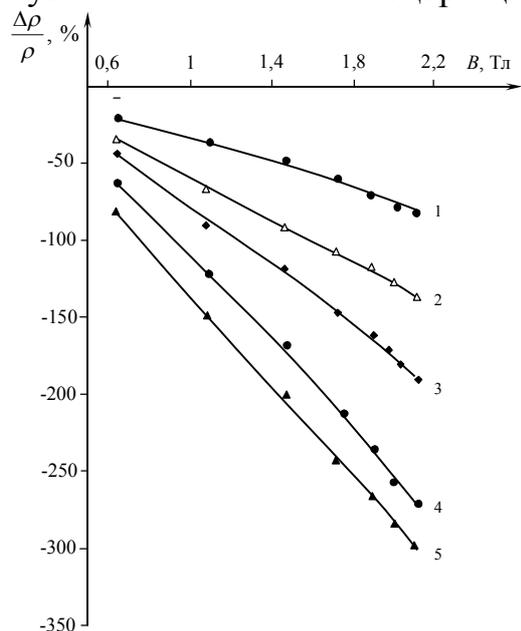
Кўп сонли тажрибалар шуни кўрсатдики, нанокластерли кремнийда Ферми сатҳининг чегаравий қиймати  $F \sim E_V + 0,29$  эВ бўлганда МаМҚ эффекти намоён бўлар экан. Марганец атомларининг магнит нанокластерларига эга бўлган кремний намуналарида Ферми сатҳи  $F \sim E_V + 0,29$  эВ дан тақиқланган соҳани ўртасига силжиши МаМҚ эффектини кучайишига олиб келар экан (2б- расмдаги 2, 3-эгри чизик). МаМҚ нинг қиймати магнит майдонинг қиймати ортиши билан ошади ва  $T=300$  К ҳароратда Ферми сатҳи қиймати  $F \sim E_V + 0,375 \div E_V + 0,385$  эВ бўлган намуналарда МаМҚ ни максимал қиймати кузатилди. Ошириб компенсацияланган намуналарда хона ҳароратида Ферми сатҳига боғлиқ бўлмаган ҳолда унча катта бўлмаган МуМҚ кузатилди (2б-расм 6, 7 эгри чизик). Ўрганилган намуналарда Ферми сатҳи ўтказувчанлик соҳасини тагидан тақиқланган соҳани ўртасига силжиганда МуМҚ қиймати

чизиқли ошиб борди ва ўзгариш 2,5 % дан 7 % гача бўлди. Ҳарорат пасайиши билан  $\mu_{Mn}$  қиймати секин камайди ва  $T \sim T_{nop}$  ( $T_{nop}$  -  $\mu_{Mn}$  ни пайдо бўлиш ҳарорати) бўлганда  $\mu_{Mn}$  ни ишораси  $\mu_{Mn}$  дан  $\mu_{Mn}$  га ўзгарди. Ферми сатҳи тақиқланган соҳанинг ўртасидан ўтказувчанлик соҳаси томон силжиши билан марганец атомлари икки қарра зарядланган ҳолатидан бир қарра зарядланган ҳолатига ўтиши кузатилади ва шунга мос равишда Ферми сатҳи  $F = E_C - 0,37$  эВ ҳолатида бўлган намуналарда  $T = 150$  К ҳароратда  $\mu_{Mn}$  нинг максимал қиймати 35% ташкил қилди. Ошириб компенсацияланган намуналарда  $\mu_{Mn}$  ни кузатилиши марганец атомларини  $S = 5/2$  спинга эга эканлиги ва уларни заряд ҳолати билан тушунтирилди.

$\mu_{Mn}$  ни максимал қиймати Ферми сатҳи  $F = E_V + (0,375 \div 0,385)$  эВ бўлган намуналарда кузатилиши аниқланди. Бундай намуналарда Ферми сатҳининг ҳолатини бошқариш орқали манфий магнит қаршилик қийматини ўзгариш қонуниятини аниқланди.

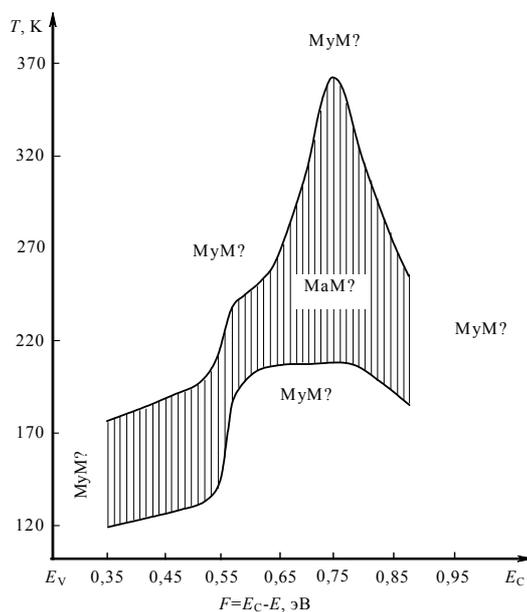
Ҳарорат пасайиши билан  $\mu_{Mn}$  ни қийматининг ортиши кузатилиб, магнит майдонни ортиши билан намуналарининг  $\mu_{Mn}$  гини  $\frac{\Delta\rho}{\rho}(B)$  чизиқли боғлиқлиги сақланар экан (3а -расм).

Компенсацияланган ва ошириб компенсацияланган намуналарда  $\mu_{Mn}$  ни тадқиқ қилишда олинган натижалар асосида, Ферми сатҳининг тақиқланган соҳада жойлашиш ҳолатига боғлиқ  $\mu_{Mn}$  ва  $\mu_{Mn}$  ни кузатилишини паст ва юқори ҳарорат чегаралари аниқланди (3б-расм).



1-  $T = 300$  К, 2-  $T = 283$  К, 3-  $T = 270$  К,  
4-  $T = 262$  К, 5-  $T = 235$  К.

**3а-расм.** Ферми сатҳи ҳолати  $F = E_V + 0,385$  эВ бўлган  $p$ -Si<B,Mn> намунадаги  $\mu_{Mn}$  ни турли ҳароратларда магнит майдонга боғлиқлиги.  $E = 100$  В/см



**3б-расм.**  $\mu_{Mn}$  мавжудлигининг ҳарорат соҳасини, марганец кризма атомлари билан легирланган кремнийдаги Ферми сатҳининг ҳолатига боғлиқлиги.  
 $B = 2$  Тл,  $E = 100$  В/см

3б- расмда марганец билан легирланган кремнийда етарли даражада кенг ҳарорат оралиғида катта МаМҚ кузатилар экан. Кремнийда Ферми сатҳининг ҳолатини бошқариб МаМҚ нинг қийматини етарли даражада катта ораликда ( $T=300$  К ҳароратда  $1\div 100$  %) ўзгартириш имкони мумкинлиги аниқланди. Ферми сатҳинг ҳолати  $F=E_V+0,29$  эВ дан  $F=E_C-0,32$  эВ гача чегараси оралиғида, ҳароратнинг  $T=120\div 370$  К соҳалари оралиғида МаМҚ кузатилди.

Диссертациянинг **“Марганец билан легирланган кремнийдаги манфий магнит қаршиликга ташқи физик катталикларнинг таъсири”** деб номланган тўртинчи бобида, МаМҚ ни электр майдонига боғлиқлиги ҳамда интеграл ва монохроматик ёритилганликнинг таъсирини тажрибада ўрганишдаги натижалар келтирилган. Бунда асосий вазифа, нанокластерли кремнийнинг магнит қаршилигини ташқи таъсирлар натижасида ўзгариш қонуниятини ҳамда МаМҚ ни максимал қийматини олишда электр майдонининг оптимал қийматини ва магнит қаршиликни ёруғликнинг интенсивлигига боғлиқ ўзгаришини аниқлашдан иборат.

Олинган тажриба маълумотларининг таҳлили шуни кўрсатадики, ёритилганлик МаМҚ ни камайишига ва сўнишига ҳамда МҚ нинг ишорасини ўзгаришига олиб келар экан. Бу натижалар МҚ ни ўрганишдаги янги физик ҳодиса ҳисобланади. МаМҚ ни қоронғиликдаги қиймати қанча катта бўлса, МҚ нинг ишорасини алмашишини қиймати ёритилганлик интенсивлигининг катта қийматига тўғри келди (4а-расм).

Тажрибада аниқланган маълумотлар бир томондан ўрганилинаётган материалларни магнит хоссалари марганец атомлари кластерларининг энергетик сатҳларини қайта зарядланиши сабаб бўлса, иккинчи томондан бошқа яримўтказгичли магнит материалларида кузатилмаган фотомангнит сезгирлиги мавжудлигини кўрсатди.

Пастроқ ҳароратларда намуналарнинг магнит қаршилиги хоссаларига ёруғлик интенсивлиги таъсирини тадқиқ қилинишида аниқланган натижалар ҳам қизиқиш уйғотади. 4б- расмда нанокластерга эга бўлган кремнийнинг турли даражадаги фон ёруғлиги остида МҚ ни ҳароратга боғлиқлиги кўрсатилган. Кўриниб турибдики, ёритилганлик бўлмаганда ҳарорат пасайиши билан МаМҚ ни қиймати сезиларли даражада тез ортади ва ҳарорат  $T=235\div 240$  К бўлганда ўзини максимал қийматига етди. Бунда МаМҚ ни қийматининг ўзгариши  $\Delta\rho/\rho=300$  % ни ташкил қилди. Бу

боғланишни 
$$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_T = \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_0 \left(\frac{T_0}{T}\right)^5$$
 қонуният кўринишда ( $240$  К  $< T < 330$  К,

$T_0=300$  К) ёзиш мумкин. Ҳароратни  $T=215\div 220$  К гача камайиши МаМҚ нинг қийматини камайишга олиб келди. Бу боғлиқликни қуйидаги

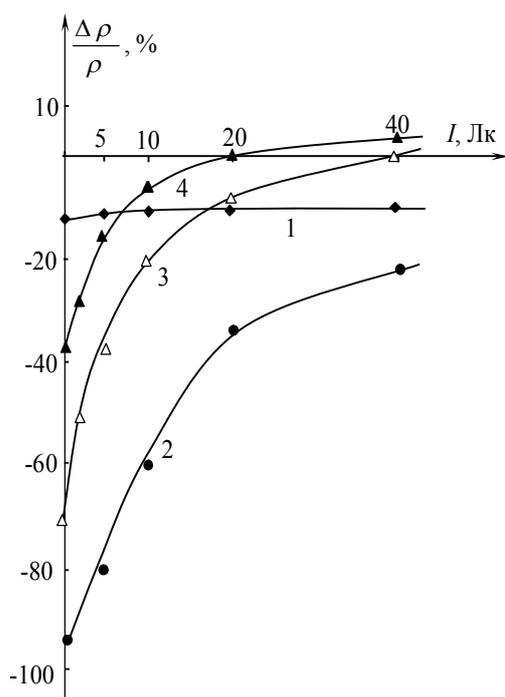
$$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_T = \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_1 \left(\frac{T_1}{T}\right)^{-5}$$
 ( $170$  К  $< T < 240$  К) кўринишда ифода қилиш мумкин.

Ҳарорат  $T\leq 170\div 175$  К бўлганда МҚ ни ишораси ўзгаради яъни, МаМҚ дан МуМҚ га ўтади.

Тадқиқотлар  $I=10$  Лк;  $40$  Лк;  $80$  Лк ва  $160$  Лк ёритилганликда ўтказилди (2, 3, 4, 5 эгри чизиқлар). Бунда қизикарли физик ҳодисалар кузатилади. Биринчидан, ёритилганлик МаМҚ нинг қийматини сезиларли камайишига олиб келди. Масалан  $T=240$  К бўлганда МаМҚ ни қиймати  $\frac{\Delta\rho}{\rho} \sim 300\%$  дан

нолгача камайди яъни, 
$$\frac{\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\text{тем}} - \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\text{освещ}}}{10 \text{ Лк}} = \frac{300\%}{10 \text{ Лк}} = 30 \frac{\%}{\text{Лк}}$$
. Иккинчидан,

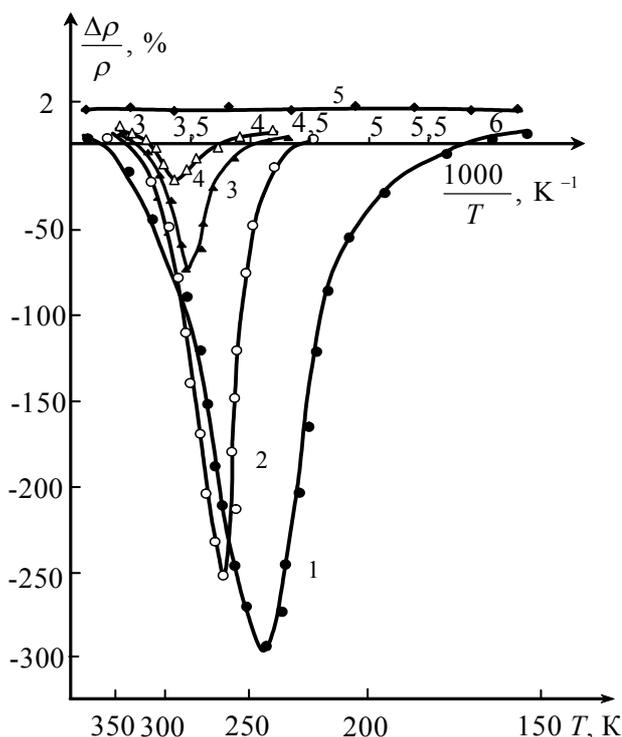
ёритилганда максимал МаМҚ нинг кузатилиши ҳарорат қийматининг юқори томонга силжиши (2, 3, 4 эгри чизиқлар).



1-  $F=E_V+0,3$  эВ, 2-  $F=E_V+0,38$  эВ,  
3-  $F=E_V+0,42$  эВ, 4-  $F=E_V+0,44$  эВ.

**4а-расм. Ферми сатҳи турли ҳолатларда бўлган  $p$ -турдаги Si<В,Мn> намуналардаги МҚ ни ёритилганлик интенсивлигига боғлиқлиги.**

$E=100$  В/см,  $T=300$  К



1- қоронғилатилгандаги;  
2-  $I=10$  Лк; 3-  $I=40$  Лк;  
4-  $I=80$  Лк; 5-  $I=160$  Лк.

**4б-расм. Ферми сатҳини  $F=E_V+0,38$  эВ бўлган Si<В,Мn> намунадаги МҚ ни ҳароратга боғлиқлиги.**

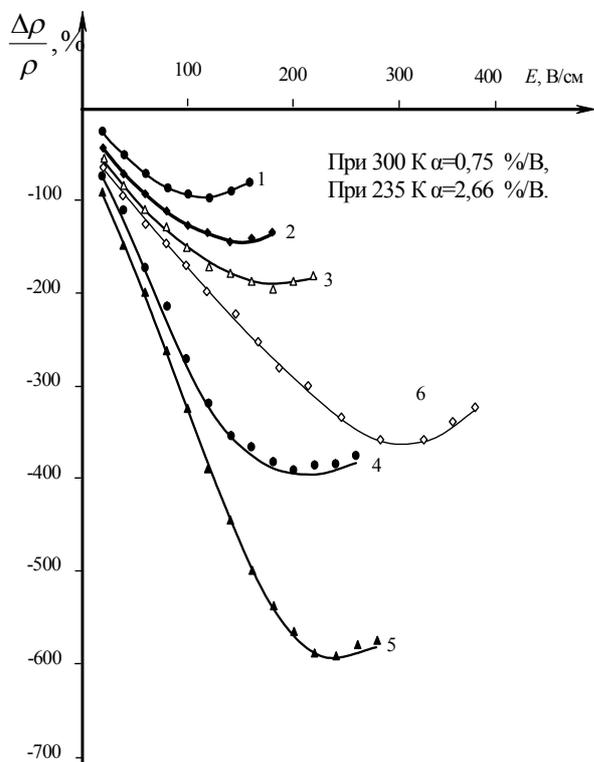
$E=100$  В/см,  $B=2$  Тл.

Учинчидан, ёритилганлик МаМҚ кузатиладиган ҳарорат соҳасини сезиларли даражада кичиклаштирди. Ёритилганлик интенсивлигининг янада ошиши билан МаМҚ ни кузатиладиган ҳарорат соҳаси янада торайиб  $I=160$  Лк да МаМҚ амалда йўқолди (4б-расмдаги 5- эгри чизиқ). Бунда шуни кўрсатиш мумкинки, ёритилганлик МҚ нинг ишорасини ўзгартириб фаза ўтишига олиб келар экан.

Олинган тадқиқотларнинг натижалари бир томондан МаМҚ ни ёруғлик томонидан сўндириш мумкинлигини кўрсатса бошқа томондан бундай

материалларни электроникада фойдаланишда функционал имкониятларини очиб беради.

5- расмда Ферми сатҳи  $F=E_V+0,385$  эВ бўлган намунанинг МаМҚ гини турли ҳароратларда электр майдонга боғлиқлигини ўрганиш натижалари келтирилган.



1- $T=300$  К, 2- $T=283$  К, 3- $T=270$  К,  
4- $T=262$  К, 5- $T=235$  К, 6- $T=220$  К

**Расм. 5. Ферми сатҳи  $F=E_V+0,385$  эВ бўлган  $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$  намунанинг магнит қаршилигини, турли ҳароратларда электр майдонга боғлиқлиги.  $B=2$  Тл.**

Натижалар шуни кўрсатадики, электр майдони ортиши билан барча ҳароратларда МаМҚ ни қийматлари чизикли ортади. Электр майдони янада ортиши билан МаМҚ нинг қийматини чизикли ортиши кучсизланади ва у ўзини максимал қийматига ( $E_m$ ) эришади. Электр майдон қийматини янада ортиши МаМҚ ни камайишига олиб келди. Расмдан кўриниб турибдики, ҳарорат пасайиши билан МаМҚ қийматининг чизикли ортиш соҳаси кенгайди ҳамда МаМҚ нинг максимал қиймати  $E_m$  электр майдонининг катта қийматлари томонига силжиди. Ҳарорат  $T=235$  К ва  $E_m=240$  В бўлганида МаМҚ максимал қийматга эга бўлди  $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \sim 600\%\right)$ .

Ҳароратни  $T<235$  К дан кичик қийматларида МаМҚ камайди, аммо электр майдонининг қийматини ортириш билан унинг камайишини бошқариб кўпайтириш мумкин бўлди.

Хона ҳарорати шароитида марганец атомларининг кластерлари мавжуд бўлган кремнийда МаМҚ ни сўниш ҳодисаси ҳамда ёруғлик интенсивлиги билан бошқариб МҚ нинг ишорасини ўзгариш мумкинлиги электроника ва асбобсозлик соҳасида магнит ва ёруғлик датчикларининг томомила янги синфини яратиш имкониятлари очиб берилди.

Диссертациянинг “Кремнийдаги манфий магнит қаршилиқни инфрақизил нурлар таъсирида сўниш эффекти” деб номланган бешинчи бобида, марганец атомларининг магнит нанокластерлари мавжуд  $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$  намуналарида МаМҚ нинг қийматига инфрақизил (ИҚ) нурнинг спектрал таъсири магнит ва электр майдон, ҳароратни кенг соҳадаги боғлиқликлари ҳамда ИҚ-нурланиш энергиясининг турли қийматларидаги таъсирини ўрганишдаги аниқланган натижалар келтирилган.

Марганец атомлари нанокластерларига эга бўлган кремний намуналаридаги МаМҚ нинг қийматига хона ҳароратида тушаётган ёруғлик ИҚ-нурининг  $\lambda=1,2\div 4$  мкм бўлгандаги тўлқин узунлигига боғлиқлиги тадқиқ қилинган, нурланиш қуввати  $5 \cdot 10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup>, магнит майдон қиймати  $B=0\div 1,7$  Тл қилиб танлаб олинди.

ИКС (ИҚН)-21 спектрометри асосида махсус қурилма яратилган бўлиб, у электр ва магнит майдон қийматини ҳамда ҳароратнинг кенг ораликда ўзгартириш имконини берди.

Намуналардаги МаМҚ ни нисбий ўзгариши  $\left[ \left( \frac{\Delta\rho}{\rho} \right)_{mem} / \left( \frac{\Delta\rho}{\rho} \right)_{hv} \right]$  ифода асосида ҳисобланган (бу ерда  $\left( \frac{\Delta\rho}{\rho} \right)_{hv}$  -  $h\nu$  энергияли ИҚ-нурланиш таъсиридаги МаМҚ;  $\left( \frac{\Delta\rho}{\rho} \right)_{mem}$  - ИҚ-нурланиш мавжуд бўлмагандаги МаМҚ). МаМҚ ни тушаётган ИҚ нурланиш фотонларининг энергиясига боғлиқлиги ба-расмда келтирилган.

Тадқиқот натижалари шуни кўрсатадики, нурланишнинг  $h\nu=0,3$  эВ (4 мкм) қийматидан бошлаб Ферми сатҳи  $F=E_V+0,385$  эВ бўлган намуналарда МаМҚ нинг қийматини камайиши кузатилди. Тушаётган ёруғлик фотонларининг энергиясини ортиши билан МаМҚ ни камайиши кучайди ва ўзини максимал қийматига  $h\nu=1$  эВ бўлганда эришди яъни, хона ҳарорати шароитида МаМҚ нинг сўнишини ғайри оддий эффементи кузатилди ва унинг қийматини 30 мартадан кўп камайиши аниқланди.

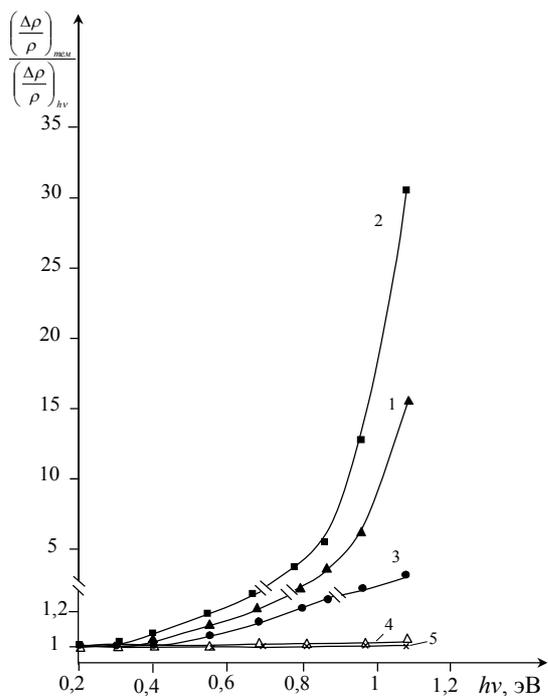
Бу натижалар ИҚ-нурланишнинг тўлқин узунлиги  $\lambda=1,2\div 4$  мкм гача ўзгарганида МаМҚ қийматини етарлича катта ораликда бошқариш мумкинлигини кўрсатди.

Тадқиқот натижаларини таҳлили асосида, МаМҚ ни ИҚ ёруғлик таъсирида сўниш эффементи марганец атомлари нанокластерига эга бўлган барча  $p$ -турдаги кремний намуналарда кузатилиши аниқланди. Шуни қайт этиш керакки, сўниш даражаси намуналардаги Ферми сатҳини ҳолатига яъни намуналарнинг солиштира қаршилигига кчли боғлиқ экан. МаМҚ ни максимал сўниши Ферми сатҳи энергиясининг қиймати  $F=E_V+0,375$  эВ бўлган намуналарда кузатилди. Ферми сатҳи  $F=E_V+0,375$  эВ дан тақиқланган соҳани ўртаси томон силжиганида сўниш даражаси камайди. Ферми сатҳи  $F>E_V+0,48$  эВ бўлган ҳамда ошириб компенсацияланган намуналарда МаМҚ ни сўниш эффементи кузатилмади.

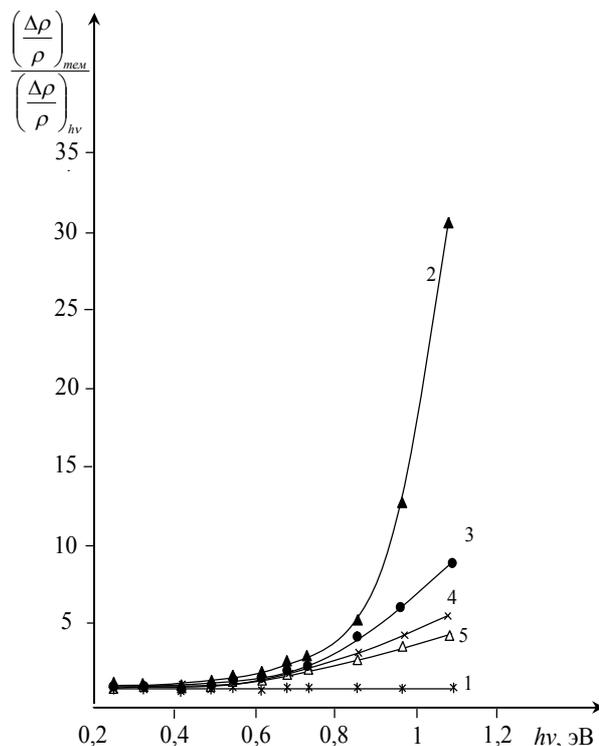
6б-расмда Ферми сатҳи  $F=E_V+0,37$  эВ бўлган нанокластерли  $p$ -Si<B,Mn> намунанинг МаМҚ гини электр майдонга боғлиқлигининг турли энергияли фотонлар таъсиридаги ўзгаришлари келтирилган.

Тадқиқот натижалари шуни кўрсатдики, МаМҚ га ИҚ-нурланишнинг таъсири намунага қўйилган электр майдон қийматига кучли боғлиқ бўлар экан. Кичик электр майдон  $E=1\div 20$  В/см қийматларида, электр майдони ИҚ-нурланишни МаМҚ га таъсирини кучайтирди, яъни МаМҚ ни сўниш эффементи кучайди ва ўзининг максимал қийматига  $E=20\div 25$  В/см бўлганда

эришди. Айтиш мумкин, электр майдони МаМҚ ни ИҚ-нурланиш таъсирида сўнишини кучайтирар экан. Электр майдонининг қиймати янада орттирилганда тескари эффект кузатилди, яъни электр майдонини ошиши билан ИҚ-нурланиш таъсири кучсизланиб сўниш эффекти секинлашди. Электр майдонининг қиймати  $E \geq 150$  В/см бўлганида барча тадқиқ қилинаётган спектр соҳаларда МаМҚ нинг сўниш эффектини йўқолишига олиб келди.



1-  $F=E_V+0,35$  эВ, 2-  $F=E_V+0,37$  эВ, 3-  $F=E_V+0,44$  эВ, 4-  $F=E_V+0,48$  эВ, 5-  $F=E_C - 0,44$  эВ.  
**ба-расм. Ферми сатҳлари турли қийматларида бўлган Si<V,Mn> намуналарда МаМҚ нинг сўниш даражасини спектрга боғлиқлиги.  $E=20$  В/см,  $B=1,7$  Тл,  $T=300$  К.**



1- 2 В/см, 2- 20 В/см, 3- 50 В/см, 4- 80 В/см, 5- 100 В/см.  
**бб-расм. Турли электр майдон кучланганликлари таъсирида МаМҚ сўниш даражасининг спектрга боғлиқлиги.**

Шундай қилиб, катта электр майдонининг  $E > 20$  В/см қийматларида таъсири ИҚ-нурланишни таъсирига қарама-қарши бўлиб, уларни ўзаро тўлиқ компенсацияси  $E=150$  В/см бўлганида кузатилди. Бу физик ҳодиса  $p$ -турдаги барча намуналарда кузатилди. Ферми сатҳи кремнийнинг тақиқланган соҳасини ўртаси томонга силжиши билан намуналарда электр майдон ва ИҚ-нурланишни ўзаро таъсир этиш тавсифи ўзгармайди, лекин стимулловчи электр майдонни катталиги нисбатан кичик қийматлар томонга силжиди.

Олинган натижаларни таҳлили шуни кўрсатадики, кремнийнинг магнит хоссалари марганец атомларининг магнит кластерларини концентрациясига боғлиқ экан.

Қоронғиликда ва ИҚ нурларни  $h\nu=0,45$  эВ;  $0,62$  эВ;  $0,85$  эВ энергиялари билан ёритилганликда МаМҚ ни ҳароратга боғлиқ ўзгариши 7-расмда кўрсатилган. Кўришиб турибдики, ИҚ- нурнинг таъсирида  $\frac{\Delta\rho}{\rho}(T)$

боғланишни сезиларлича ўзгартириш мумкин экан. Бу ўзгаришлар асосан қуйидаги моментлардан иборат бўлади. Тажриба маълумотларининг таҳлили асосида қуйидагилар аниқланди:

1. МаМҚ нинг максимал қиймати кузатиладиган ҳарорат ( $T_{\max}$ ) электр майдон таъсирида нисбатан юқорироқ ҳарорат томонга силжиши кузатилди. Тушаётган ИҚ-нурланиш фотонларининг энергиясини қиймати қанча катта бўлса, ҳароратни силжиши шунча катта бўлади;

2. ИҚ-нурланиш фотонларининг энергиясини қиймати ортиши билан  $T_{\max}$  мос бўлган МаМҚ ни қиймати ҳам сезиларли камайди. Мисол учун  $h\nu=0,85$  эВ  $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\max}$  бўлганда, ўзгариш 300 % дан 25 % гача, яъни 12 мартага камайди;

3. МаМҚ мавжуд бўладиган ҳарорат соҳаси тушаётган фотонларнинг энергиясини ортиши билан сезиларли даражада кичиклашди. Кичиклашиш асосан ҳароратни пастки чегарасини юқори томонга силжиши ҳисобига содир бўлди. МҚ ишорасини ўзгариши эса, юқорироқ ҳароратларда рўй берди ва ИҚ-нурланишга сезиларли боғлиқ бўлмади.

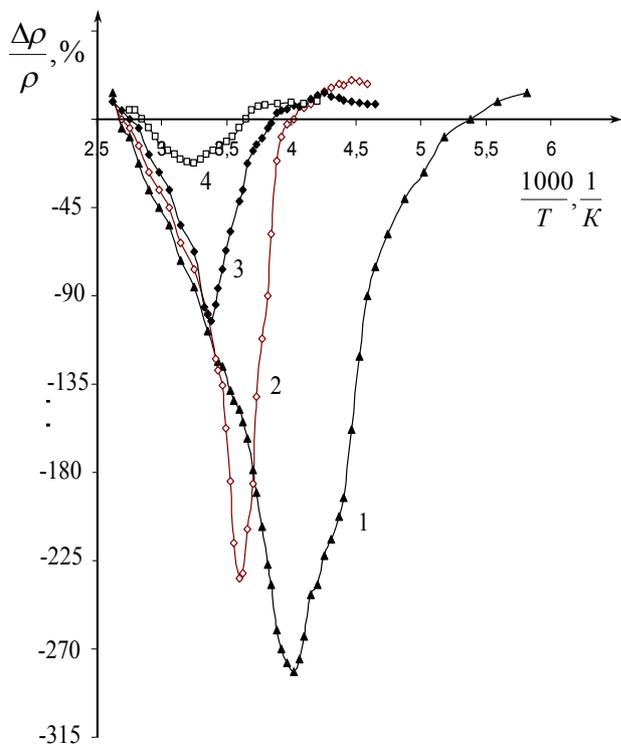
8-расмда ИҚ-нурларнинг турли тўлқин узунлиги ( $\lambda$ ) таъсири остида Ферми сатҳи  $F=E_v+0,37$  эВ бўлган Si<В,Мn> намуналарда МаМҚ ни ИҚ-нурланиш қувватига боғлиқлиги кўрсатилган. Расмдан кўришиб турибдики, ИҚ-нурланиш интенсивлиги ошиши билан МаМҚ ни қиймати камайди. Масалан,  $h\nu=1,08$  эВ энергияли ИҚ-нурланишни сезиш  $P=0,03$  мВт дан бошланди. ИҚ-нурланиш қуввати  $P=1,4$  мВт гача ошганда МаМҚ нинг қиймати 7 мартага камайди. Натижалар шуни кўрсатдики, МаМҚ ни ИҚ-нурланиш таъсирида ҳосил бўлиш чегараси тушаётган инфрақизил нурланиш фотонларнинг энергиясини камайиши билан катта қувватли нурланиш томонга силжир экан. Фотонлар энергияси  $h\nu=0,5$  эВ бўлганда ИҚ-нурланишни сезиши  $P=0,4$  мВт дан бошланди.

Ушбу маълумотлар, марганец атомлари нанокластерларига эга бўлган кремнийни функционал имкониятларидан яна бирини очади, яъни инфрақизил нур қуввати ёрдамида материалнинг магнит хоссасини сезиларли даражада бошқариш имконияти мавжудлигини кўрсатди.

ИҚ-нурланиш билан намуналарга таъсир этиб, тўлқин узунлигига боғлиқ равишда МаМҚ нинг қийматини нафақат 30 мартадан кўпроқ камайтириш, балки ИҚ-нурланишнинг каттароқ қувватларида МҚ нинг ишорасини ўзгариши, яъни МҚ ни МаМҚ дан МуМҚ га ўзгартириш мумкин.

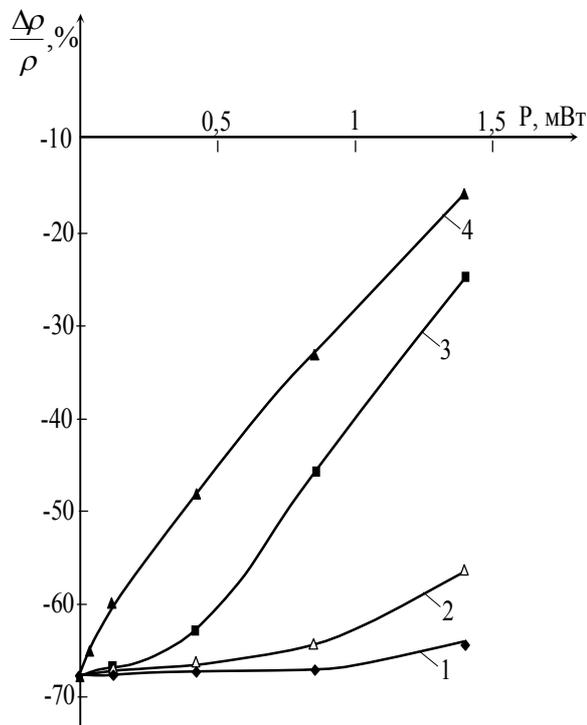
Тажриба натижалари асосида ИҚ-нурланишнинг тўлқин узунлигини ва электр майдонини оптимал қийматини танлаб, марганец атомлари билан легирланган кремний материалларнинг магнит хоссаларини мақсадли бошқариш мумкинлиги аниқланди. Бу ўз навбатида марганец атомларининг

нанокластерлари мавжуд кремний асосида нафақат ИҚ-соҳада ишовчи сезгир фотоманит асбобларни яратиш имкониятларини очиб беради ҳамда янги илмий йўналиш ИҚ-спинтроникани ривожланишида ҳам катта ҳисса қўшади.



1- қоронғиликдаги, 2-  $h\nu=0,45$  эВ,  
3-  $h\nu=0,62$  эВ, 4-  $h\nu=0,85$  эВ

**7-расм.** Турли энергияли ИҚ-нурланиш фотонлари таъсирида Ферми сатҳи  $F=E_V+0,37$  эВ бўлган  $p$ -Si<В,Мn> намунанинг МҚ гини ҳароратга боғлиқлиги,  $V=1,7$  Тл.



1-  $h\nu=0,5$  эВ; 2-  $h\nu=0,62$  эВ;  
3-  $h\nu=0,85$  эВ; 4-  $h\nu=1,08$  эВ

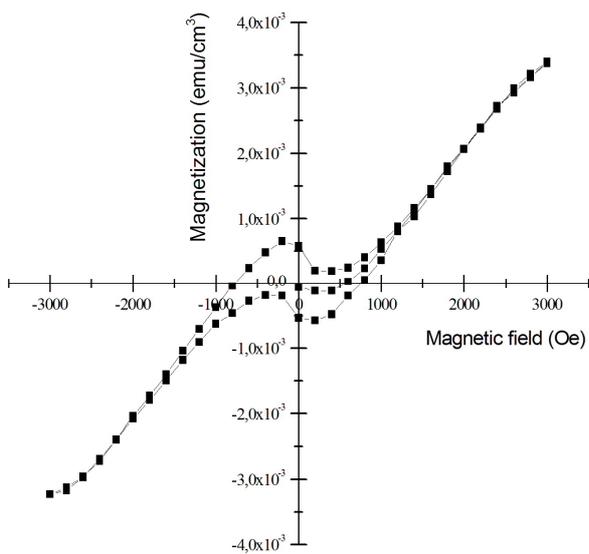
**8-расм.** Турли энергияли ИҚ-нурланиш фотонлари таъсирида Ферми сатҳи  $F=E_V+0,37$  эВ бўлган  $p$ -Si<В,Мn> намунанинг МҚ гини монохроматик нурланиш интенсивлигига боғлиқлиги.  $E=100$  В/см,  $V=1,7$  Тл,  $T=300$  К.

Диссертациянинг “Кремнийни ферромагнит ҳолати ва тубдан янги асбобларни ишлаб чиқишда марганец атомларининг магнит нанокластерлари бўлган кремнийнинг функционал имкониятларидан фойдаланиш” деб номланган олтинчи бобида, марганец атомлари билан легирланган  $p$ -турдаги кремнийни ферромагнит ҳолатини тадқиқ қилиш натижалари келтирилган. Ҳароратнинг  $T=30$  К гача бўлган соҳаларида, максимал концентрациядаги ( $N\sim 10^{15}$  см<sup>-3</sup>) магнит кластерларга эга бўлган кремний намуналарида ферромагнит ҳолат кузатилди.

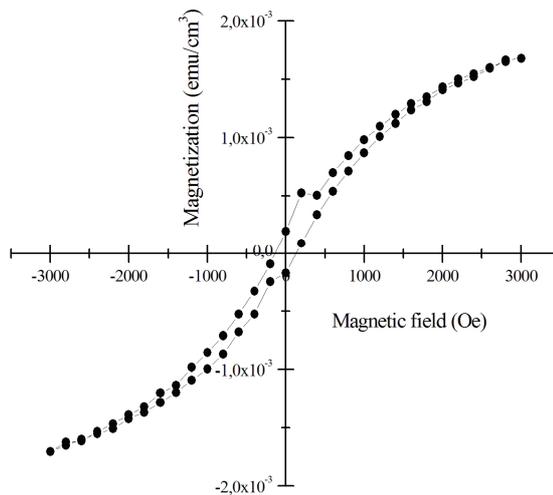
Намуналарнинг магнит хусусияти паст ҳарорат соҳасида СКВИД (сверхпроводящий квантовый интерференционный датчик) –магнитометр қурилмасида тадқиқ қилинди.  $T=30$  К ҳароратда, турли концентрациядаги марганец атомларининг нанокластерларига эга бўлган кремний намуналарининг магнитланганлиги ва магнит майдонга боғлиқлиги 9 -

расмда кўрсатилган. Расмдан кўриниб турибдики,  $T=300$  К да МаМҚ ни максимал қийматлари кузатилган намуналардаги магнитланишни паст ( $T \leq 30$  К) ҳароратлар соҳасида магнит майдонга боғлиқлиги гистерезис характерига эга бўлди. Бу нанокластерга эга бўлган кремнийда ферромагнит ҳолат мавжудлигини тасдиқлайди (9а-расм). Нанокластерлар концентрацияси камайиши билан магнитланганликни магнит майдонга боғлиқлигидаги гистерезисни табиати кучсизланди. (9б- расм).  $n\text{-Si}\langle\text{B,Mn}\rangle$  намуналарда бундай ҳодиса кузатилмади. Марганец атомларининг нанокластерларига эга бўлган кремнийни ферромагнит ҳолати ҳарорат ошиши билан кучсизланди ва  $T \sim 40 \div 50$  К да йўқолди. Тажриба маълумотлари асосида нанокластерларни магнит моменти ҳисобланди ва унинг қиймати  $\mu = 800\mu_B$  га тенг бўлиб чиқди.

Тажриба натижаларидан кўриндики, ҳарорат ошиши билан, магнит нанокластерга  $(\text{Mn})_4$  эга бўлган кремний намуналарининг магнитланишини ҳароратга боғлиқлиги чизиқли камайди (расм 10.).



а)  $N_{(\text{Mn})4} = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$



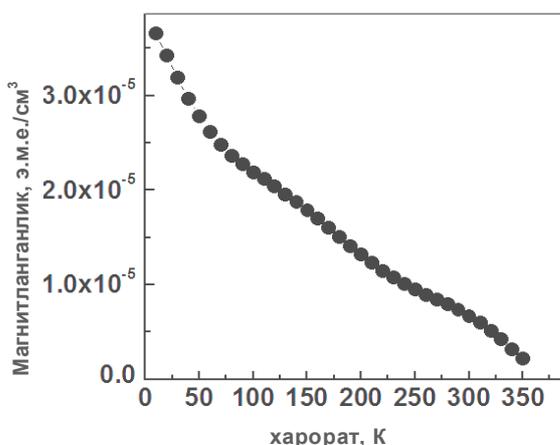
б)  $N_{(\text{Mn})4} = 2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

**9-расм. Турли концентрациядаги марганец атомларининг нанокластерлари бўлган кремнийнинг магнитланганлигини магнит майдонга боғлиқлиги (гистерезис).  $T=30$  К**

Олинган тажриба натижалари асосида шуни хулоса қилиш мумкинки, марганец атомларининг магнит нанокластерларини шаклланиши кремнийни магнит хоссаларига сезиларли таъсир кўрсатар экан.

Ҳароратнинг  $T=230 \div 330$  К оралиғида, кремний намуналардаги нанокластерларининг концентрациясини бошқариб, ўта юқори МаМҚ ни олиш имкотиёти кўрсатилди. Ҳароратнинг паст  $T < 40$  К соҳасида, магнит нанокластерли кремний янги фаза ҳолатига ўтди ва ферромагнит ҳодисаси кузатилди.

Хароратнинг  $T < 40$  К соҳасида  $p\text{-Si} \langle \text{B, Mn} \rangle$  намуналаридаги ферромагнитизм ҳодисаси, магнит нанокластерларни сезиларли магнит моментига эга бўлган  $\left( S_{Mn4} = 4 \cdot \frac{5}{2} = 10 \right)$  спинларининг йўналтирилишини қайта



**10-расм. Магнит нанокластерли (Mn)<sub>4</sub> кремнийни магнитланганлигини хароратга боғлиқлиги**

ўзгариши билан тушунтириш мумкин. Биз томонимиздан кремнийни марганец билан легирлашнинг технологиясини янги усули ишлаб чиқилган бўлиб, уни асосида ва у  $N = 10^{16} \div 10^{17} \text{ см}^{-3}$  гача марганец атомларининг магнит нанокластерига эга бўлган кремний намуналарини олиш имконини беради. Бундай намуналар хона харорати шароитида МаМК қийматини нафақат ошириш имконини шунингдек, ферромагнит ҳолатни кузатилишининг харорат соҳасини сезиларли кенгайтириш

имконини беради.

Тадқиқотлар натижаларининг таҳлили куни кўрсатдики, нанокластерлар мавжуд бўлган кремний материаллари асосида спинтроника соҳасида тубдан янги юқори сезгирликга эга бўлган магнитодатчиклар ва фотоманит асбобларни яратиш мумкин экан.

Диссертацини бажаришда натижаларни олишда, муҳокама қилишда ҳамда тайёрлашда амалий ёрдам берган илмий маслаҳатчиларим физика-математика фанлари доктори, академик Баҳадирханов Мухаммед Кабир Саидхановичга ва физика-математика фанлари доктори, профессор Илиев Холмурат Митжитовичга катта раҳмат айтмоқчиман.

## ХУЛОСА

Кремнийнинг магнит хоссаларини унда шакллантирилган марганец атомларининг магнит хусусиятли нанокластерларининг концентрациясига ва электрофизик параметрларига боғлиқ равишда хароратнинг кенг соҳасида турли ташқи таъсирлар ёрдамида бошқаришни тадқиқ қилиш натижасида қуйидаги хулосалар қилинди:

1. Наноэлектроника ва спинтроника материали сифатида янги физик хоссаларга эга бўлган магнит нанокластерли кремний олишнинг оптимал диффузион технология усули ишлаб чиқилган.

2. Кремний кристалл панжарасидаги марганец атомларини магнит нанокластерларининг ўлчамлари аниқланган ва уларни ўлчамларини 0,7 дан 1,4 нм гача бошқариш имконияти кўрсатилган.

3. Хона хароратида кремнийда марганец атомлари магнит нанокластерларининг концентрацияси  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  бўлганда, манфий магнит қаршиликнинг қийматини 300 % гача ортиши аниқланган.

4. Манфий магнит қаршиликнинг қийматини, тушаётган интеграл (о)қ ёруғлик интенсивлигини 0-20 Лк оралиғида 100 мартагача ошириши кўрсатилган.

5. Манфий магнит қаршилик қийматини инфрақизил ёруғликни тўлқин узунлигига, ҳароратга ва электр майдон кучланганлиги билан боғлиқ ўзгариш қонуниятлари аниқланган.

6. Ҳароратнинг 30 К дан паст соҳасида, марганец атомлари магнит нанокластерларининг концентрацияси  $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  дан ортиқ бўлган кремнийда ферромагнит хусусият намоён бўлиши аниқланган.

7. Ферми сатҳини ҳолатига боғлиқ равишда манфий магнит қаршиликни 120-370 К ҳарорат оралиғи чегарасида кузатиш мумкинлиги аниқланган.

8. Магнит нонокластерли кремнийда юқори ҳароратли катта манфий магнит қаршилик кузатилишига локализацияланган заряд ташувчиларнинг ташқи электр ва магнит майдон таъсирида ўтказувчанликда иштирок этиши билан боғлиқ бўлган физик механизм таклиф қилинган.

9. Марганец атомлари билан легирланган Si<B,Mn> n-турдаги кремнийда ҳам ҳароратнинг 120-190 К интервал оралиғида, максимал қиймати 35 % гача бўлган манфий магнит қаршилик кузатилган.

10. Марганец атомларининг магнит нанокластерларига эга кремний асосида, ҳароратни 200÷360 К гача бўлган оралиғида ишловчи сезгирлиги юқори бўлган фотомагнит, магнит, ҳароратни ўлчовчи ва куп функцияли датчикларни яратиш имкониятлари кўрсатилган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.27.06.2017.FM/Т.34.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ,  
ИНСТИТУТЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,  
САМАРКАНДСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

---

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени ИСЛАМА КАРИМОВА**

**МАВЛОНОВ ГИЁСИДДИН ХАЙДАРОВИЧ**

**УПРАВЛЕНИЕ МАГНИТНЫМИ СВОЙСТВАМИ КРЕМНИЯ  
С НАНОКЛАСТЕРАМИ ПРИМЕСНЫХ АТОМОВ**

**01.04.10 - физика полупроводников**

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА (DSc)  
ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

**Ташкент – 2018**

**Тема диссертации доктора (DSc) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за B2017.1.DSc/FM79.**

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете имени Ислама Каримова

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице по адресу [fti.uz](http://fti.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» по адресу [www.ziyo.net](http://www.ziyo.net).

**Научный консультант:** **Илиев Халмурат Митжидович,**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Рембеза Станислав Иванович**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Зайнобиддинов Сирожиддин**  
доктор физико-математических наук, академик

**Камалов Амангелди Базарбаевич**  
доктор физико-математических наук, доцент

**Ведущая организация:** Ташкентский университет информационных технологий.

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 года в \_\_\_ часов на заседании Научного совета DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 при Физико-техническом институте, Институте Ионно-плазменных и лазерных технологий, Самаркандском государственном университете по адресу: 100084, г.Ташкент, ул. Бодомзор йули, 26. Административное здание Физико-технического института, зал конференций. Тел./Факс: (+99871) 235-42-91, e-mail: [info.fti@uzsci.net](mailto:info.fti@uzsci.net).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Физико-технического института (зарегистрирована за № \_\_\_\_). Адрес: 100084, г.Ташкент, ул. Бодомзор йули, дом 26. Административное здание Физико-технического института, зал конференций Тел./Факс: (+99871) 235-30-41.

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.  
(протокол рассылки № \_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2018 г.)

**С.А. Бахрамов**  
Илмий даражалар берувчи Илмий  
кенгаш раиси ф.-м.ф.д., академик

**А.В. Каримов**  
Илмий даражалар берувчи Илмий  
кенгаш илмий котиби ф.-м.ф.д., профессор

**И.Г. Атабаев**  
Илмий даражалар берувчи Илмий  
кенгаш кошидаги илмий семинар раиси  
ф.-м.ф.д., профессор

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация докторской (DSc) диссертации)**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире на сегодня в бурно развивающемся направлении физики полупроводников одним из перспективных направлений ведутся научные исследования по разработке способов управления магнитными свойствами полупроводниковых материалов и на их основе получению больших интегральных схем, элементов с магнитными свойствами, сенсоров с магнитными сопротивлениями, нового типа магнитных датчиков, созданию фотомагнитных приборов и их совершенствованию. В этом аспекте создание и исследование магнитных нанокластеров в кристаллической матрице кремния, без существенного нарушения его кристаллической решетки и фазового состава, управление их магнитными свойствами является одним из важных задач.

На сегодняшний день в мире с помощью ионной имплантации, радиационным излучением, эпитаксиальным наращиванием, а также химическими способами обращается большое внимание гетероструктур с магнитными свойствами. В этой сфере реализация целевых научных исследований, в том числе научных изысканий по следующим направлениям является одним из важнейших задач: разработка способа получения магнитного наноструктурного материала за счет формирования магнитных нанокластеров атомов марганца в решетке кремния с помощью низкотемпературного поэтапного диффузионного легирования; определение оптимальных электрических параметров образцов позволяющие получить высокое отрицательное магнитосопротивление при комнатной температуре; исследовать возможности управления магнитосопротивлением кремния с магнитными нанокластерами в широком интервале температуры, электрического и магнитного поля; разработка способов управления магнитосопротивлением кремния с магнитными нанокластерами в зависимости от концентрации нанокластеров, определение перехода на магнитные свойства кремния при низких температурах.

В соответствии со Стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан, особое внимание уделяется вопросам стимулирования научно-исследовательской и инновационной деятельности, создания эффективных механизмов прикладного применения достижений научно-инновационной деятельности. В годы поддержки активного предпринимательства, инновационных идей и технологий, нацеленного на получение научных результатов, отвечающих современным требованиям научного развития обращает особое внимание. В этом аспекте на основе создания способов получения на поверхности полупроводников наноструктур и исследования нового типа полупроводниковых структур, датчиков светового, давления, влажности и температуры, высоковольтных и низкочастотных диодов, структур с магнитными свойствами легированных обладающих в кремнии высокой растворимостью редкоземельными

элементами (гадолинием, европием, голмием, самарием) и на этой основе управление их магнитными свойствами имеет важное значение.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Указе Президента № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 года и в Постановлениях Президента № ПП-2772 «О мерах по дальнейшему совершенствованию управления, ускоренному развитию и диверсификации электротехнической промышленности на 2017 – 2021 гг.» от 13 февраля 2017 года и № ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Настоящая работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан III. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение, транспорт, машино - и приборостроение» развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, спинтроники, электронного приборостроения.

**Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации<sup>1</sup>.** Научные исследования в области исследования магнитных свойств материалов и разработка новых приборов на основе магнитных полупроводников проводится в ведущих научных центрах, институтах и университетах, в том числе проводятся исследования при низких температурах ферромагнитных свойств полупроводниковых материалов в Квантофункциональном исследовательском центре полупроводников, (Южный Корея). Работами по получению наноструктурного кремния с примесными атомами занимается Синцзянский инженерный институт (Китай), фирма «Infineon» выпускает датчики для измерения магнитного поля на основе магнитосопротивления. Датчики представляют собой кремниевую пластину, содержащую чувствительные к магнитному полю ячейки на основе магниторезистивного GMR –эффекта. Немецкая компания SICK занимается выпуском и применением магнитодатчиков.

В Канаде, на кафедре физики Dalhousie университета занимаются магнитными свойствами и магнитосопротивлением в кристалле Al-Pd-Mn-B, на кафедре физики Калифорнийского технологического института (США) и в лаборатории Jet Propulsion центра технологии микроэлектроники (California, США) экспериментально занимаются магнитными свойствами тонких слоев  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ . Группа d'Etude des Semiconducteurs Монтпеллерский университет (France) занимается отрицательным магнитосопротивлением в кремнии с добавлением AlAs-GaAs.

На кафедре физики Кюонпокского национального университета (Taegu, Korean) занимаются положительным и отрицательным магнитосопротивлением в тонких слоях.

**Степень изученности проблемы.** В последнее время достаточно интенсивно изучается формирование магнитных нанокластеров примесных

атомов в полупроводниках и использование их свойств. В работах авторов G.W. Ludwig, Н.Н. Woodbury и в работах авторов В.И. Фистуль, В.М. Казакова, Ю.А. Бобриков, А.В. Рябцев, К.П. Абдурахманов, С. Зайнабидинов, Т.С. Камилов, Ш.Б. Утамурадова, а также в работах авторов J.Kreissl, W.Gehlhoff было показано, что в кремнии, легированном марганцем, при медленном охлаждении после диффузии, обнаружены

---

<sup>1</sup>Negative magnetoresistance in Mn-doped p-CdSb under pressure // Journal of Alloys and Compounds. 2017. 699. p.1104-1107., Negative magnetoresistance of heavily doped silicon p-n junction// Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics, 2011.V.14,N1.p. 88-90. Negative magnetoresistance in ultrananocrystalline diamond: strong or weak localization // Appl. Phys. Lett. 2008. 92. pp 012120., Classical origin for a negative magnetoresistance and for its anomalous behavior at low magnetic fields in two dimensions//Revista Mexicana De F'Isica 2006. S. 52 №3. С.185-189.

нанокластеры, состоящие из 4-х атомов марганца. Однако управление скоростью охлаждения не позволило получить образцы с воспроизводимыми параметрами, а также практически не изучены состав, структура, размер, магнитный момент нанокластеров и электрофизические свойства Si с такими наноструктурами.

Работа Воронина Т.И., Лагунова Т.С., Михайлова М.П., Моисеева К.Д., Липаева А.Ф., Яковлева Ю.П. посвящена исследованию транспортных свойств гетероструктур GaInAsSb/InAs:Mn, выращенных на подложках, легированных магнитной примесью Mn с высокой концентрацией ( $p > 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ), обнаружены аномальный эффект Холла и отрицательное магнитосопротивление, обусловленные обменным взаимодействием ионов Mn в InAs с высокоподвижными электронами в канале на гетерогранице.

В работе Каминский В.Э решено кинетическое уравнение для матрицы плотности в квантующем магнитном поле при рассеянии на деформационном потенциале. Полученные на основании этого решения результаты показывают, что поперечное ОМС может наблюдаться в электронном газе без случайного потенциала. Это является результатом последовательного учета магнитного квантования.

В работе авторов Таланцев А.Д., Коплак О.В., Моргунов Р.Б обнаружено влияние концентрации дырок на ферромагнетизм кластеров MnSb в пленках GaMnSb. Высокая концентрация дырок приводит к их туннелированию сквозь барьер Шоттки на границе кластер–кристаллическая решетка и изменению намагниченности кластеров. Микроволновое сопротивление пленок зависит от спиновой поляризации дырок, управляемой намагниченностью кластеров и внешним магнитным полем.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационная работа выполнялась на кафедре «Цифровая электроника и микроэлектроника» ТГТУ согласно программе государственных грантов: Ф2-47 «Исследование физических основ формирования ферромагнитного состояния кремния с магнитными кластерами» (2012-2016), Ф2-44 «Исследование механизма самоорганизации примесных атомов в полупроводниках и управление их параметрами» (2012-

2016) а также текущего гранта Ф2-55 «Разработка научных основ получения объемнонаноструктурированного кремния на основе формирования нанокластеров примесных атомов как нового класса наноматериалов с уникальными функциональными возможностями» (2017-2020).

**Целью исследования** является управления магнитными свойствами кремния с магнитными нанокластерами в зависимости от их концентрации и электрических параметров в широком интервале температур при различных внешних воздействиях.

В соответствии с поставленной целью необходимо было решить следующие **задачи**:

разработать способ получения магнитного наноструктурного материала за счет формирования магнитных нанокластеров атомов марганца в решетке кремния с помощью низкотемпературного поэтапного диффузионного легирования.

определить оптимальные электрические параметры образцов позволяющие получить высокое отрицательное магнитосопротивление при комнатной температуре.

исследовать возможности управления магнитосопротивлением кремния с магнитными нанокластерами в широком интервале температуры, электрического и магнитного поля.

исследовать особенности управления магнитосопротивления кремния с магнитными нанокластерами в зависимости от концентрации нанокластеров.

исследовать особенности фотомагнитных свойств кремния с магнитными нанокластерами как при фоновом освещении, так и при освещении в ИК области спектра.

исследовать отрицательное магнитосопротивление при одновременном приложении различных внешних воздействий (температура, электрическое поле и освещение).

научно обосновать и показать возможность получения ферромагнитного кремния путем формирования в нем магнитных кластеров.

определить, на основе экспериментальных результатов, магнитный момент нанокластера, а также магнитную восприимчивость и намагниченность материала содержащего такие нанокластеры.

**Объектом исследования** является монокристаллический кремний марки КДБ - 2, 3, 5, 10, 100. В качестве примеси был выбран марганец, являющийся парарамагнитным атомом, который обладает электронной структурой  $3d^5 4s^2$  со спином  $S = \frac{5}{2}$ .

**Предметом исследования** является получение магнитонаноструктурированного компенсированного ( $p$ -Si<B,Mn>) и перекомпенсированного кремния ( $n$ -Si<B,Mn>) с удельным сопротивлением  $\rho = 10^2 \div 10^5$  Ом·см, для установления закономерностей управления МС материалов в зависимости от электрических параметров образцов.

**Методы исследований.** Современными методами электронного

парамагнитного резонанса и атомной силовой микроскопии, а также рентгеноструктурного анализа исследовано состояние атомов марганца в решетке кремния.

Фотомагнитные свойства образцов исследовались на специально созданной установке на основе инфракрасного спектрометра (ИКС-21) и электромагнита, позволяющей варьировать электрическое и магнитное поле, температуру, а также длину волны ИК излучения и его мощность.

Ферромагнитное состояние таких образцов в области низких температур, исследовалось на установке СКВИД (сверхпроводящий квантовый интерференционный датчик) – магнитометр.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

разработаны оптимальный низкотемпературный поэтапный способ диффузии, позволяющий формировать нанокластеры атомов марганца с магнитными свойствами по всему объему решетки кремния с управляемым распределением и параметрами.

предложен способ повышения термостабильности параметров кремния, легированного атомами марганца при высоких температурах за счет формирования нанокластеров атомов марганца;

установлено высокое отрицательное магнитосопротивление  $\frac{\Delta\rho}{\rho} \geq 300\%$

в кремнии при комнатной температуре за счет увеличения концентрации магнитных нанокластеров атомов марганца до  $N=10^{15} \text{ см}^{-3}$ ;

определено линейное увеличение отрицательного магнитосопротивления в кремнии с магнитными нанокластерами атомов марганца с ростом индукции магнитного поля;

определено гашение отрицательного магнитосопротивления в кремнии с нанокластерами при воздействии интегрального и инфракрасного освещения – уменьшения отрицательного магнитосопротивления до 100 раз обусловлен уменьшением заряда нанокластеров, имеющих мощный магнитный момент и многократное зарядовое состояния, при одновременном воздействии интегрального и инфракрасного освещения;

определен переход в ферромагнитное состояние кремния при низких температурах 30 К, за счет упорядочения ориентации спинов магнитных нанокластеров  $(\text{Mn})_4$ , обладающих с магнитным моментом;

произведен расчет магнитного момента нанокластеров атомов марганца используя значения намагниченности кремния ( $\chi_{\text{Mn}}$ ) определенного из экспериментальных результатов в области низких температур ( $T=10 \text{ К}$ );

определены линейное уменьшение намагниченности кремния с повышением температуры за счет разупорядочения спинов нанокластеров с повышением ( $kT$ ) энергии;

показана возможность управления величиной отрицательного магнитосопротивления до 600 % при 240 К в широкой области электрического от 0,1 до 600 В/см и магнитного от 0,2 до 2 Тл поля.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

Разработана технология получения кремния с наноструктурами атомов марганца по всему объему кристалла.

установлено, что управление величиной высокотемпературного отрицательного магнитосопротивления с помощью внешних воздействий (температура, освещенность, электрическое поле) дает возможность создать новый класс многофункциональных датчиков физических величин.

показана возможность получения ферромагнитного кремния, на основе кремния с магнитными нанокластерами.

разработана конструкция многофункционального датчика физических величин на основе кремния с магнитными нанокластерами.

**Достоверность результатов исследований** подтверждается применением современных научных методов и технологий. Полученные результаты объясняются на основе физических представлений, основанных на теоретических и экспериментальных данных. Достоверность данных обеспечивается использованием нескольких независимых методик измерения и обработки данных, а также апробированными механизмами физики полупроводников.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость результатов исследования заключается в объяснении физических механизмов формирования магнитных нанокластеров атомов марганца в решетке кремния, физическом обосновании обнаруженного эффекта высокотемпературного аномально высокого ОМС, доказательстве возможности управления его величиной с помощью внешних воздействий, а также в изучении свойств кремния с магнитными нанокластерами, как нового класса фотомагнитных материалов.

Практическая значимость результатов исследований заключается в том, что на основе кремния с нанокластерами атомов марганца можно разработать высокочувствительные магнитные и фотомагнитные приборы, многофункциональные датчики физических величин, а также получить ферромагнитный кремний.

**Внедрение результатов исследований.** На основе результатов изучения термостабильности электрофизических параметров, магнитных и фотомагнитных свойств полученных материалов, а также открытия ферромагнитного состояния кремния с нанокластерами атомов марганца:

результаты были использованы для получения наноструктур кремния с низкими активационными энергиями примесей с помощью низкотемпературных и поэтапных диффузионных моделей. В результате, в активном участке карбида кремния была проведена диффузия примесных атомов бора и алюминия в рамках гранта № ПФИ ФЗ-ФА-0-56434 на тему «Физические закономерности формирования тонкопленочных структур и структур с нановключениями для солнечных элементов и полупроводниковых приборов» (справка ФТА-02-11/940 от агентства по науке и технологиям Республики Узбекистан от 24 октября 2017 года);

получение материала кремния с магнитными нанокластерами

примесных атомов марганца использовано для изготовления магнитодатчиков для измерения магнитного поля на основе кремния с нанокластерами примесных атомов марганца в АО «Фотон» (справка № 02.2074., 06.10. 2017 г. АК Узэлтехсаноат). Использование результатов полученных в данной научно-исследовательской работе позволило существенно улучшить технологию изготовления высоковольтных высокочастотных диодов (ВВД) и стабильности к внешним воздействиям (температура и  $\gamma$ - облучение;

теоретические результаты диссертации были использованы при обработке экспериментальных данных в работе, выполняемой в Институте солнечной энергии Академии Наук Туркменистана в рамках международного гранта «Разработка и изготовление принципиально новых фотоэлементов с широкой спектральной чувствительностью (0,1-3 мкм) на основе кремния с нановаризонными структурами» (Справка № 162/17 от Институт солнечной энергии АТН от 09 ноября 2017 года).

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 8 международных и республиканских научно-практических конференциях.

**Публикации результатов исследований.** По материалам диссертации опубликовано 33 научных работ, из них 2 монографии, 13 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 198 страниц машинописного текста, включая 89 рисунков и 8 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологии, приведен обзор международных научных исследований по теме диссертации и степень изученности проблемы. Проведен анализ состояния проблемы и обоснована актуальность темы исследования, научная новизна направления, изложены цель работы и основные задачи для решения данной проблемы, научная и практическая ценность проведенного исследования.

В первой главе «**Магнитные свойства полупроводниковых материалов**» сделан литературный обзор. Представлены самые последние данные по исследованию отрицательного магнитосопротивления (ОМС) и положительного магнитосопротивления (ПМС) в различных полупроводниках и их значимость, а также представлены их физический механизм и условия получения ферромагнитных материалов.

Во второй главе «**Разработка технологии изготовления образцов кремния с магнитными нанокластерами и определение их электрофизических свойств**» приводятся оптимальный способ получения магнитного наноструктурированного материала за счет формирования магнитных нанокластеров атомов марганца в решетке кремния с помощью низкотемпературного поэтапного диффузионного легирования, а также методика проведения экспериментов.

Сущность данного способа легирования заключается в проведении диффузии поэтапно с определенной скоростью повышения температуры. Показано, что этот способ не только позволяет осуществить максимальное участие введенных атомов в формировании нанокластеров, но также обеспечивает равномерное распределение магнитных нанокластеров по всему объему материала. Это дает полное основание считать, что экспериментальные значения энергии активации диффузии и соответственно температурная зависимость диффузии  $D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$ , а также растворимость примесей полученные на основе высокотемпературной диффузии, нельзя использовать в условиях низкотемпературной диффузии, а процесс диффузии при этом существенно ускоряется, что полностью подтверждает предположение о вынужденной диффузии примесных атомов по междоузлиям.

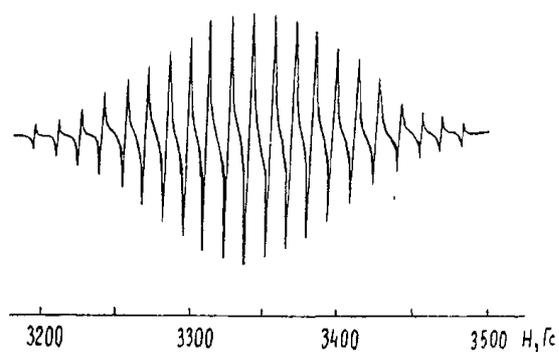
Исследовано состояние атомов марганца, введенных по новой технологии в решетку кремния, современными методами электронного парамагнитного резонанса и атомной силовой микроскопии, а также рентгеноструктурного анализа.

Природа состояния атомов марганца в решетке кремния исследовалась с помощью спектров ЭПР на установке «Broker» при  $T=77$  К. Для регистрации спектров ЭПР использовался спектрометр, работающий в 3-х сантиметровом диапазоне длин волн. Интегральная чувствительность

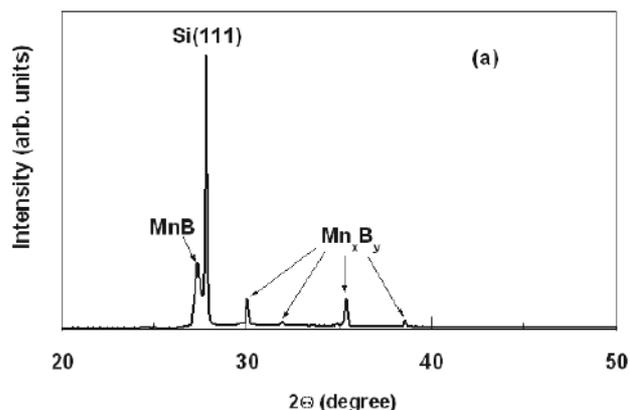
прибора составляла  $\sim 5 \cdot 10^{10}$  спин/Гс, а точность установления составляла до 0,001%. Точное определение g-фактора наблюдаемого спектра осуществлялось по линии маркера с  $g=2,0024$ .

Как показали результаты исследований в образцах  $p\text{-Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$ , полученных по новой технологии, с положением уровня Ферми в пределах  $E_F=E_V+(0,38\div 0,45)$  эВ, четко наблюдаются сверхтонкие спектры ЭПР состоящие из 21 линии (рис. 1) характерные для нанокластеров содержащих в своем составе четыре атома марганца. Эти результаты являются прямым доказательством образования магнитных нанокластеров примесных атомов в решетке кремния. Со смещением уровня Ферми от  $E_F=E_V+(0,38\div 0,45)$  к середине запрещенной зоны  $F=E_V+(0,52\div 0,55)$  эВ наблюдаются спектры ЭПР интенсивность которых ослабляется за счет уменьшения концентрации атомов в состоянии  $[\text{Mn}]^{++}$  и соответственно увеличения концентрации атомов в состоянии  $\text{Mn}^+$ .

В результате творческого сотрудничества с коллективом исследовательского центра полупроводников Кванто-функционального исследовательского центра полупроводников, университета Dongguk, Сеул, из Южной Кореи, нами были подготовлены образцы кремния с магнитными нанокластерами, нашими коллегами был проведен структурный анализ образцов Si легированного Mn с использованием рентгеновского дифрактометра (РД). На рис 2 приведены дифракционные пики Si (111), показывающие комплексы бориды марганца ( $\text{Mn}_4\text{B}$ ).



**Рис. 1 а. Спектр ЭПР нанокластера состоящего из 4-х атомов марганца в кремнии**



**Рис. 1 б. Рентгенографическое изображение магнитных кластеров**

Оптимальные термодинамические условия позволяют получить минимальную потенциальную энергию нахождения кластера в решетке кремния. На основе расчета, с учетом кулоновского взаимодействия атомов марганца между собой и взаимодействия между атомами марганца и бора был определен оптимальный размер нанокластеров, который составляет от 0,7 до 1,4 нм.

Таким образом, экспериментально доказано, что в условиях низкотемпературной диффузии, не только возможно получение образцов кремния без эрозии поверхности, без образования силицидов в приповерхностной области, но и возможно равномерное легирование образца с необходимой концентрацией и заданной глубиной.

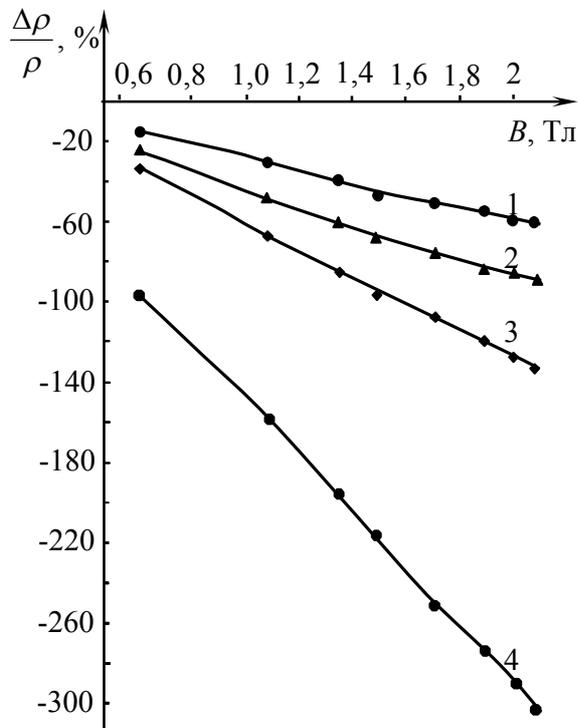
В третьей главе «**Магнитосопротивление в кремнии с магнитными нанокластерами атомов марганца и кремнии легированного марганцем без нанокластеров**» приводятся ряд оригинальных результатов исследования магнитосопротивления кремния с магнитными нанокластерами атомов марганца в перекомпенсированных образцах, а также образцах *p*-типа без нанокластеров. При этом особое внимание было уделено зависимости магнитных свойств кремния от величины магнитного поля и вкладу магнитных нанокластеров в появление ОМС, а также определение температурной области существования эффекта отрицательного магнитосопротивления (ОМС).

Для исследования вклада магнитных нанокластеров в ОМС, были изготовлены образцы с одинаковым удельным сопротивлением, но с различной концентрацией нанокластеров. Результаты показывают что, с ростом концентрации магнитных нанокластеров, значение ОМС существенно увеличивается (Рис. 2а). В образцах с концентрацией нанокластеров  $N=10^{15}$  см<sup>-3</sup> при комнатной температуре и при  $E=100$  В/см получается большое ОМС  $\Delta\rho/\rho\sim 300\%$ , а чувствительность магнитного поля составляет  $\alpha=150\%$ /Тл.

Эти результаты, не только явно доказывают, что появление ОМС и его природа в таких образцах непосредственно связана с наличием нанокластеров атомов марганца в решетке, но и с возможностью управления значением ОМС в широком интервале путем изменения концентрации нанокластеров. Установлено, что с ростом концентрации нанокластеров в интервале  $2\cdot 10^{13}\div 10^{15}$  см<sup>-3</sup>, при одинаковых условиях эксперимента, значение ОМС увеличивается в  $8\div 10$  раз, а чувствительность к магнитному полю повышается от  $\alpha=28\%$ /Тл до  $\alpha=150\%$ /Тл. Самые последние способы усовершенствования технологии изготовления образцов, показывают возможность получения нанокластеров с концентрацией до  $N=10^{17}$  см<sup>-3</sup>. При этом можно ожидать, что в таких образцах значение ОМС будет на 1,5 порядка больше чем в полученных образцах.

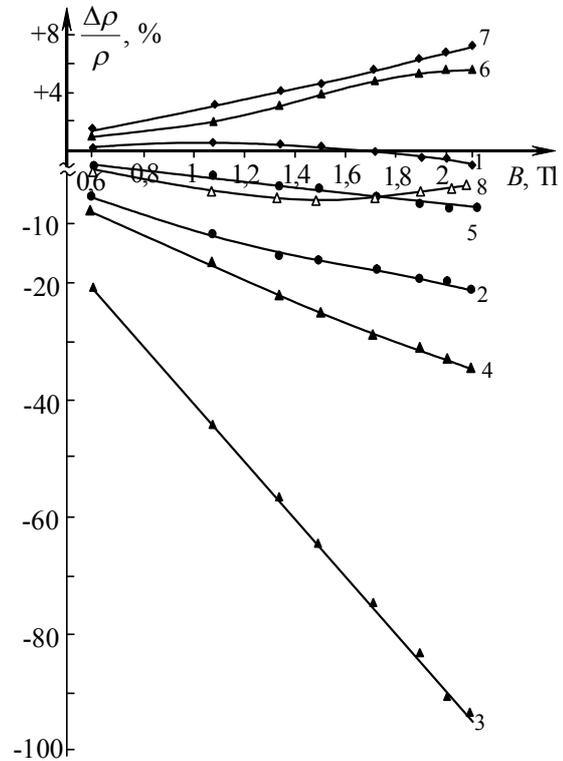
На рис. 2б представлено исследование влияния магнитного поля на МС в образцах с нанокластерами *p*-Si<В,Мn> с положением уровня Ферми  $F=E_V+0,24\div E_V+0,48$  эВ и перекомпенсированных образцах *n*-Si<В,Мn> с  $F=E_C-(0,35\div 0,54)$  эВ. В образцах *p*-типа с положением уровня Ферми  $F\leq E_V+0,27$  эВ всегда имеет место незначительное положительное магнитосопротивление (ПМС), величина которого слабо зависит от магнитного поля. Со смещением уровня Ферми к  $F\geq E_V+0,28$  эВ, при низких значениях магнитного поля, наблюдается незначительное ПМС, значение которого с ростом магнитного поля уменьшается, а при  $B\geq 1,8\div 1,9$  Тл, знак магнитосопротивления меняется, т.е. ПМС переходит в ОМС (Рис. 2б

крив.1). Многочисленные эксперименты показали, что пороговый уровень Ферми, где проявляется эффект ОМС, это  $F \sim E_V + 0,28$  эВ. Смещение уровня Ферми в образцах кремния с магнитными нанокластерами атомов марганца от  $F \sim E_V + 0,28$  эВ в сторону середины ширины запрещенной зоны, приводит к усилению эффекта ОМС (рис. 2б кривые 2, 3), а значение ОМС растет с ростом магнитного поля.



1- $N_{(Mn)4} = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , 2- $N_{(Mn)4} = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  
3-  $N_{(Mn)4} = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , 4- $N_{(Mn)4} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

**Рис. 2а. Зависимость ОМС от магнитного поля в образцах с различной концентрацией магнитных нанокластеров при  $T=300 \text{ К}$ ,  $E=100 \text{ В/см}$ .**



Образцы *p*-типа: 1- $F = E_V + 0,28$  эВ,  
2- $F = E_V + 0,32$  эВ, 3-  $F = E_V + 0,385$  эВ, 4- $F = E_V + 0,434$  эВ, 5-  $F = E_V + 0,48$  эВ. Образцы *n*-типа: 6- $F = E_C - 0,45$  эВ, 7- $F = E_C - 0,384$  эВ. Образцы *p*-типа, без нанокластеров: 8-  $F = E_V + 0,385$  эВ

**Рис. 2б. Зависимость МС от магнитного поля в образцах *p*-Si<В,Мп>и *n*-Si<В,Мп> при различных положениях уровня Ферми при  $E=100 \text{ В/см}$ ,  $T=300 \text{ К}$ .**

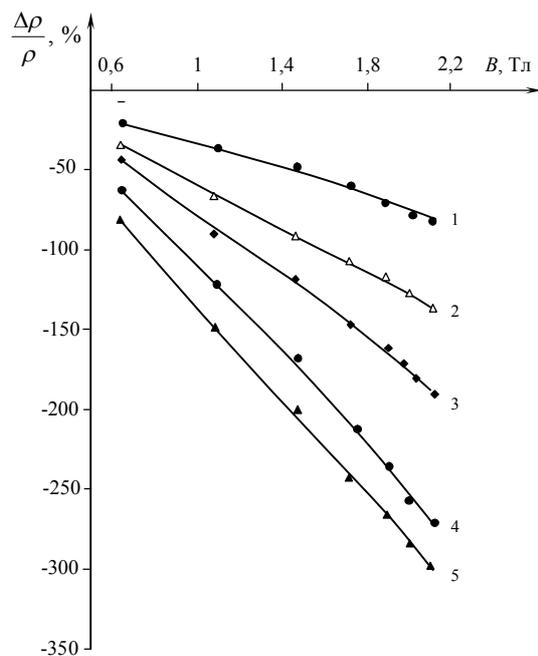
Максимальное значение ОМС наблюдается в образцах с положением уровня Ферми  $F \sim E_V + 0,375 \div E_V + 0,385$  при  $T=300 \text{ К}$ . В перекомпенсированных образцах при комнатной температуре независимо от положения уровня Ферми, всегда наблюдается небольшое (ПМС) (рис. 2в кривые 6, 7). Со смещением уровня Ферми от зоны проводимости к середине запрещенной зоны значение ПМС увеличивается практически линейно и составляет от 2,5 % до 7 % т.е.  $15 \frac{\%}{\text{эВ}}$ . При понижении температуры значение ПМС медленно уменьшается, а при  $T \sim T_{\text{нор}}$  происходит инверсия знака МС, т.е. от ПМС к ОМС. Со смещением уровня Ферми от середины запрещенной зоны к зоне

проводимости концентрация атомов марганца увеличивается и соответственно значение ОМС также увеличивается и достигает своего максимального значения 35 % в образцах  $F=E_C-0,37$  эВ при  $T=150$  К. В перекомпенсированных образцах наличие ОМС должно определяться спином атомов марганца  $S=5/2$  и их зарядовым состоянием.

Установлено, что максимальное ОМС наблюдается в образцах с положением уровня Ферми  $F=E_V+(0,375\div 0,385)$  эВ. Определены закономерности изменения отрицательного магнитосопротивления от положения уровня Ферми в таких образцах.

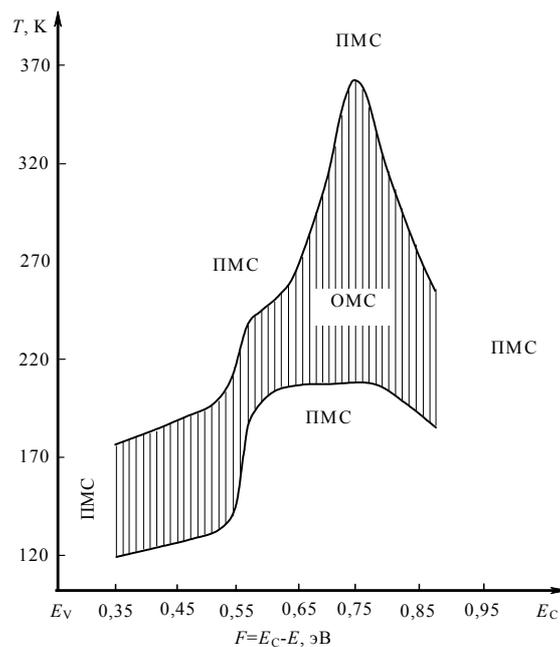
Как видно с уменьшением температуры значение ОМС увеличивается но при этом сохраняется его линейная зависимость  $\frac{\Delta\rho}{\rho}(B)$  от роста магнитного поля (рис. 3а).

На основе полученных данных по исследованию МС как в компенсированных, так и в перекомпенсированных образцах, была определена температурная область существования как ОМС так и ПМС (Рис. 3б) в зависимости от положения уровня Ферми.



1-T=300 К, 2-T=283 К, 3-T=270 К,  
4-T=262 К, 5-T=235 К.

**Рис. 3а. Зависимость ОМС от магнитного поля в образцах  $p$ -Si<B,Mn> с положением уровня Ферми  $F=E_V+0,385$  эВ,  $E=100$  В/см, при различных температурах:**



**Рис. 3б. Температурная область существования ОМС в зависимости от положения уровня Ферми.**

Как видно из рис. 3б кремний легированный марганцем обладает большим ОМС в достаточно широком интервале температур. Управляя положением уровня Ферми в материале можно изменять значение ОМС в

достаточном широком интервале (1÷100 % при T=300 К). За границей положения уровня Ферми  $F < F = E_V + 0,29$  и  $F < F = E_C - 0,32$  eV, а также в области температур  $T > 370$  К и  $T < 120$  К наблюдается только ПМС.

Эти результаты показывают уникальные магнитные свойства кремния легированного марганцем. Уникальность при этом заключается в том, что в этих материалах меняя условия легирования и выбирая исходный материал можно управлять положением уровня Ферми.

В четвертой главе «**Влияние внешних воздействий на ОМС в кремнии легированном марганцем**» приводятся экспериментальные результаты исследования зависимости ОМС от электрического поля а также влияние интегрального и монохроматического освещения. При этом основной задачей было установить закономерности изменения магнитосопротивления в компенсированном материале, установить оптимальные значения электрического поля, выявить зависимость магнитосопротивления от интенсивности освещения с целью получения максимального ОМС.

Полученные экспериментальные данные однозначно показывают, что освещение приводит к уменьшению ОМС, т.е. эффекту гашения ОМС и инверсии знака МС. При этом установлено, что чем больше значение ОМС в темноте, тем больше значения интенсивности освещения при которых оно происходит (Рис.4а.).

Эти данные с одной стороны показывают насколько существенную роль играет перезарядка энергетических уровней кластеров атомов марганца в магнитных свойствах полученного материала, а с другой стороны выявляет еще одну уникальную функциональную возможность кремния с нанокластерами - фотомагнитная чувствительность такого материала, которая практически отсутствует в других магнитных полупроводниковых материалах.

Представляет интерес исследование влияния интенсивности освещения на свойства МС образцов при более низких температурах. На рис. 4б представлена температурная зависимость МС образцов кремния с нанокластерами при различных уровнях освещения фоновым светом. Как видно при отсутствии освещения с понижением температуры значение ОМС достаточно быстро увеличивается и достигает своего максимального значения при  $T = 235 \div 240$  К, где значение ОМС составляет  $\Delta\rho/\rho = 300$  %.

Эту зависимость можно описать в виде 
$$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_T = \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_0 \left(\frac{T_0}{T}\right)^5 \quad (240 < T < 330, T_0 = 300$$

К). Дальнейшее понижение температуры до  $T = 215 \div 220$  К приводит к уменьшению ОМС. При этом зависимость описывается следующим законом

$$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_T = \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_1 \left(\frac{T_1}{T}\right)^{-5} \quad (170 < T < 240).$$
 При температуре  $T \leq 170 \div 175$  К меняется знак

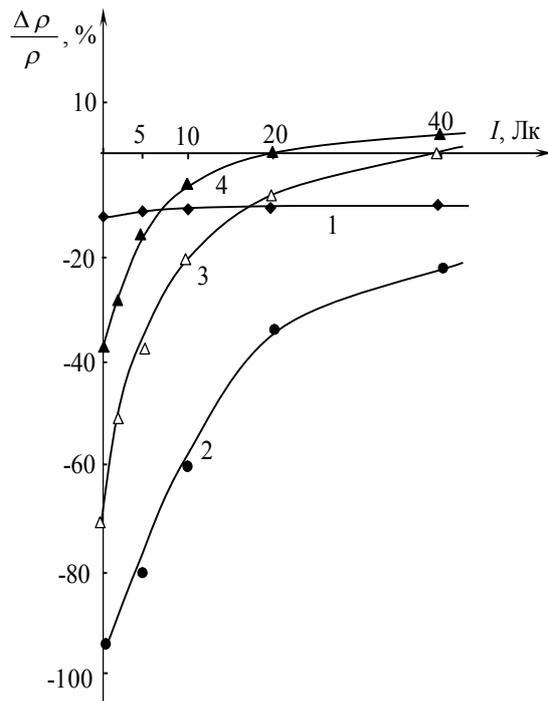
МС оно переходит от ОМС к ПМС.

Аналогичные исследования проводилась при освещении светом  $I = 10$  Лк, 40 Лк и 80 Лк (крив. 2, 3, 4). При этом наблюдаются следующие

интересные эффекты. Во-первых, освещение приводит к существенному уменьшению значения ОМС при данной температуре. Например при  $T=240$  К, значение ОМС уменьшается от  $\frac{\Delta\rho}{\rho} \sim 300\%$  до нуля т.е.

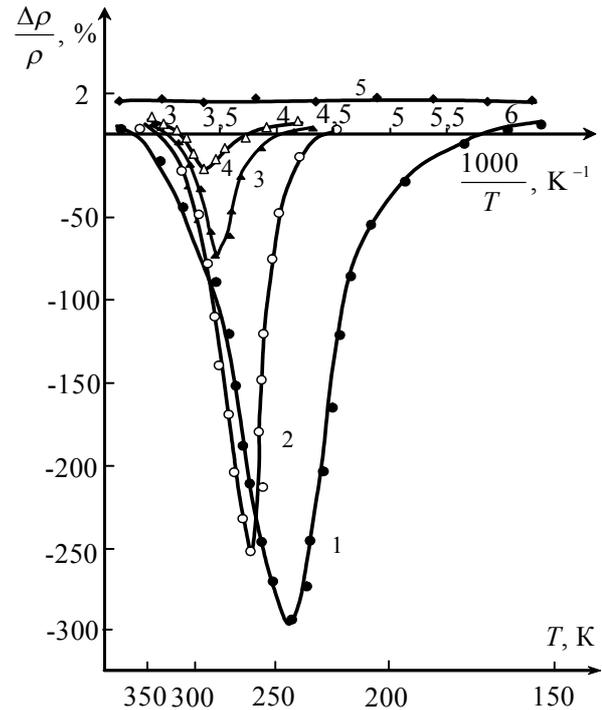
$$\frac{\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\text{тем}} - \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\text{освещ}}}{10 \text{ Лк}} = \frac{300\%}{10 \text{ Лк}} = 30 \frac{\%}{\text{Лк}}.$$

Во-вторых, при освещении температура при которой наблюдается максимальное ОМС смещается в сторону более высоких температур (крив. 2, 3,4).



- 1)  $F=E_V+0,3$  эВ, 2)  $F=E_V+0,38$  эВ,  
3)  $F=E_V+0,42$  эВ, 4)  $F=E_V+0,44$  эВ.

**Рис. 4а.** Зависимость МС от интенсивности освещения в образцах р-типа  $\text{Si}\langle\text{B,Mn}\rangle$  с различным положением уровня Ферми при  $E=100$  В/см и  $T=300$  К.



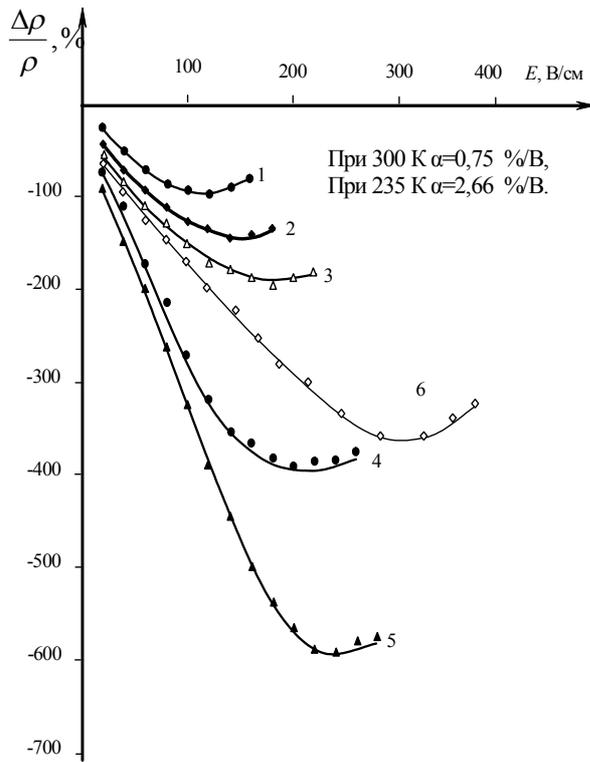
- 1) темновая; 2)  $I=10$  Лк; 3) 40 Лк;  
4) 80 Лк; 5) 160 Лк

**Рис. 4б.** Зависимость МС от температуры в образцах  $\text{S}\langle\text{B,Mn}\rangle$  с  $F=E_V+0,38$  эВ при  $E=100$  В/см,  $B=2$  Тл.

В-третьих, освещение существенно сужает температурную область существования ОМС. С ростом интенсивности освещения, температурная область существования ОМС сужается еще больше, а при  $I=160$  Лк ОМС практически исчезает, т.е. наблюдается только ПМС (рис. 4б, крив. 5). При освещении интегральным светом  $I \geq 200$  люкс, ОМС переходит в ПМС. Здесь также следует выделить очень интересный эффект – возможность инверсии знака МС при освещении, т.е. освещение приводит к фазовому переходу.

Такие исследования позволяют с одной стороны выяснить механизм гашения ОМС светом, а с другой стороны, раскрыть функциональные возможности таких материалов.

Было исследовано ОМС в образцах с положением уровня Ферми  $F=E_V+0,385$  эВ от электрического поля при различных температурах (Рис.5). Результаты показывают, что с ростом электрического поля при всех температурах значение ОМС линейно увеличивается, при дальнейшем увеличении электрического поля линейное увеличение значения ОМС ослабляется и достигает своего максимального значения при ( $E_m$ ), затем оно медленно уменьшается. Как видно из рисунка при понижении температуры



1- $T=300$  К, 2- $T=283$  К, 3- $T=270$  К,  
4- $T=262$  К, 5- $T=235$  К, 6- $T=220$  К

**Рис. 5. Зависимость МС от электрического поля в образцах  $p$ -Si<B,Mn> с положением уровня Ферми  $F=E_V+0,385$  эВ,  $B=2$  Тл, при различных температурах:**

область линейного увеличения значения ОМС расширяется и ( $E_m$ ) наблюдаемые максимальные значения ОМС смещаются в сторону больших значений электрического поля, а при температуре  $T=235$  К,  $E_m=240$  В, имеется максимальное значение ОМС ( $\frac{\Delta\rho}{\rho} \sim 600\%$ ).

При дальнейшем понижении температуры  $T < 235$  К значение ОМС уменьшается, но при этом сохраняется внешней вид зависимости с ростом электрического поля.

Таким образом полученные результаты исследования показывают еще один способ управления значением ОМС, а также тепло-электро-магнитный эффект, который практически отсутствует в других магнитных полупроводниках. Эти эффекты также подтверждают, что кремний с нанокластерами обладает многофункциональными возможностями.

Обнаруженные крайне интересные эффекты гашения ОМС и инверсии знака МС управляемые интенсивностью освещения при комнатной температуре, открывают новое и перспективное направление в приборостроении - разработку и создание принципиально новых классов датчиков освещения и магнитных датчиков с параметрами управляемыми при помощи освещения.

В пятой главе «Эффект ИК-гашения отрицательного магнитосопротивления в кремнии» приводятся результаты исследования спектральной зависимости ОМС в образцах  $p$ -Si<B,Mn> с магнитными нанокластерами атомов марганца при воздействии ИК - излучения при различных магнитных, электрических полях и температуры, а также мощности ИК- излучения.

Исследовалось ОМС в образцах кремния с нанокластерами атомов марганца в зависимости от длины волны падающего света  $\lambda=1,2\div 4$  мкм, мощность излучения  $5\cdot 10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup>, при комнатной температуре при наличии магнитного поля  $B=0\div 1,7$  Тл.

Была создана специальная установка на основе ИКС-21, позволяющая варьировать электрические и магнитные поля, температуру, а также длину волны ИК излучения и его мощность.

Относительное изменение ОМС образцов вычисленное на основе выражения  $\left[ \left( \frac{\Delta\rho}{\rho} \right)_{mem} / \left( \frac{\Delta\rho}{\rho} \right)_{hv} \right]$  (где  $\left( \frac{\Delta\rho}{\rho} \right)_{hv}$  - ОМС при освещении образцов

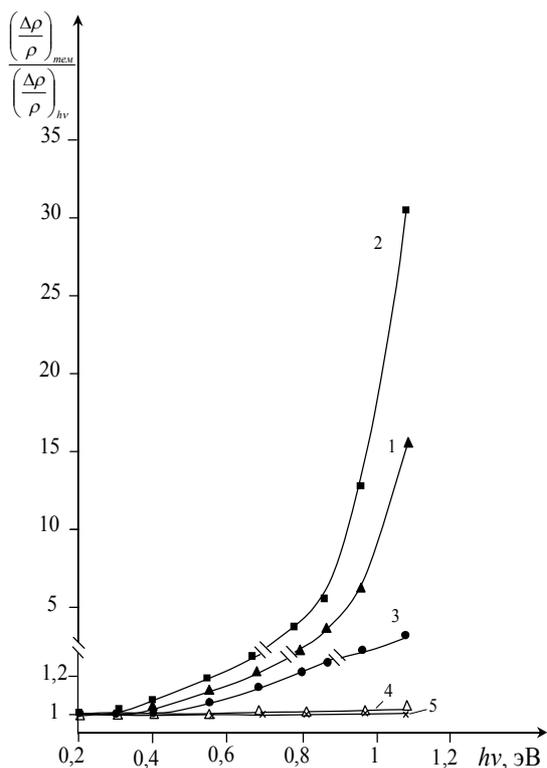
ИК светом с энергией  $h\nu$ , а  $\left( \frac{\Delta\rho}{\rho} \right)_{mem}$  - ОМС образцов, когда ИК излучение отсутствует при аналогических условиях эксперимента) в зависимости от энергии падающих фотонов ИК излучения представлено на рис.6а.

Как показали результаты исследования, начинается ответ с  $h\nu=0,3$  эВ (4 мкм) в образцах с  $F=E_V+0,385$  эВ, имеет место уменьшение значения ОМС. С ростом энергии фотонов падающего света уменьшение ОМС усиливается и достигает своего максимального значения при  $h\nu=1$  эВ, т.е. в исследуемой области обнаружен аномально высокий эффект гашения ОМС ИК- светом при комнатной температуре при  $h\nu=1$  эВ, значение ОМС уменьшается более чем в 30 раз.

Таким образом эти результаты показывают возможность управления в достаточно широком интервале значением ОМС в зависимости от длины волны ИК- света  $\lambda=1,2\div 4$  мкм. Полученные результаты с одной стороны показывают уникальные функциональные возможности магнитных свойств кремния с нанокластерами атомов марганца, а с другой стороны открывают новое научное направление в области разработки принципиально новых фотомагнитных приборов и ИК – спинтроники

В результате исследования установлено, что эффект гашения ОМС ИК светом наблюдается во всех образцах кремния  $p$ - типа с нанокластерами атомов марганца. Но при этом следует отметить, что степень гашения существенно зависит от положения уровня Ферми в образцах т.е. от удельного сопротивления образцов. Как видно, максимальное гашение ОМС имеет место в образцах с  $F=E_V+0,375$  эВ. Со смещением уровня Ферми от  $F=E_V+0,375$  эВ в сторону середины запрещенной зоны кратность гашения уменьшается. В образцах с уровнем Ферми  $F>E_V+0,48$  эВ, а также в перекомпенсированных образцах эффект гашения ОМС не наблюдается.

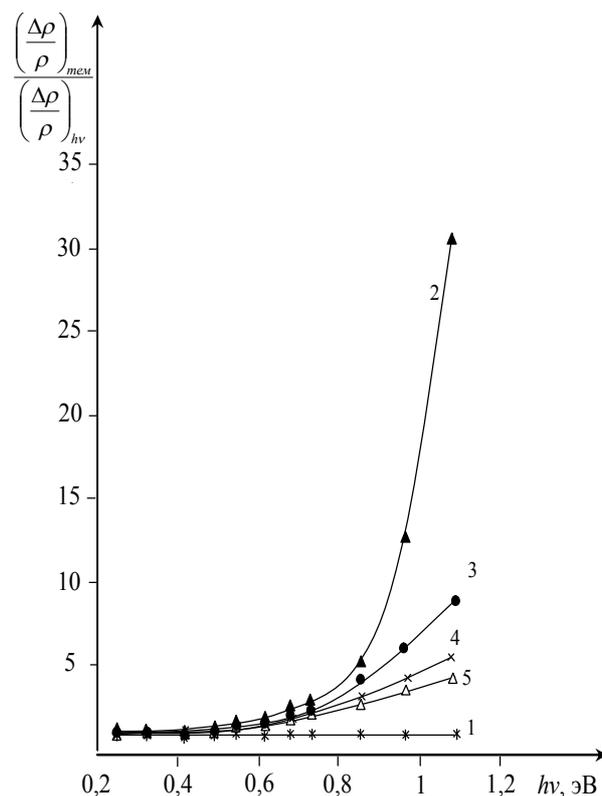
На рис.6б. представлена зависимость ОМС от электрического поля при различных значениях энергии фотонов, для образцов  $p$ -Si<B, Mn> с  $F=E_V+0,37$ .



- 1)  $F=E_V+0,35$  эВ, 2)  $F=E_V+0,37$  эВ,  
 3)  $F=E_V+0,44$  эВ, 4)  $F=E_V+0,48$  эВ,  
 5)  $F=E_C - 0,44$  эВ.

**Рис.6а.** Спектральная зависимость кратности уменьшения ОМС под действием ИК-света в образцах Si<B,Mn> с различным положением уровня Ферми при  $E=20$  В/см,  $V=1,7$  Тл,  $T=300$  К.

Результаты исследования показали, что влияние ИК-излучения на ОМС в исследуемых образцах существенно зависит от значения приложенного электрического поля. При этом установлено, что в области низких электрических полей  $E=1\div 20$  В/см, электрическое поле усиливает влияние ИК-света на ОМС, т.е. при этом эффект гашения усиливается и достигает своего максимального значения при  $E=20\div 25$  В/см. Можно сказать, что электрическое поле стимулирует ИК-гашение ОМС. При дальнейшем росте электрического поля наблюдается обратный эффект, т.е. с ростом электрического поля влияние ИК-света ослабляется, эффект гашения замедляется, а при  $E\geq 150$  В/см, эффект гашения во всех исследуемых областях спектра исчезает. Таким образом в области высоких электрических полей  $E > 20$  В/см действие электрического поля направлено против действия ИК-излучения и происходит их взаимная полная компенсация при  $E=150$  В/см. Установлено, что аналогичный эффект имеет место во всех образцах  $p$ -типа, но при этом следует отметить, что со смещением уровня Ферми в образцах в сторону середины запрещенной зоны, характер наблюдаемого взаимного воздействия электрического поля и ИК-света остается, но при



- 1) 2 В/см, 2) 20 В/см,  
 3) 50 В/см, 4) 80 В/см, 5) 100 В/см.

**Рис.6б.** Спектральная зависимость кратности уменьшения ОМС под действием ИК-света при различных напряженностях электрического поля.

этом величина стимулирующего значения электрического поля смещается в сторону более низких значений.

Полученные результаты показывают, что магнитные свойства кремния в основном определяются концентрацией магнитных кластеров атомов марганца.

Результаты исследования температурной зависимости ОМС в темноте и при освещении с  $h\nu=0,45$  эВ,  $0,62$  эВ,  $0,85$  эВ представлены на рис. 7. Как видно наличие ИК света приводит к существенному изменению  $\frac{\Delta\rho}{\rho}(T)$ . Эти

изменения в основном состоят из следующих моментов. Первый – значение температуры ( $T_{\max}$ ) при которой наблюдается максимальное ОМС сдвигается в сторону более высоких температур. Чем больше энергия фотонов падающего света, тем больше температурный сдвиг. Второе - значение ОМС при ( $T_{\max}$ ) также существенно уменьшается. Например: при  $h\nu=0,85$  эВ  $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\max}$  уменьшается от 300 % до 25 % т.е. 12 раз. В третье - это очень

интересный эффект существенного сужения температурной области существования ОМС с увеличением энергии падающих фотонов.

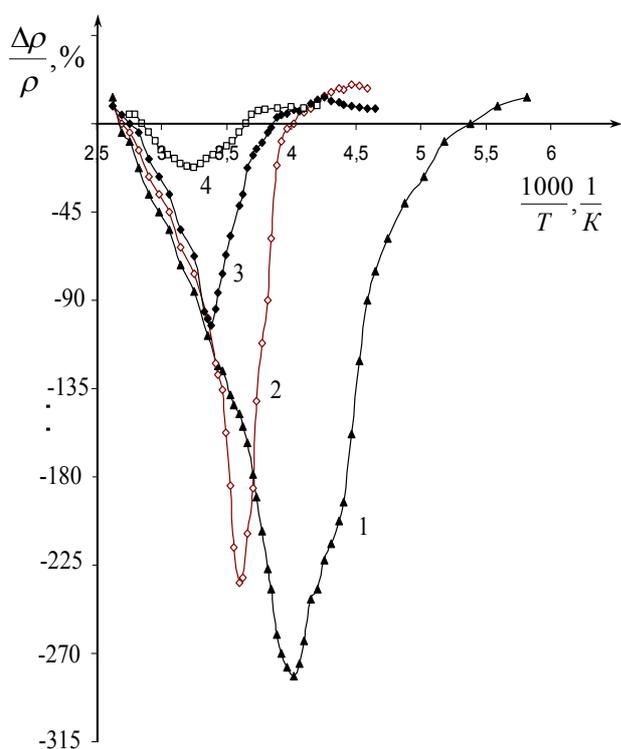
При этом следует отметить, что эти сужения происходят в основном за счет смещения нижней границы температуры. А инверсия знака при более высоких температурах существенно не зависит от ИК излучения.

На рис 8. представлена зависимость ОМС от мощности ИК излучения в образцах Si<В,Мn> с положением уровня Ферми  $F=E_V+0,37$  эВ, при различных длинах волн ( $\lambda$ ). Как видно из рисунка с увеличением интенсивности ИК- излучения значение ОМС уменьшается. Например при энергии фотонов  $h\nu=1,08$  эВ, ответ на ИК- излучение начинается при  $P=0,03$  мВт. Значение ОМС уменьшается в 7 раз с увеличением мощности ИК-излучения до  $P=1,4$  мВт. Результаты показывают, что ответ ОМС на ИК-излучение смещается в сторону большей мощности излучения с уменьшением энергии фотонов падающего ИК- излучения. Например при  $h\nu=0,5$  эВ ответ на ИК- излучение начинается с  $0,4$  мВт.

Эти данные открывают ещё одну функциональную возможность кремния с нанокластерами атомов марганца, т.е. возможность существенного управления магнитными свойствами материала с помощью мощности ИК света.

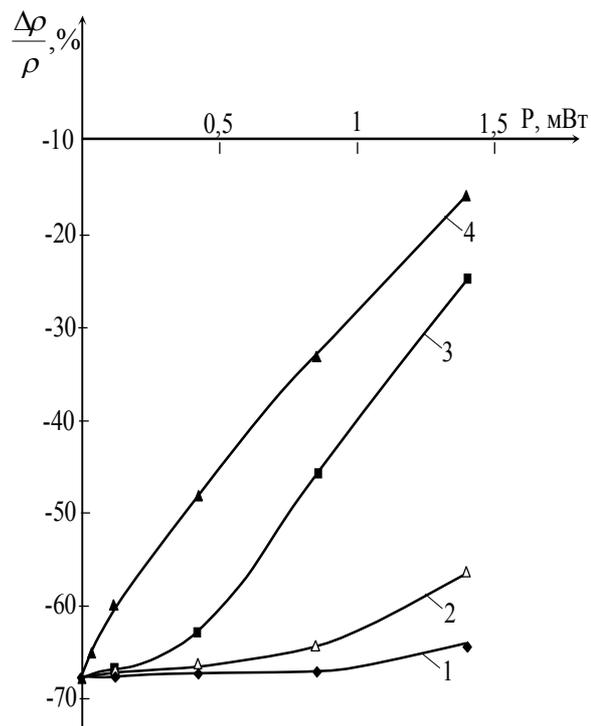
Воздействуя ИК излучением на образцы можно не только уменьшить значение ОМС более чем в 30 раз в зависимости от длины волны, но и при более высоких мощностях ИК излучения наблюдать инверсию знака МС, т.е. переход МС от ОМС к ПМС. Таким образом, выбирая оптимальные значения длины волны ИК света и электрического поля, можно целенаправленно управлять магнитными свойствами таких материалов В этом плане кремний с нанокластерами атомов марганца является уникальным объектом для создания не только нового класса более чувствительных фотоманитных

приборов работающих в ИК- области, но также позволяет развить новое научное направление ИК – спинтронику.



1) темновая, 2) 0,45 эВ,  
3) 0,62 эВ, 4) 0,85 эВ

**Рис. 7.** Зависимость магнито-сопротивления от температуры в образцах  $p\text{-Si}\langle\text{B, Mn}\rangle$  с  $F=E_V+0,37$  эВ при различных энергиях фотонов ИК- света,  $B=1,7$  Тл.



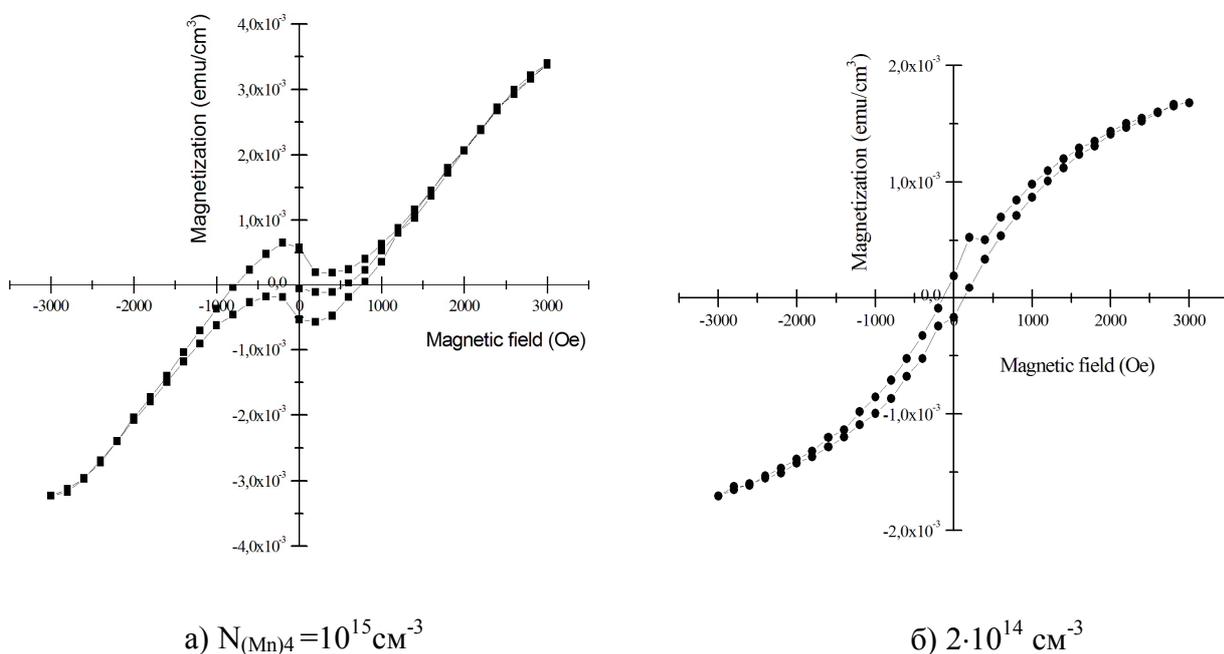
1)  $h\nu=0,5$  эВ; 2)  $h\nu=0,62$  эВ;  
3)  $h\nu=0,85$  эВ; 4)  $h\nu=1,08$  эВ

**Рис.8.** Зависимости МС от интенсивности монохроматического излучения в бразцах кремния при различных энергиях фотонов в  $E=100$  В/см при  $B=1,7$  Тл ,  $T=300$  К.

В шестой главе «Ферромагнитное состояние кремния и использование функциональных возможностей кремния с магнитными нанокластерами атомов марганца при разработке принципиально новых приборов» рассмотрено исследование ферромагнитного состояния кремния  $p$ -типа легированного марганцем. Ферромагнитное состояние наблюдается в образцах кремния с максимальной концентрацией магнитных кластеров ( $N\sim 10^{15}$  см<sup>-3</sup>) в области низких температур до  $T=30$  К.

Намагниченность таких образцов в области низких температур исследовалась на установке СКВИД – магнетометр. Результаты исследования зависимости намагниченности от магнитного поля в образцах кремния с различной концентрацией нанокластеров атомов марганца представлены на рис.9. при температуре  $T=30$  К. Как видно из рисунка в области низких температур ( $T\leq 30$  К) в образцах, где наблюдается максимальное значение ОМС при  $T=300$  К, в зависимости намагниченности от магнитного поля имеет гистерезисный характер, свидетельствующий о ферромагнитном состоянии кремния с нанокластерами (рис.9а). С уменьшением концентрации

нанокластеров гистерезисный характер зависимости намагниченности от магнитного поля  $H$  ослабляется (рис.9б.).



**Рис.9. Зависимость намагниченности кремния с различной концентрацией нанокластеров атомов марганца от магнитного поля (гистерезис).  $T=30 \text{ K}$**

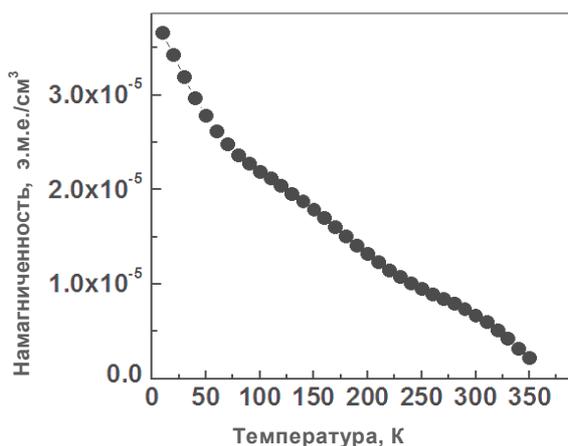
Однако в образцах  $n\text{-Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  не были обнаружены такие явления. Установлено, что ферромагнитное состояние кремния с нанокластерами атомов марганца с ростом температуры ослабляется, а при  $T \sim 40 \div 50 \text{ K}$  практически исчезает. На основе экспериментальных данных нами был рассчитан магнитный момент нанокластера, значение которого равно  $\mu = 800 \mu_B$ .

Экспериментально показано, что с ростом температуры температурная зависимость намагниченности образцов кремния с магнитными нанокластерами  $(\text{Mn})_4$  практически линейно уменьшается (рис.10).

Полученные экспериментальные результаты показывают, что формирование магнитных нанокластеров атомов марганца существенно влияет на магнитные свойства кремния.

Управляя концентрацией таких кластеров в области  $T=230 \div 330 \text{ K}$  можно обнаружить аномально высокое ОМС. В области низких температур  $T < 40 \text{ K}$  кремний с магнитными нанокластерами переходит в новое фазовое состояние, т.е. в ферромагнитное состояние.

Обнаруженный эффект ферромагнетизма в  $p\text{-Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  в области температур  $T < 40$  может быть объяснен переориентацией спинов  $\left(S = 4 \cdot \frac{5}{2} = 10\right)$  магнитных нанокластеров  $(\text{Mn})_4$ , обладающих существенным магнитным моментом.



**Рис.10. Температурная зависимость намагниченности кремния с магнитными нанокластерами (Mn)<sub>4</sub>.**

высокочувствительных магнитодатчиков, фотомагнитных приборов, а также приборов спинтроники.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований управления магнитными свойствами кремния с магнитными нанокластерами в зависимости от их концентрации и электрических параметров в широком интервале температур при различных внешних воздействиях сделаны следующие выводы:

1. Определен оптимальный способ получения кремния с магнитными нанокластерами, как материала наноэлектроники и спинтроники с наноразмерными структурами, обладающего новыми уникальными физическими свойствами.

2. Установлены размеры магнитных нанокластеров атомов марганца в кристаллической решетке кремния и показана возможность изменения их размера от 0,7 до 1,4 нм.

3. В кремнии с магнитными нанокластерами атомов марганца, при концентрации нанокластеров  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  и при комнатной температуре обнаружено высокое отрицательное магнитосопротивление ( $\frac{\Delta\rho}{\rho} \geq 300\%$ ).

4. Показана возможность управления величиной отрицательного магнитосопротивления до 100 раз с изменением интенсивности интегрального света (0÷20 Лк).

5. Установлены зависимость отрицательного магнитосопротивления от длины волны инфракрасного света, температуры и напряжённости электрического поля.

6. Обнаружено ферромагнитное состояние в кремнии с концентрацией нанокластеров марганца более  $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  в области низких температур ( $T \leq 30 \text{ К}$ ).

7. Определены области существования отрицательного

В настоящее время нами разработана технология легирования кремния марганцем, позволяющая получить кремний с концентрацией магнитных нанокластеров до  $N=10^{16} \div 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , что позволяет не только увеличить значение ОМС при комнатной температуре, но и также расширяет температурную область существования ферромагнитного состояния.

Результаты исследования показывают, что на основе таких материалов можно создать принципиально новый класс

магнитосопротивления в зависимости от положения уровня Ферми в пределах 120÷370 К температур.

8. Предложен физический механизм эффекта высокотемпературного отрицательного магнитосопротивления в кремнии с магнитными нанокластерами, обусловленный участием в проводимости локализованных носителей заряда при воздействии внешнего электрического и магнитного поля.

9. Обнаружено максимальное значение отрицательного магнитосопротивления 35 % в перекомпенсированном кремнии n- типа легированного марганцем Si<B,Mn> в области 120÷190 К температур.

10. Показана на основе кремния с магнитными нанокластерами атомов марганца возможность создания высокочувствительных магнитных, фотомагнитных, температурных и многофункциональных датчиков работающих в интервале температур от 200 до 360 К.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 ON AWARD OF  
SCIENTIFIC DEGREE OF DOCTOR OF SCIENCES AT THE PHYSICAL  
AND TECHNICAL INSTITUTE, INSTITUTE OF ION-PLASMA AND  
LASER TECHNOLOGIES, SAMARKAND STATE UNIVERSITY**

---

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

**MAVLONOV GIYOSIDDIN KHAYDAROVICH**

**CONTROL OF THE MAGNETIC PROPERTIES OF SILICON  
WITH NANOCCLUSERS OF IMPURITY ATOMS**

**01.04.10 – Physics of Semiconductors**

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

**TASHKENT – 2018**

**The theme of dissertation of doctor of sciences (DSc) on physical and mathematics Sciences registered at the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number. B2017.1.DSc/FM79**

The dissertation has been prepared in Tashkent state technical university named after Islam Karimov

Abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of the fti.uz and information and educational portal "ZiyoNet" at www.ziyo.net.uz.

**Scientific consultant:** **Iliyev Xolmurat Midjidovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Official opponents:** **Rembeza Stanislav Ivanovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Zaynobiddinov Sirojiddin**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Kasimov Abdugappor Kokharovich**  
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Dosent

**Leading organization:** **Tashkent University information Technoljji**

The defence of the dissertation will be held on "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2018, at \_\_\_ at the meeting of the Scientific Council number Dsc.27.06.2017.FM/T.34.01 at the Physical and Technical Institute, Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Samarkand State University (Address: 2B Bodomzor yuli str., 100084 Tashkent. Tel./Fax: (+99871) 235-42-91, e-mail: info.fti@uzsci.net).

The dissertation can be looked through in the Information Resource Centre of the Physical and Technical Institute (registered under No \_\_\_\_). Address: 2B Bodomzor yuli str., 100084 Tashkent. Tel.: (+99871) 235-42-91.

The abstract of dissertation was distributed on "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2018  
(Registry record No \_\_\_\_ dated "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2018)

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

**A. V. Karimov**  
Scientific secretary of scientific council  
on award of scientific degrees,  
D.F.-M.S., professor

**I. G. Atabaev**  
Chairman of scientific Seminar under Scientific  
Council on award of scientific degrees,  
D.F.-M.S., professor

## INTRODUCTION (abstract of DSc thesis)

**The urgency and relevance of the dissertation topic.** Currently around the world a very important task is to develop ways to control magnetic properties of semiconductor materials, the solution of which is necessary for the development of such important current research areas like spintronics, photomagnetic and magnitooptika.

Yet completely failed to disclose and use all the functionality of magnetic semiconductors. Therefore, at present there is a wide range of experimental and theoretical research in this area. Development of technology for new magnetic semiconductors and study of their properties allows us not only to develop the above research areas and discover new physical phenomena associated with magnetic properties of semiconductors, but also significantly expand the application area of magnetic semiconductors in modern electronics, as well as a deeper understanding of the physical processes occurring in them.

Today worldwide have been investigated the magnetic properties of nanostructures, various alloys, and heterostructures. Special scientific and practical interest is the creation and study of magnetic nanoclusters in a silicon crystal matrix, without significant violations of its crystal lattice and phase composition. This is important because on the one hand, the base material - silicon is the basic material of modern electronics, the technology is well developed, and it significantly accelerates the practical application of the obtained results. On the other hand, the creation of magnetic nanoclusters with controllable parameters and a high concentration, allows you to discover new, not yet studied the faces of the magnetic properties of silicon nanostructures and their use in the development and creation of principally new generation of magnetic and photomagnetic devices.

In this research work presents development of a new scientific direction - the study of silicon with magnetic clusters and determination of properties of this material.

Discovered in silicon with magnetic nanoclusters of new physical phenomena such as anomalously large high-temperature negative magnetoresistance, ferromagnetic as silicon, new photomagnetic phenomena, etc.

Also a new technological solution for the control parameters of the nanoclusters.

This dissertation research was to a certain extent is implementation of the tasks stipulated in the Decree of the President of the Republic of Uzbekistan № PP-1442 "On priorities of industry development of Uzbekistan in 2011-2015" from 15 December 2010, as well as other regulatory legal documents adopted in this field.

**According to the research priority areas of development of science and technology of the Republic.** The real work is done in accordance with the priority directions of development of science and technology of the Republic of Uzbekistan III. "Energy, energy and resource conservation, transportation, engineering" the development of modern electronics, microelectronics, Photonics, spintronics, and electronic instrumentation.

**Review of foreign scientific research on the topic of the thesis.** Research

in the study of magnetic properties of materials and development of new devices based on magnetic semiconductors is conducted in the leading scientific centers, institutes and universities, including studies at low temperatures the ferromagnetic properties of semiconductor materials in Quantumonline issledovatelyam Central semiconductor (South Korea). Work on obtaining nanostructures silicon with impurity atoms is engaged in Xinjiang engineering Institute (China), the company "Infineon" produces sensors for measuring a magnetic field based on magnetoresistance. The sensors are a silicon wafer, containing sensitive to the magnetic field of the cell based on the magnetoresistive GMR effect. The German company SICK has been producing and application of magnetotactic.

In Canada, at the Department of physics Dalhousie University engaged in magnetic properties and magnitosoprotivlenie crystal in Al-Pd-Mn-B in the physics Department of Caltech (USA) and Jet Propulsion laboratory of the center for microelectronics technology (California, USA) do experimentally magnetic properties of thin layers of  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ . The group d'etude des Semiconducteurs Montpellierbuy University (France) is a negative magnetoresistance in silicon with the addition of the AlAs-GaAs.

At the Department of physics Kuunpoika national University (Taegu, Korea) are positive and negative magnetoresistance in thin layers.

**The degree of knowledge of the problem.** In recent years quite intensively studied the formation of magnetic nanoclusters of impurity atoms in semiconductors and use of their properties. In the works of authors G. W. Ludwig, H. H. Woodbury and in the works of authors V. I. Fistul, V. M. Kazakov, J. A. Bobrikov, A. V. Ryabtsev, K. P. Abdurakhmanov, S. Zainobidinov, T. C. Kamilov, S. B. Atamuradov, as well as in the works of authors J. Kreissl, W. Gehlhoff, it was shown that silicon, doped with manganese, by slow cooling after diffusion, discovered nanoclusters consisting of 4 atoms of manganese. However, the control rate of cooling did not allow to obtain samples with reproducible parameters and are practically not studied the composition, structure, size, magnetic moment of nanoclusters and Si electrophysical properties of such nanostructures.

The work of T. I. Voronina, T. S. Lagunova, M. P. Mikhailova, K. D. Moiseev, Lipaev A. F., Yakovlev Yu. p. dedicated to the study of the transport properties of heterostructures GaInAsSb/InAs:Mn grown on substrates doped with magnetic Mn impurity with a high concentration ( $p > 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), an anomalous Hall effect and negative magnetoresistance due to the exchange interaction of Mn ions in InAs with high-mobility electrons in the channel heterogenize.

In the work of Kaminski V. e solved the kinetic equation for the density matrix in a quantizing magnetic field with scattering by the deformation potential. Obtained on the basis of this decision the results show that the transverse OMS can be observed in an electron gas with no random potential. This is the result of a consistent account of magnetic quantization.

In the work of the authors A. D. Talantsev, Koplak O. V., Morgunov R. B. discovered the influence of the hole concentration on the ferromagnetism of MnSb clusters in the GaMnSb films. The high concentration of holes leads to tunneling

through the Schottky barrier on the boundary of a cluster in the crystal lattice and the change in the magnetization of clusters. Microwave resistance of the films depends on the spin polarization of the holes controlled by the magnetization of the clusters and an external magnetic field.

**The relationship of the dissertation research plans of research works of higher educational institution where the dissertation.** The thesis work was performed at the Department "electronics and microelectronics" TSTU according to the program of state grants: F2-47 "the Study of the physical foundations of formation of a ferromagnetic state silicon with magnetic clusters" (2012-2016), F2-44 "to study the mechanism of self-organization of impurity atoms in semiconductors and control of their parameters" (2012-2016) as well as current grant F2-55 "Development of scientific bases of obtaining silicon obenangegebene on the basis of the formation of nanoclusters of impurity atoms as a new class of nanomaterials with unique functionality" (2017-2020).

**The aim of the study** is control of the magnetic properties of silicon with magnetic nanoclusters depending on their concentration and electrical parameters in a wide range of temperatures under different external effects.

In accordance with the intended purpose it was necessary to solve following **tasks:**

to develop a method of producing a magnetic nanostructured material due to the formation of magnetic nanoclusters of manganese atoms in the lattice of silicon using low-temperature gradual diffusion alloying.

to determine the optimal electrical parameters of the samples allowing to obtain high negative magnetoresistance at room temperature.

to explore the possibilities of control of magnetoresistance in silicon with magnetic nanoclusters in a wide range of temperature, electric and magnetic fields.

to explore the management features of magnetoresistance in silicon with magnetic nanoclusters depending on the concentration of the nanoclusters.

explore the features of the photomagnetic properties of silicon with magnetic nanoclusters as background illumination, and when illuminated in the IR region of the spectrum.

to explore the negative magnetoresistance with simultaneous application of various external influences (temperature, electric field and lighting).

to substantiate scientifically and to show the possibility of obtaining a ferromagnetic silicon by forming it of a magnetic cluster.

to determine on the basis of experimental results, the magnetic moment of the nanoclusters, and magnetic susceptibility and magnetization of the material containing these nanoclusters.

**The object of the study** is monocrystalline silicon brand KDB - 2, 3, 5, 10, 100. As impurities were chosen manganese, which is paramagnetism atom which has electronic structure  $3d^5 4s^2$  with spin  $S = \frac{5}{2}$ .

**The subject of the study** is miniconnector-tonirovannogo offset (p-Si<B,Mn>) and precommissioning silicon (n-Si<B,Mn>) with a specific resistance of  $\rho=10^2\div 10^5 \Omega\cdot\text{cm}$ , to establish the regularities of management MS materials

depending on the electrical parameters of the samples.

**Research methods.** Modern methods of electron paramagnetic resonance and atomic force microscopy, and x-ray analysis investigated the state of the manganese atoms in the lattice of silicon.

The photomagnetic properties of samples were studied on a specially designed setup based on infrared spectrometer (IKS-21) and an electromagnet, which allows to vary the electric and magnetic field, temperature, and wavelength of IR radiation and its power.

The ferromagnetic state of these samples at low temperatures was studied on the installation of SQUID (superconducting quantum interference sensor) – magnetometer.

**Scientific novelty of research** consists in the following:

developed optimal low-temperature phased method of diffusion allows the formation of nanoclusters of manganese atoms with magnetic properties throughout the volume of the lattice silicon with a controlled distribution and parameters.

the proposed method of increasing the thermal stability parameters of silicon doped with atoms of manganese at high temperatures due to the formation of nanoclusters of manganese atoms;

a high negative magnetoresistance  $\frac{\Delta\rho}{\rho} \geq 300\%$  in silicon at room temperature

due to the increase in the concentration of magnetic nanoclusters of manganese atoms to  $N=10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ;

determined a linear increase of the negative magnetoresistance in silicon with magnetic nanoclusters of manganese atoms with the increase of the magnetic field;

defined damping of the negative magnetoresistance in silicon nanoclusters under the influence of the integral and infrared light to reduce the negative magnetoresistance up to 100 times due to the degradation of the nanoclusters having a strong magnetic moment and repeated the charge state  $[(\text{Mn})_4^{+n} \text{B}^-]^{+(n-1)}$ , while the impact of integrated infrared lighting;

a transition in the ferromagnetic state of silicon at low temperatures ( $T \leq 30$  K), due to the streamlining of the orientation of the magnetic spins of  $(S_{(\text{Mn})_4} = 4 \cdot \frac{5}{2} = 10)$  the cluster (Mn)<sub>4</sub>, having a magnetic moment;

the calculation of the magnetic moment of nanoclusters of manganese atoms

by using the expression  $\chi_{Mn} = \frac{N\mu^2}{3kT}$  using the values of magnetization of silicon

( $\chi_{Mn}$ ) determined from experimental results at low temperatures ( $T=10$  K);

identified a linear decrease in the magnetization of silicon with increasing temperature due to the disordering of the spins of nanoclusters with an increase in (kT) of energy.

a possibility of controlling the magnitude of the negative magnetoresistance

of 600 % at T=240 K in a wide range of electrical (0,1÷600 V/cm) and magnetic (0,2÷2 T) fields.

**The practical results of the study** are as follows:

The developed technology of obtaining silicon nanostructures of the manganese atoms in the entire volume of the crystal.

determined that the magnitude of the high-temperature negative magnetoresistance with external influences (temperature, illumination, electric field) allows you to create a new class of multifunctional sensors of physical quantities.

the possibility of obtaining a ferromagnetic silicon, based on silicon with magnetic nanoclusters.

the developed design multifunctional sensor of physical quantities based on silicon with magnetic nanoclusters.

**The accuracy of research results** confirmed by the application of modern scientific methods and technologies. The obtained results are explained based on physical notions based on theoretical and experimental data. Data reliability is ensured by using multiple, independent methods of measurements and data processing, as well as proven mechanisms of semiconductor physics.

**Scientific and practical significance of research results.**

The scientific significance of the results of the study is to explain the physical mechanisms of formation of magnetic nanoclusters of manganese atoms in the lattice of silicon, the physical justification of the observed effect of high temperature abnormally high OMS, proof of the ability to control its size through external influences, and also to study the properties of silicon with magnetic nanoclusters as a new class of photomagnetic materials.

The practical significance of research results is that on the basis of silicon nanoclusters of manganese atoms it is possible to develop a highly sensitive magnetic and photomagnetic devices, multifunctional sensors of physical quantities and to obtain ferromagnetic silicon.

**Implementation of research results.** Based on the results of study of thermal stability of the electrophysical parameters, magnetic and photomagnetic properties of these materials, as well as the opening ferromagnetic state of silicon nanoclusters of manganese atoms:

the results were used to obtain nanostructures of silicon with a low activation energies of impurities with low temperature and gradual diffusion models. As a result, in the active phase of silicon carbide was conducted by diffusion of impurity atoms of boron and aluminum in the framework of the grant No. derivatives F3-FA-0-56434 on "Physical regularities of formation of thin-film structures and structures with nano-inclusions for solar cells and semiconductor devices" (reference FTA-02-11/940 from the Agency for science and technology of the Republic of Uzbekistan from October 24, 2017).

used the results obtained in this research work will significantly improve the technology of manufacturing high-voltage high frequency diodes (high frequency and high voltage diodes) and stability to external influences (temperature and  $\gamma$  - irradiation), JSC "Foton" (certificate number 02. 2074., 06.10. 2017 AK

Uzeltehsanoat);

the theoretical results of the thesis were used in processing the experimental data in the work performed at the Institute of solar energy of the Academy of Sciences of Turkmenistan in the framework of the international grant "Development and production of fundamentally new solar cells with broad spectral sensitivity (0.1-3  $\mu\text{m}$ ) based on silicon with nedovarennye structures" (reference No. 162/17 from the Institute of solar energy of the Academy of Sciences of Turkmenistan from 09 Nov 2017).

used the manufacture of magnetotactic for measuring a magnetic field based on silicon with clusters of impurity atoms of manganese (implementation ACT AK Uzeltehsanoat., II - quarter 2017)

used the manufacture of the batch of devices based on new material silicon with magnetic nanoclusters of impurity atoms of manganese (implementation ACT AK Uzeltehsanoat., II - quarter 2017)

**Approbation of the research results.** The main results were presented and discussed at the 8th international and Republican scientific conferences.

**Publication of research results.** On materials of thesis published 33 scientific works, including 2 monographs, 13 articles in journals recommended by the Higher attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of basic scientific results of dissertations.

**Structure and scope of the thesis.** The thesis consists of introduction, six chapters, conclusion and list of references. The work contains 198 pages of typescript, including 89 figures and 8 tables.

**ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙЎХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I бўлим (1 часть; part 1)**

1. Бахадирханов М.К., Илиев Х.М., Мавлонов Г.Х., Аюпов К.С., Тачилин С.А. Управление магнитными свойствами кремния с нанокластерами примесных атомов // Монография. «ТашГТУ» 2017, с.188.

2. Бахадирханов М.К., Илиев Х.М., Аюпов К.С., Тачилин С.А. Саттаров О.Э., Мавлонов Г.Х. Кремний с магнитными кластерами // Монография. «ТашГТУ» 2014, с.160.

3. Bakhadyrkhanov M.K., Mavlonov G.Kh., Iliyev Kh.M. Influence of Infrared Radiation on the Magnetic Properties of Silicon with Nanoclusters of Manganese Atoms // Nanoscience and Nanotechnology 2017, Volume 7, Number 1, P. 1-3. (№12 Index Copernicus, №35 cross ref, Impact Factor 0,4).

4. Илиев Х.М., Сатаров О.Э. Мавлонов Г.Х. О термостабильности кластеров атомов марганца в кремнии // Доклады АН РУз. Ташкент, 2017. № 1.– С. 13-16. (01.00.00., № 7)

5. Аюпов К.С., Бахадирханов М.К., Илиев Х.М., Мавлонов Г.Х., Тачилин С.А. Многофункциональный датчик физических величин на основе кремния с наноструктурами атомов марганца // Приборы, 2017. №4, С.7-10. (05.00.00., № 63).

6. Мавлонов Г.Х. Управление магнитосопротивлением в кремнии с магнитными нанокластерами атомов марганца под действием инфракрасного освещения // Узбекистон физика журнали 2017 г. Т.19, №5. С. 61-65. (01.00.00., № 6).

7. Мавлонов Г.Х. Магнитный момент нанокластеров атомов марганца в решетке кремния // Узбекистон физика журнали 2016 г. Т.18, №2. С. 95-99. (01.00.00., № 6).

8. Мавлонов Г.Х. Особенности ферромагнитного состояния кремния с магнитными нанокластерами атомов марганца // Доклады АН РУз. – Ташкент, 2015. № 5. С. 26-29. (01.00.00., № 7).

9. Мавлонов Г.Х. Исследование аномального эффекта холла в кремнии с магнитными кластерами атомов марганца // ТДТУ хабарлари. Тошкент 2015г. №3, С. 85-89. (05.00.00., № 15).

10. Bakhadyrkhanov M.K., Mavlonov G.H., Iliyev X.M., Ayupov K.S. Specific Features of Magnetoresistance in Overcompensated Manganese-Doped Silicon // Semiconductors, 2014, Vol. 48, No. 8, pp. 986-988. (№11 Springer, Impact Factor 0,602).

11. Bakhadyrkhanov M.K., Mavlonov G.Kh., and Iliyev Kh.M. Control of the Magnetic Properties of Silicon with Manganese Atom Nanoclusters // Technical Physics, 2014, Vol. 59, No. 10, pp. 1556-1558. (№11 Springer, Impact Factor 0,6).

12. Бахадирханов М.К., Мавлонов Г.Х., Илиев Х.М. Угловая зависимость магнетосопротивления в кремния при наличии нанокластеров

атомов марганца // Узбекистон физика журнали т.16, №1. 2014 г. С. 46-50. (01.00.00., № 6)

13. Бахадирханов М.К., Мавлонов Г.Х., Илиев Х.М. Особенности магнитных свойств кремния с магнитными нанокластерами // ТДТУ хабарлари. Тошкент 2013 №4, С. 56-60. (05.00.00., № 15).

14. M.K. Bakhadyrkhanov, G.Kh. Mavlonov, S.B. Isamov, Kh.M. Iliev, K.S. Ayupov, Z.M. Saparniyazova, and S.A. Tachilin. Transport Properties of Silicon Doped with Manganese via Low Temperature Diffusion // Inorganic Materials, 2011, Vol. 47, No. 5, pp. 479-483. (№11 Springer, Impact Factor 0,62)

15. Bakhadyrkhanov M.K., Ayupov K.S., Mavlyanov G.Kh., Iliyev Kh.M., and Isamov S.B. Photoconductivity of Silicon with Nanoclusters of Manganese Atoms // Russian Microelectronics, 2010, Vol. 39, No. 6. pp. 401-404. (№11 Springer, Impact Factor 0,29)

### II – бўлим (II – часть)

16. Бахадирханов М.К., Мавлонов Г.Х., Аюпов К.С., Илиев Х.М. Кластеры примесных атомов новое уникальное состояние примесных атомов в полупроводниках // Научно-методические проблемы инженерной физики» Республика илмий техник анжуманлар туплами. Ташкент 2017 г., 8-9 сентября, С.58-61.

17. Бахадирханов М.К., Мавлонов Г.Х. Сатаров О.Э., Аюпов К.С., Зикриллаев Х.Ф. Магнитные свойства кремния, легированного марганцем «Научно-методические проблемы инженерной физики» Республика илмий - техник анжуманлар туплами. Ташкент 2017 г., 8-9 сентября, С.61-63.

18. Бахадирханов М.К., Илиев Х.М., Мавлонов Г.Х. Функциональные возможности кремния с магнитными нанокластерами атомов марганца для разработки // Научно-методические проблемы инженерной физики» Республика илмий - техник анжуманлар туплами. Ташкент 2017 г., 8-9 сентября, С.63-65.

19. Бахадирханов М.К., Мавлонов Г.Х., Исаиов С.Б., Аюпов К.С., Мелибаев Д. Новые фотомагнитные материалы на основе кремния с магнитными нанокластерами атомов марганца // «Наука, техника и инновационные технологии в эпоху могущества и счастья» Материалы Международной научной конференции Ашхабад. 12-13 июня, 2017 г. С. 77-79.

20. Бахадирханов М.К., Илиев Х.М., Мавлонов Г.Х., Азизов М.К. Многофункциональный датчик на основе кремния с нанокластерами марганца // Материалы республиканской научной конференции «неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах» Ташкент. 1-2 февраля 2017 г. С.64-65.

21. Мавлонов Г.Х., Хайитбоев И.А. Использование кремния с магнитными нанокластерами в качестве датчиков магнитного поля // Материалы республиканской научной конференции «неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах» Ташкент. 1-2 февраля 2017 г. С.64-65.

22. Бахадирханов М.К., Илиев Х.М., Аюпов К.С., Мавлонов Г.Г., Хайитбоев И.А. Фотомагнитные свойства кремния с магнитными нанокластерами атомов марганца «Замонавий физиканинг долзарб муаммолари» VII- Илмий-назарий анжуман материаллари. 2017 й. Термиз., 19-20 май. С.12-14.

23. Илиев Х.М., Аюпов К.С., Мавлонов Г.Х., Саттаров О.Э. Курбонова У.Х. Управления магнитными свойствами кремния с магнитными нанокластерами инфракрасном излучением // Современное проблемы физики конденсированного состояния – СПФКС -2016. Тезисы докладов Республиканской научной конференции. Бухара. 12-14 апреля. 2016. с. 138-139.

24. Ayupov K.S., Iliyev Kh.V., Mavlonov G. Magnetic nanoclusters in silicon lattice. OF XII International scientific conference “Solid State physics” 26-28 th April, 2016 Astana., 230-231.

25. Илиев Х.М., Тачилин С.А., Содиков У.Х. Формирование магнитных кластеров атомов гадолия в // “Техника ва технологиянинг долзарб муаммолари, уларнинг нерготежамкор ва инновацион ечимлари” Республика илмий-техник анжумани 2016 йил 20-22 апрель Фарғона – 2016. с.8.

26. Bakhadir khanov .M. K., Mavlonov G.X., S.B.Isamov . Physical fundamental of formation of nanoclusters with controllable parameters as a novel way in obtaining the bulk structured semiconductor materials // OF XII International scientific conference “Solid State physics” 26-28 th April, 2016 Astana., 228-230.

27. Аюпов К.С., Илиев Х.М., Мавлонов Г.Х. Магнетосопротивление кремния с нанокластерами атомов марганца при инфракрасном освещении // V Международная конференция актуальные проблемы молекулярной спектроскопии конденсированных сред. Самарканд, 22-24 Сентября 2016 г. С. 96-97.

28. Илиев Х.М., Мавлонов Г.Х., Саттаров О.Э., Бахарырханов М.К., Аюпов К.С. Ферромагнитное состояние кремния с магнитными нанокластерами. VI-международная конференция «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов» Тезисы докладов. МИСиС 26-28 мая 2015 г. МОСКВА. С 131.

29. Бахадырханов М.К., Мавлонов Г.Х., Илиев Х.М. и др. Физические основы формирования нанокластеров примесных атомов в полупроводниках. Международной конференции «Кремний -2014». Иркутск, 7-12 июля. 74-75.

30. Bakhadyrkhanov M. K., Mavlonov G. Kh., and Iliyev Kh. M. Ferromagnetic state of silicon samples with magnetic clusters of manganese atoms. Конденсатланган мухитлар физикаси ва материалшуностликнинг долзарб масалалари. “Республика илмий - техникавий анжумани” Фарғона 2014 й, 14-15 май. С. 35-36.

31. Мавлонов. Г.Х. Магнитные свойства кремния, легированного атомами европия. Ярим ўтказгичлар физикасининг долзарб муаммолари.

“Республика илмий – амалий семенари материаллари” УзМУ, Тошкент 2014 й. 22 декабрь. С. 81-84.

32. Илиев Х.М., Мавлонов Г.Х., Бахадырханов М.К., Аюпов К.С., Хайдаров К. Саттаров О.Э. Фотомагнитные свойства кремния с магнитными кластерами атомов марганца. Материалы III международной конференции по Оптическим и Фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро и наноструктурах. Фергана 14-15 ноября 2014 года, С. 27-28.

33. М.К. Бахадырханов, Г.Х. Мавлонов, С.Б. Исамов. Магнитные кластеры атомов марганца и их влияние на магнитные свойства кремния. 3-Международная научная конференция «Физика и физическое образование: достижения и перспективы развития». Кыргызская Республика. Бишкек, 19-25 август 2011 г. с. 57.

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари  
«Тил ва адабиёт таълими» журнали таҳририясида таҳрирдан ўтказилди.  
(05.12.2017 йил)

Босишга рухсат этилди: 09.02.2018 йил.  
Бичими 60x44 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>, «Times New Roman»  
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.  
Шартли босма табоғи 2,75. Адади: 100. Буюртма: № 40

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»  
авлат унитар корхонасида чоп этилди.

