

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ,  
АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ  
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.31.01.2019.FM./T.03.05  
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ҚОРАҚАЛПОҚ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ  
ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**САПАРНИЯЗОВА ЗЛИХА МАХСЕТБАЕВНА**

**КРЕМНИЙ ПАНЖАРАСИ НУҚСОНЛАРИ БИЛАН НИКЕЛ ВА  
МАРГАНЕЦ АТОМЛАРИ КЛАСТЕРИНИНГ ЎЗARO ТАЪСИРИ**

**01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси**

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

**Тошкент – 2019**

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

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

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

<b>Сапарниязова Злиха Махсетбаевна</b> Кремний панжараси нуқсонлари билан никел ва марганец атомлари кластерининг ўзаро таъсири .....	3
<b>Сапарниязова Злиха Махсетбаевна</b> Взаимодействие кластеров атомов никеля и марганца с дефектами решетки кремния .....	21
<b>Saparniyazova Zlikha Makhsetbayevna</b> Interaction of clusters of nickel and manganese atoms with defects of silicon .....	39
<b>Эълон қилинган ишлар рўйхати</b> Список опубликованных работ List of published works.....	43

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ,  
АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ  
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.31.01.2019.FM./T.03.05  
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ҚОРАҚАЛПОҚ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ  
ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**САПАРНИЯЗОВА ЗЛИХА МАҲСЕТБАЕВНА**

**КРЕМНИЙ ПАНЖАРАСИ НУҚСОНЛАРИ БИЛАН НИКЕЛ ВА  
МАРГАНЕЦ АТОМЛАРИ КЛАСТЕРИНИНГ ЎЗARO ТАЪСИРИ**

**01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси**

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

**Тошкент – 2019**

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида № В2018.3.PhD/FM286 рақам билан рўйхатга олинган.**

Докторлик диссертацияси Қорақалпоқ давлат университети ва Тошкент давлат техника университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида (tdtu.uz) ҳамда «Ziyonet» Ахборот-таълим порталида (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

**Илмий раҳбар:** **Илиев Халмурат Миджидович**  
физика-математика фанлари доктори, профессор

**Расмий оппонентлар:** **Утамурадова Шарифа Бекмурадовна**  
физика-математика фанлари доктори, профессор (ЎЗМУ)

**Расулов Рустам Явкочович**  
физика-математика фанлари доктори, профессор (ФДУ)

**Етақчи ташкилот:** **Ион – плазма ва лазер технологиялари институти**

Диссертация ҳимояси Тошкент давлат техника универтети, Андижон давлат университети ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.31.01.2019.FM/Т.03.05 рақамли Илмий кенгашнинг 2019 йил «\_\_» \_\_\_\_\_ соат \_\_\_\_\_ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100095, Тошкент шаҳри, Университет кўчаси, 2-уй. Тел. (+99871) 246-46-00, факс (+99871) 227-10-32; e-mail: tstu\_info@edu.uz. ТДТУ «Электроника и автоматика» факультети 232-хона).

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

Диссертация автореферати 2019 йил «\_\_» \_\_\_\_\_ да тарқатилди.  
(2019 йил «\_\_» \_\_\_\_\_ даги \_\_\_\_\_ рақамли реестр баённомаси).

**М.К. Бахадирханов**

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

**Б.Э.Эгамбердиев**

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

**Н.Ф.Зиқриллаев**

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

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

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти.** Жаҳонда бугунги кунда ҳажмий наноструктуралашган яримўтказгичли материалларини олиш технологияларини ишлаб чиқиш ва уларнинг хоссаларини тадқиқ қилиш бўйича жадал ишлар олиб борилмоқда. Бу материалларни бир ўлчамли наноструктуралашган материалларга қараганда етарлича юқори функционал имкониятларга эгаллиги, шунингдек тубдан янги оптоэлектрон, фотомагнит асбобларни ва юқори самарадорликка эга бўлган қуёш элементларини яратиш имкониятини берувчи бир қатор янги физик ҳодисалар бундай материалларда кузатилиши билан боғлангандир. Кристалл панжарада янги наноструктурани яратишнинг замонавий истиқболли усулларида бири кристалл панжарада олинган микро ва нанокластерларни яримўтказгичли материал нуқсонлари билан бошқариладиган ўзаро таъсирлашишидир.

Бугунги кунда дунёда ҳароратли ишлов бериш ва радиацион нурланишнинг таъсири, шунингдек бошқа киришма атомларнинг таъсири каби турли хил ташқи таъсирлашишда киришма атомлари нанокластерларининг турғунлигини тадқиқ этишга катта эътибор қаратилмоқда. Мазкур вазифаларни ҳал этиш нафақат киришма атомларининг нанокластерларини шаклланиш механизмининг чуқурроқ тушуниш, балки бундай материалларни ҳар хил янги асбоблар яратишда мазкур материаллар турли хил ташқи таъсирлашишларга учрагани учун муҳим ва долзарб ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантиришнинг Ҳаракатлар стратегиясида белгиланган вазифаларни амалга оширишда илмий ва инновация ютуқларини амалиётга кенг жорий этишнинг самарали механизмларини яратиш масалаларига алоҳида эътибор қаратилмоқда<sup>1</sup>. «Фаол тадбиркорлик, инновацион ғоялар ва технологияларни қўллаб қувватлаш» йилида олинган илмий натижаларни ҳозирги замон талабларига жавоб берадиган даражага олиб чиқиш алоҳида эътиборга сазовордир. Шу билан бир қаторда наноэлектрониканинг муҳим вазифаси турғун параметрли яримўтказгичли асбобларни тайёрлашда ишлатилиши мумкин бўлган ташқи таъсирга чидамли бўлган нанокластерлар (квант нуқталар) га эга бўлган кремнийни олиш ҳисобланади. Бу йўналишда никел ва марганец атомлари нанокластерларининг кремний панжараси нуқсонлари билан ўзаро таъсирлашишини тадқиқ этиш ҳамда радиация нурланиши ва ҳароратли ишлов бериш орқали нанокластер асосида юқори турғунликка эга микроэлектроника ва оптоэлектроника асбобларини яратиш долзарб вазифа ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги ПФ–4947-сон Фармони, 2017 йил 17 февралдаги ПҚ–2789-сон «Фанлар академиясининг фаолиятини, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-

---

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

тадбирлари тўғрисида»ги ҳамда ва 2018 йил 6 августдаги ПҚ-3899-сон «Илмий ва инновацион фаолиятни интеграция қилиш тизими самарадорлигини оширишга доир чора-тадбирлар тўғрисида» ги Қарорлари ва мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

**Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги.** Диссертация иши Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялар ривожланишининг III. «Энергетика, энергия ресурс тежамкорлиги, транспорт, машина ва асбобсозлик» йўналишига мос ҳолда бажарилган.

**Муаммонинг ўрганганилик даражаси.** Сўнги вақтларда наноэлектроника ва нанотехнология соҳасидаги мутахассислар асосий эътиборни киришма атомларининг кластерларини олиш муаммосига, ҳусусан структураси ва таркиби бошқариладиган турли киришмалар асосида бинар кластерларни олиш технологиясига қаратмоқдалар. М.Г.Мильвидский, И.В.Бажин, Ю.А.Астровлар ўзларининг ишларида яримўтказгичларда киришма атомлари кластерларининг ҳолатини ва тақсимланишини ўрганишган. Е.А.Михайлов, А.Т.Косилов, А.А.Таскин, Е.Г.Тишковскийлар нанокластерларнинг атом структураси ва уларнинг турли киришма атомлари билан атомлар аро ўзаро таъсирлашишини тадқиқ қилишган. Т.А.Пагава, А.А.Лебедев, А.П.Долголенколар кремнийда киришма атомларни турли радиацион нуқсонлар билан ўзаро таъсирлашишини тадқиқ қилишган. Кремнийда кадмийни мавжудлигини L.V.Bayou, J.V.Wallace, Y.R.Lin, L.C.Chen, K.Nakai, N.Hrant тадқиқ қилишган. Уларнинг термонуқсонлар билан ўзаро таъсирлашишини Е.А. Климанов, Е.Weber, H.G.Riotte, Zhang Xiangli, Sun Zhaowei томонидан тадқиқ қилинган.

Ўзбекистонда академик А.Т.Мамадалимов томонидан турли киришмалар билан легирланган кремнийнинг фотоўтказувчанлигини ҳароратли сўниши тадқиқ қилинган. Академик Р.А.Мўминов илмий мактабида литий билан легирланган кремний асосида ядро нурланишининг детектори ишлаб чиқилган. Ш.Махкамов, Н.А.Турсунов, К.П.Абдурахмоновларнинг ишларида кремнийли асбобларда радиацион нуқсонларни бошқариш усули ишлаб чиқилган. Академик С.Зайнобиддинов ва Ш.Б.Утамурадова кремнийда марганец ва никелларнинг киришмали микробирикмалар пайдо бўлишини ўрганишган. Академик М.К.Бахадирхановнинг илмий мактабида профессорлар Н.Ф. Зикриллаев ва Х.М. Илиев томонидан кремнийда магнит нанокластерларини шаклланишини илмий жиҳатдан асослаб берилган. К.А.Исмайлов ва С.И.Власовлар МДЯ-структураларидаги физик жараёнларга ташқи омилларнинг таъсирини батафсил тадқиқ қилишган.

**Диссертация мавзусининг диссертация бажарилган олий таълим муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.**

Диссертация Тошкент давлат техника университети илмий тадқиқот режасининг ЁФ-2-06 рақамли «Яримўтказгичларда киришма атомларининг ўз-ўзини ташкил қилиш механизмини ва уларнинг параметрларини бошқаришни

тадқиқ қилиш» (2012–2016 й.) ва ОТ-Ф2-55 «Янги функционал имкониятларга эга наноматериалларнинг янги синфи сифатидаги киришма атомлари нанокластерларининг шаклланиши негизда ҳажмий структуралашган кремний олишнинг илмий асосларини ишлаб чиқиш» (2017–2020 й.) мавзусидаги фундаментал лойиҳалар доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** кремний панжараси нуқсонлари билан никел ва марганец киришма атомлари кластерининг ўзаро таъсирини тадқиқ қилишдан иборат.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

никел киришма атомлари кластерларининг шаклланишига бошланғич киришма атомларнинг тури (кислород, бор ва фосфор) ва концентрациясининг таъсирини аниқлаш;

кремнийда никел ва марганец атомлари кластерларининг шаклланиши ва параметрларига диффузия шароитининг (совутиш тезлиги ва якуний ҳарорат) таъсирини аниқлаш;

кремнийдаги никел атомларининг электр нейтрал ва магнит кластерлар турғунлигига қўшимча термо қиздириш ва  $\gamma$ -нурланишнинг таъсирини аниқлаш;

киришма атомлар кластерларига эга бўлган кремнийнинг электр, фотоэлектр ва магнит хоссаларига  $\gamma$ -нурланишнинг таъсирини аниқлаш;

VI гуруҳ элементларини (S, Se, Te) марганец атомларининг кластерлари билан ўзаро таъсирлашиши ва уларни кремнийнинг фотоэлектр ва магнит хоссаларига таъсирини аниқлаш.

**Тадқиқотнинг объекти** сифатида марганец, никел, олтингугурт селен ва теллур атомлари билан легирланган кислород, бор ва фосфор атомларининг концентрацияси ҳар хил бўлган КДБ ва КЭФ маркали монокристалл кремнийлар олинган.

**Тадқиқотнинг предмети** радиация, термо қиздириш таъсири, шунингдек кремнийда бошқа киришма атомлар мавжуд бўлганда кремний панжарасидаги никел ва марганец атомларининг кластерлари параметри ва хоссаларини бошқаришнинг технологик жараёнларидан иборат.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Кластер шаклланиши, уларнинг структураси, ўлчами ва зичлигини ўзгаришини тадқиқ қилишда микрондда таҳлил (Joel JXA-8800R қурилмаси), ИҚ-микроскопия (ИНФРАМ-И), шунингдек АКМ (Dimension 3000) усулларида фойдаланилган. Никел кластерларини кремний панжарасининг нуқтавий структурали нуқсонлари билан ўзаро таъсирлашишини ўрганишда гальваномагнит тадқиқот Холл эффекти ишлатилган. Марганец атомлари нанокластерларининг олтингугурт ва селен киришмалари билан ўзаро таъсирлашиши фотоўтказувчанликнинг спектрал боғлиқлигини ўрганишда ИКС-21 спектрометридан фойдаланилган. Ферми-Дирак статистикасидан фойдаланган ҳолда назарий ҳисоблашлар асосида кластер шаклланишида иштирок этувчи киришма атомларнинг концентрацияси аниқланган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** куйидагилардан иборат:

кремний панжарасида никел атомлари кластерининг шаклланиш кинетикаси ва уларнинг параметрларига бошланғич саёз киришма атомларнинг (бор ва фосфор) концентрацияси ва тури деярли таъсир қилмаслиги аниқланган;

диффузиядан кейин намуналарни совутиш тезлигини ўзгартириш, шунингдек  $T=600\div 900$  °С соҳада қўшимча қиздириш ҳарорат ва вақтини танлаш орқали кремний панжарасида никел киришма атомлари кластерларининг ҳолати, ўлчами ва концентрациясини бошқариш имконияти кўрсатилган;

$\gamma$ -нурларнинг катта қиймати билан нурлантирилганда ( $\Phi\sim 10^9$  Р) никел атомлари кластерларини жадал парчаланиши юз бериши, бунинг натижасида эса кремний панжараси тугунларида электр фаол бўлган никел атомларининг концентрацияси икки тартибга ошиши ўрнатилган;

$\gamma$ -нурларнинг  $\Phi>10^6$  Р қийматида Mn атомлари кластерларининг парчаланиши юз бериб, Mn атомлари кластерлари ҳосил қилган ғайри оддий фото ва магнит хусусиятлари йўқолиб кетиши аниқланган;

кремний панжарасида VI гуруҳ атомларини (S, Se, Te) мавжуд бўлиши марганец киришма атомлари кластерларини шаклланишига тўсқинлик қилиши, бу эса марганец атомларининг кластерига эга бўлган кремнийнинг электрофизик ва магнит ҳоссаларини сезиларли даражада ўзгаришига олиб келиши аниқланган;

кремний панжарасида марганец атомлари ва VI гуруҳ элементлари иштирокида  $Si_2Mn^- S^{++}$ ,  $Si_2Mn^- Se^{++}$ ,  $Si_2Mn^- Te^{++}$  кўринишида янги турдаги наноструктураларини шаклланиш имконияти кўрсатилган;

кремний панжарасида янги турдаги наоструктураларни шаклланишнинг мақбул термодинамик шароити аниқланган бўлиб, мос равишда олтингугурт ва марганец атомлари учун  $T=1100$  °С ҳароратни, селен ва марганец учун  $T=820$  °С, теллур ва марганец учун  $T=650$  °С бўлиши кўрсатилган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** куйидагилардан иборат:

кремнийда никел киришма атомлари кластерларининг шаклланиш кинетикаси, таркиби ва параметрларни бошқаришнинг мақбул термодинамик шароити ўрнатилган;

нурланиш қиймати  $10^9$  Р бўлган  $\gamma$  - нурланиш билан кремнийни нурлантирилганда никел атомларининг электр фаол концентрациясини икки тартибга ошиши асосида янги асбобларни ишлаб чиқариш имкониятларини кенгайтириш мумкин;

нурланиш қиймати ва ҳароратга боғлиқ равишда марганец ва никел атомлари кластерларининг турғун ҳолати радиацияга чидамли ва ҳароратга турғун электрон асбобларни ишлаб чиқишда ишлатиш мумкин.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** анъанавий, яхши апробацияланган тажриба усулларини қўлланилинганлиги, шунингдек кўп миқдордаги тажриба маълумотлари ва олинган натижаларни такрорланувчанлиги, тажриба натижаларининг физик мушоҳадасини замонавий назарий тасаввурларга мослиги билан асосланади.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Диссертатасиядан олинган натижалар бир томондан аралашмали атомларни

кластерларини шаклланиш физикасини сезиларли кенгайтиради. Бошқа томондан эса янги яримўтказгичли материалларни синфи каби ҳажмий наноструктурали яримўтказгич материалларни параметрини бошқариш билан яратиш имконини кўрсатади.

Олинган натижалар кремний панжарасида микро ва наноўлчамли идеал Шоттки диодларини, идеал параметрли гетероўтишларни ҳамда микро ва нано варизон структураларни яратишда кенг қўлланилади ва улар асосида янги оптоэлектрон асбоблар яратиш имконини беради, шунингдек кремнийни радиацион чидамлилигини  $10^5 \div 5 \cdot 10^7$  Р гамма нурланиши оралиғида ва иссиқликка турғунлигини  $T=600$  °С гача ошириши мумкин.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Кремний кристалл панжарасидаги киришма атом кластерларининг параметрларига, электрофизик, фотомагнит хусусиятларига ташқи таъсирнинг термик, радиацион ва бошқа киришма атомларининг ўзаро таъсирига барқарорлигини тадқиқ қилиш натижалари асосида:

кремнийда марганец ва никел киришма атомлари кластерларини ҳосил қилиш йўли билан бу материаллар асосида яримўтказгичли асбобларнинг параметрларини радиация нурланишига турғунлигини оширилиши аниқланган ва бу «FOTON» акциядорлик жамияти жорий қилинган («Ўзэлтехсаноат» акциядорлик компаниясининг 2018 йил 25 августдаги 02-1875-сон маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши «FOTON» АЖ ишлаб чиқиладиган кремний асосидаги яримўтказгичли асбобларни радиацион нурланишга турғунлигини ошириш имконини берган;

кремний панжарасида марганец ва олтинчи гуруҳ элементлари асосида  $\text{Si}_2\text{Mn}^{2+}\text{-S}^{2+}$ ,  $\text{Si}_2\text{Mn}^{2+}\text{-Se}^{2+}$ ,  $\text{Si}_2\text{Mn}^{2+}\text{-Te}^{2+}$  турдаги наноструктураларнинг янги синфини олиш технологияси «FOTON» акциядорлик жамиятида қўлланилган («Ўзэлтехсаноат» акциядорлик компаниясининг 2018 йил 25 августдаги 02-1875-сон маълумотномаси). Илмий натижалар кремний асосидаги тубдан янги турдаги оптоэлектрон асбоблар яратишга қўлланилган;

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Тадқиқот натижалари 10 та халқаро ва 7 та республика миқёсидаги илмий-амалий конференцияларда маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши.** Диссертация мавзуси бўйича жами 24 та илмий иш чоп этилган, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этишга тавсия этилган илмий нашрларда 7 та мақола нашр этилган.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертация кириш, 4 та боб, хулоса, 101 фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 115 бетни ташкил этади.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

**Кириш қисмида** диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти асосланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг асосий устувор йўналишларига кўрсатилган, диссертация мавзуси бўйича халқаро илмий тадқиқотлар шарҳи келтирилган, тадқиқотнинг мақсад ва вазифалари шакллантирилган, илмий янгилиги баён қилинган, олинган натижаларни ишончлилиги асослаб берилган, уларнинг назарий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижалари ва синов натижаларини жорий қилиниши ҳақида қисқача маълумот келтирилган, шунингдек диссертация тузилиши ҳақида маълумотлар берилган.

Диссертациянинг «**Кремнийда киришма атомлар кластерларни ўрганиш муаммоларининг замонавий ҳолати**» деб номланган биринчи бобида яримўтказгичларда киришма атомлари кластерларини олиш усуллари таҳлил қилинган ва монокристалл кремнийда радиацион ва термик нуқсонларнинг киришма атомлари ва уларнинг кластерларига таъсири бўйича тадқиқот натижалари ўрганилган. Кремнийда киришма сифатида олинган ўтиш гуруҳи элементларини ўзаро таъсирлашувининг назарий ва тажрибада олинган натижалари келтирилган.

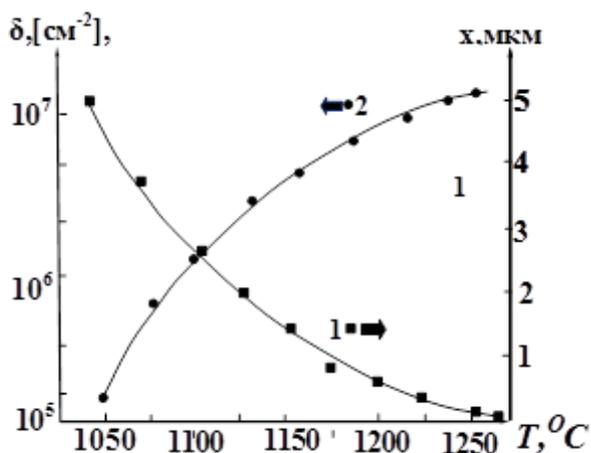
Мавжуд назарий ва тажриба маълумотларни таҳлиliga асосан диссертациянинг вазифалари шакллантирилган.

Диссертациянинг «**Киришмали атомларни кластерлари ҳосил қилинган намуналарини олиш технологиялари ва уларни тадқиқ қилиш усуллари**» деб номланган иккинчи бобида кремнийда электро нейтрал кластерларини ўзаро таъсири шароитида қулай термодинамик ва технологик шароитларни илмий асосланиши келтирилган, параметрлари бошқариладиган электр нейтрал кластерларни олиш технологияси ишлаб чиқилган, яратилган технология нанокластерларни ҳосил қилишда ишлатилган киришма атомларни максимал киришини таъминлаши кўрсатилган.

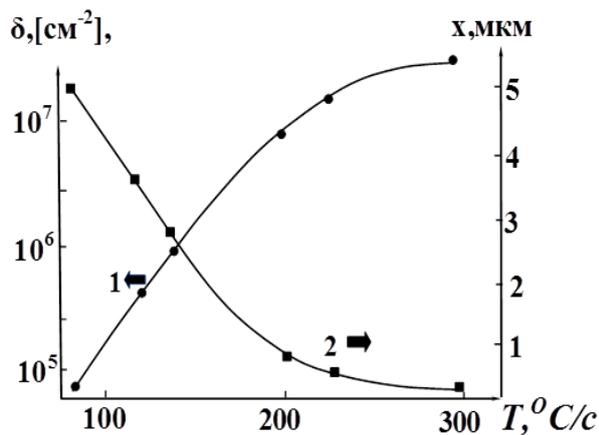
Тадқиқотлар кўрсатдики, кислород концентрацияси юқори бўлганда қозонсиз ўстириш усулида ўстирилган намуналарга нисбатан кластерларни зичлиги 2÷3 марта ортди, аммо уларни ўлчамлари икки баробарга камайди. Бунда аниқловчи фактор бўлиб диффузиянинг охириги ҳарорати, совутилиш тезлиги ва кўшимча термо куйдириш ҳароратлари ҳисобланади. Кластерлар ҳолатига диффузия охиридаги ҳароратнинг таъсири тадқиқ қилинган. Шунда маълум бўлдики, куйдириш ҳароратини  $T=1100$  °C дан  $1250$  °C оралиғига оширганда зичлиги 1÷1,5 баробарга ортади, уларни ўлчамлари эса 5÷6 мартага кичрайиши аниқланди (1- расм).

Никел кластери ҳолатининг совутиш тезлигига боғлиқлигини ўрганишда намуналарни 3 гуруҳи тайёрланди. Намуналар  $v_T \sim 100$  °C/c билан совутилганида кластерларнинг ҳажмдаги зичлиги камайиб, ўлчамлари ортиши намаён бўлди. Ҳудди шу вақтда намуналарда диффузия печида қолдириб совутилганда кластерларни мавжудлиги нафақат сиртда, балки ҳажмида кузатиш имконияти бўлмади. Шундай қилиб, диффузия шароитини ўзгартириб кластерлар зичлиги ва ўлчамларини бошқариш мумкин. Қайта тикланадиган параметрли

кластерларни олиш учун совутилишнинг қулай тезлиги  $200\div 300\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$  ҳисобланади (2-расм).

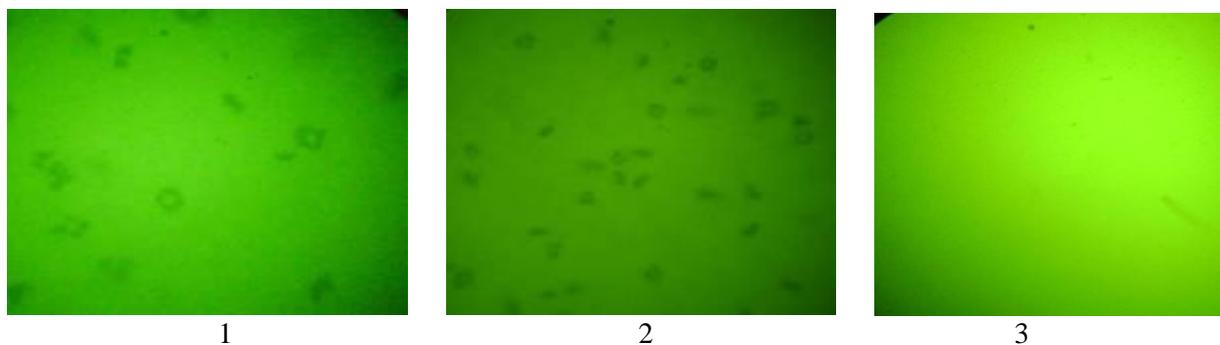


1 - расм. Ni кластерлари параметрларини диффузия охиридаги ҳароратга боғлиқ ўзгариши



2-расм. Ni кластерлари параметрларига ҳароратни пасайтириш тезлигининг таъсири

Кластери бор намуна хоссаларини тадқиқ қилишда ҳар хил ҳароратларда паст ҳароратда қиздириш билан олинган натижалар 3 – расмда кўрсатилган. Қиздириш ҳарорати  $T=600\text{ }^{\circ}\text{C}$  гача бўлганда қиздириш вақтига ( $t=0\div 10$  соат) боғлиқ бўлмаган ҳолда намунанинг электр хоссалари ўзгармайди, яъни улар ўзини олдинги қийматини сақлайди.



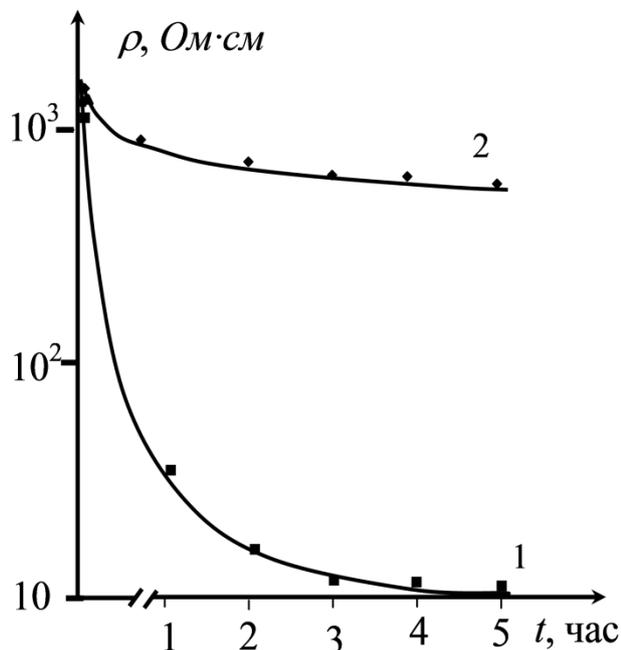
1 -  $T=600\text{ }^{\circ}\text{C}$ -  $(3\div 5) \cdot 10^5\text{ см}^{-2}$ ,  $4\div 5$  мкм, 2 -  $T=800\text{ }^{\circ}\text{C}$ -  $(2\div 4) \cdot 10^6\text{ см}^{-2}$ ;  $2\div 3$  мкм 3 -  $T>900\text{ }^{\circ}\text{C}$

3 - расм. Паст ҳароратли қиздиришдан сўнги Ni кластерларининг ҳолати

$T=650\div 800\text{ }^{\circ}\text{C}$  ҳарорат оралиғида қиздиришда кластерлар ўлчамларининг кичрайиши ва катталашиши кузатилади. Электр жиҳатдан фаол Ni атомлари концентрацияси деярли  $3\div 5$  марта камаяди,  $T>900\text{ }^{\circ}\text{C}$  да термик ишлов натижасида намуналар ўзларини олдинги ҳолатига қайтади, бунда электр жиҳатдан фаол Ni атомлари шунчалик даражада камаядики, уларни мавжуд бўлган киришмали атомлар орасида кузатиб ҳам бўлмайди (3 - расм). Шундай қилиб, кремнийда Ni кластерларининг хоссалари  $T=100\div 600\text{ }^{\circ}\text{C}$  да қўшимча қиздирилиши вақтга боғлиқ бўлмаган ҳолда иссиқликка бардошлилиги аниқланди. Киришмали кластерларни бузилиши ёки уларни майда булақларга

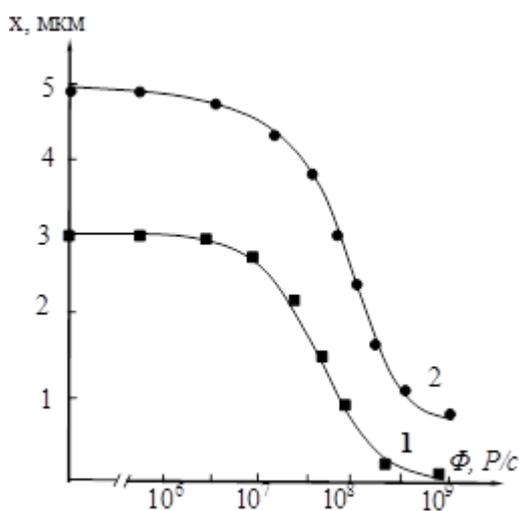
парчаланиши сабабли, микроскопнинг оптик имконияти чекланганлигига кўра аниқлаб бўлмайди.

$T \leq 120^\circ\text{C}$  қўшимча қиздириш соҳасида марганец кластерлари бўлмаган кремнийнинг солиштирма қаршилиги кескин ўзгара бошлайди.



1.  $T \leq 120^\circ\text{C}$ , кластери йўқ намуналар
2.  $T \leq 120^\circ\text{C}$ , кластери бор намуналар

**4 - Расм. Марганец атомлари кластерларини ҳолатига қўшимча қиздиришни таъсири .**



1.  $x \sim 1 \div 3$  мкм
2.  $x \sim 3 \div 5$  мкм

**5 - расм. Кремнийдаги Ni кластерлари ўлчамларига  $\gamma$ - нурланишнинг таъсири**

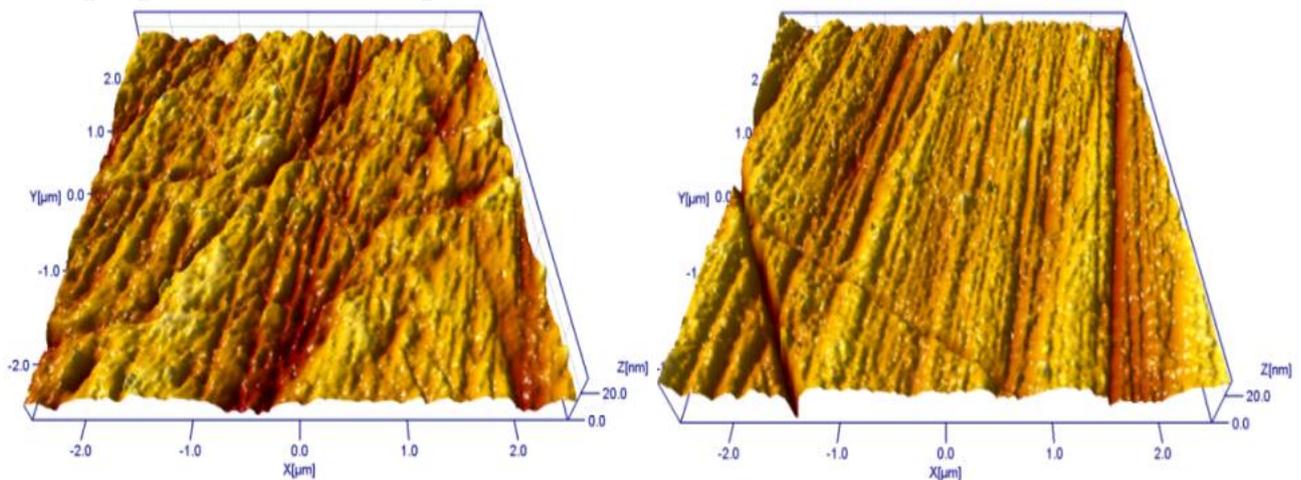
намуналарнинг уч гуруҳи тайёрланди. Тадқиқот натижалари кўрсатдики,  $10^8$  P қийматидан бошлаб кластерлар ўлчами кичиклашади. Бу ходиса кластерлар ўлчами каттароқ бўлган (3÷5 мкм) намуналарда кўпроқ намоён бўлди. 5 – расмда турли нурланиш қийматларида нурлантирилган кластери бор

қаршилиги кескин ўзгара бошлайди.  $t=5$  соат бўлганида намуналар ўзини дастлабки диффузиядан олдинги ҳолатига қайтади, яъни  $\text{Si}\langle\text{Mn}\rangle$  интенсив йўқолиши содир бўлади. Ҳарорат кўтарилиши билан жараён тезлашади (4 – расм). Кластерли намуналарда  $T \leq 120^\circ\text{C}$  гача (4 – расм, 2 - эгри чизик) электрик хоссалари деярли ўзгармайди ва уларда  $\lambda = 1,5 \div 8$  мкм соҳасида юқори фотосезувчанлик, манфий магнит қаршилиқ (ММК) ҳодисаси кузатилади. Қиздириш ҳарорати ошганда уларнинг ҳам хоссалари ўзгаради, қиздириш ( $t=3 \div 5$  час) бўлганда намуналар ўзларини олдинги параметрларига эга бўладилар, яъни кластерларнинг йўқолиши ва бузилиб кетиши кузатилади (4 - расм).

**«Кремний кристали нуқсонлари билан марганец ва Ni кластерларининг ўзаро таъсири»** деб номланган учинчи бобида Ni кластерларини ва марганец кластерларини гамма нурланиш вақтида пайдо бўладиган радиацион нуқсонлар билан ўзаро таъсири аниқланган. Si кристаллидаги марганец кластерларини квант нуқталар каби қараш мумкин.

Кремнийдаги Ni кластерларининг ҳолатига  $\gamma$  – нурланишнинг таъсири тадқиқ қилинган. Турли тақсимот ва ўлчамга эга бўлган кластери бор

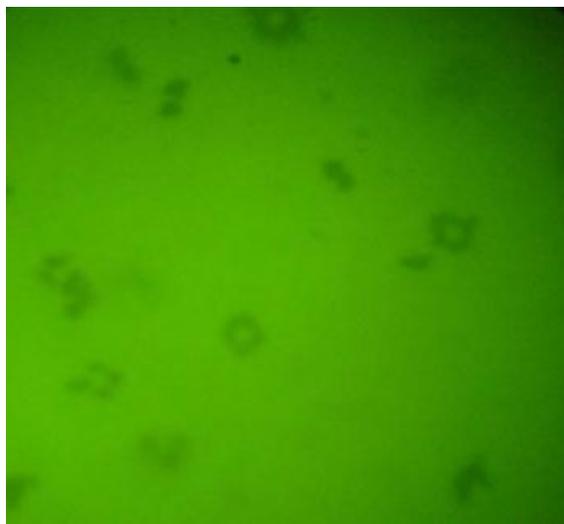
намуналарнинг ҳолати кўрсатилган. Ҳисоблашлар шуни кўрсатдики, кластерлар ўлчамлари 2÷3 марта камаяди, уларни тақсимоти ўзгармайди. Зичлиги катта бўлган кичик ўлчамли кластери бор намуналарда (1–намуналар)  $10^9$  P миқдоридан нурлатилганида ўлчамларини камайиши ҳисобига уларни ҳолатини кузатиш имкони бўлмади. Бунга ИҚ микроскоп сезиш қобилиятининг имконияти чекланганлиги сабаб қилиб кўрсатиш мумкин. Шу сабабли намуналарни атом кучи микроскопи (АКМ) ёрдамида тадқиқ қилдик. Натижалар шуни кўрсатдики, кластерлар ўлчами 10÷50 нм ўлчамли кластерларга айланган (6 – расм).



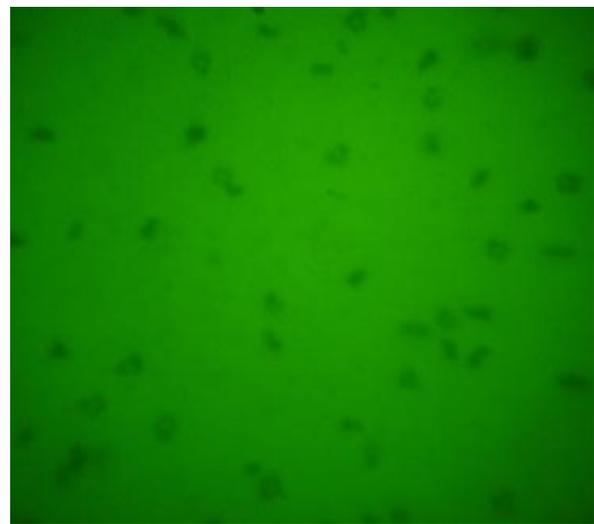
1.  $(5\div 7) \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$

2.  $(2\div 3) \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$

**6 – расм.  $\Phi > 10^9$  P нурланишдан кейин Ni кластерларининг намуна сирти ва 20 мкм ичидаги тақсимоти**



а)  $\sim 10^8$  P



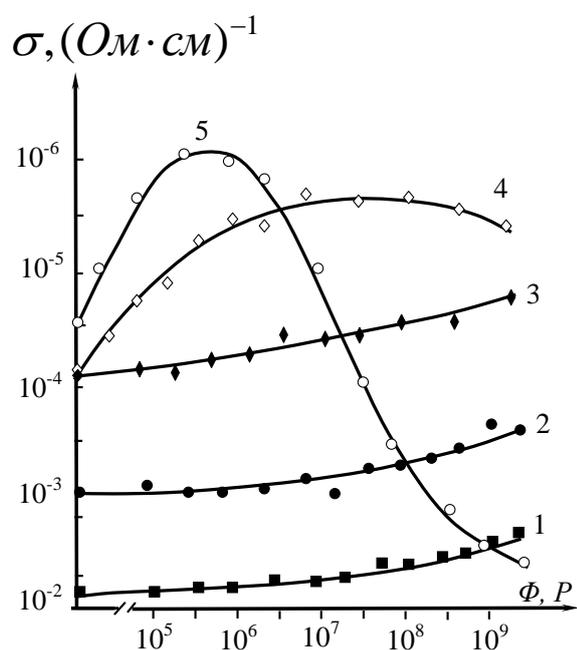
б)  $> 10^8$  P

**7 - расм. Кремнийдаги ҳалқасимон Ni кластерларига  $\gamma$  – нурланишнинг таъсири**

Қозонсиз ўстириш усулида олинган кремний намуналарида одатда ҳалқасимон кластерлар пайдо бўлади, уларни ҳудди шундай шароитларда нурлантирилган. Нурланиш миқдорини юқорироқ ( $\sim 10^8$  P) қийматларида ҳалқасимон кластерларининг ўлчамлари сезиларли ўзгармасида, ҳалқани ҳосил қилишда қатнашадиган кластерлар ўлчами камаяди ва шу туфайли кластерлар ўртасида узилишлар ҳолатлари кузатилди (7 - расм).

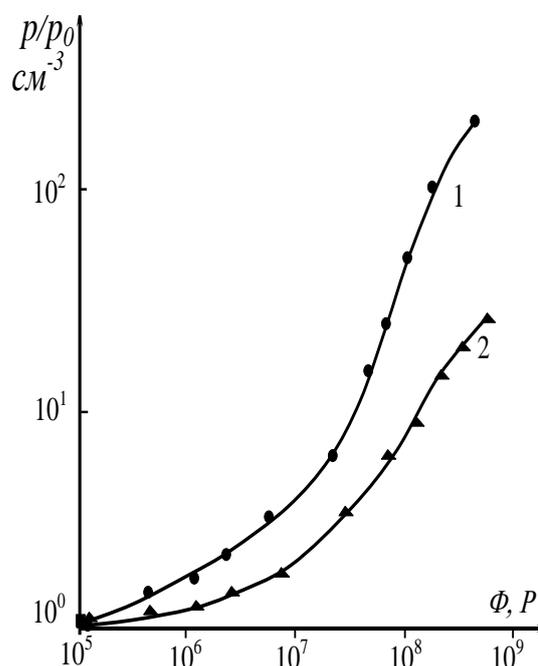
Тажриба натижалари шуни кўрсатдики никел кластерларнинг зичлиги юқори бўлган никел намуналарида электр хоссалари нурланишнинг  $\leq 10^8$  P микдоригача бўлган қийматида сезиларли ўзгармади.

8 – расмдан кўриниб турибдики,  $10^8$  P дан бошлаб намуналарни солиштирма ўтказувчанлиги камаяди ва  $7 \cdot 10^8$  P доза бўлганида ўтказувчанлик турининг ишораси ўзгаради, яъни материал р-турли бўлиб қолади, кейинчалик солиштирма ўтказувчанлиги нурланиши қиймати ортиши билан ортади. Бу маълумотлар қуйидаги хулосани берадики, яъни катта нурланиш қийматларида номувозанат вакансияларнинг концентрацияси ортиши ва кластерларни парчаланиши натижасида никелни алоҳида тугунлараро атомлари вакансиялар томонидан эгаллаб олинади ва улар акцептор табиатида намоён бўлади.



1 -  $8,3 \cdot 10^{-3} (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$ , 2 -  $9 \cdot 10^{-4} (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$ ,  
3 -  $2 \cdot 10^{-5} (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$  (р-тип),  
4 -  $2 \cdot 10^{-4} (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$ , 5 -  $2,5 \cdot 10^{-5} (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$  (п-тип)

**8 – расм. Турли хил нурланиш қийматларида намуналар солиштирма ўтказувчанлигини ўзгариши**



1 -  $(2 \div 3) \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$   
2 -  $(5 \div 7) \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$

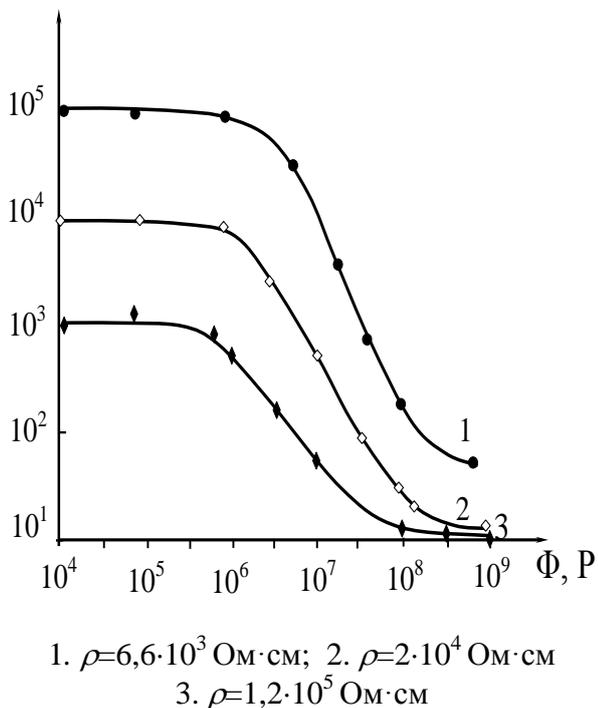
**9 – расм. Кремнийдаги никел электр фаол атомларининг концентрациясини нурланиш қийматига нисбатан ўзгариши,  $T=300 \text{ K}$**

Кластерлар ўзаро таъсирлашувида ва нурлантиришнинг катта қийматларида электрфаол Ni концентрациясини  $1,5 \div 2$  даражага орттириш мумкин (9 – расм). Бу эса кремнийда Ni нинг электр фаол концентрациясини бошқариш имкониятини кенгайтиради.

Тадқиқотлар натижалари шуни кўрсатдики, биринчидан Ni атомларининг фаоллашуви билан боғланган коваклар концентрацияси ошди, худди шунга ўхшаш энергетик сатҳлар ҳам, иккинчидан эса фаоллашган Ni атомларининг концентрацияси нурланиш оқибатида кластерлар зичлиги камайиши билан камаяди.

Шундай қилиб, кластерли кремнийда нурлантириш орқали ковакларни генерациялаш электр нейтрал Ni атомларининг фаоллашиши ҳисобига содир бўлади.

Солиштирма қаршилиқни ўзгариши кластерлар заряд қийматининг ҳолатига боғлиқ бўлиб, нурлантириш қиймати ошиши билан уларнинг зарядланганлиги камаяди ( $10^4 - 10^9$  Р – расм. 1÷3 эгри чизиқлар). Кейинчалик нурлантириш қиймати яна  $10^6$  Р гача орттирилса, намуналарнинг  $\rho=10\div 15$  Ом·см гача камаяди, яъни намуналар марганец диффузиясигача эга бўлган  $\rho$  – турдаги кремнийнинг дастлабки қийматига келади.



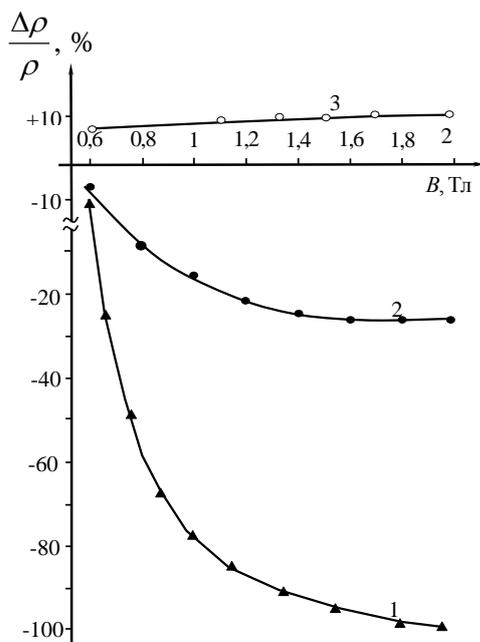
10 - расм. Si<B, Mn> намуналар  $\rho$  сининг  $\gamma$  - нурланиш қийматига боғлиқлиги

қийматигача ММҚ ва намуналарни фотосезгир спектр оралиғи деярли ўзгармаслиги аниқланди.

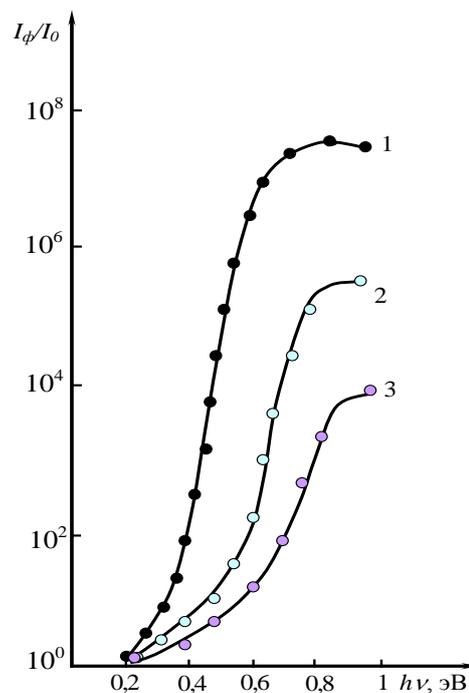
$\Phi > 5 \cdot 10^5$  Р дан намуналар хусусиятлари ўзгаради, яъни уларнинг фото ўтказувчанлиги нурлантириш қиймати ошиши билан сезиларли камаяди,  $\Phi > 10^6$  Р да кластери йўқ намуналар каби фотосезувчанликка эга бўлади (12 – расм). Намуналарнинг магнит хусусиятларини тадқиқот натижаси кўрсатдики нурлантириш қиймати  $\Phi \sim 5 \cdot 10^5$  Р дан бошлаб, ММҚ камаяди,  $\Phi > 10^6$  Р қийматда магнит қаршилиқ тури ўзгаради, яъни ММҚ мусбат магнитқаршилиқка айланади, яъни қиймати магнит майдонни оширилишига боғлиқ бўлмай қолади (11 – расм).

Бир хил  $\rho$  га эга бўлган марганец кластерлари бор намуналар нурлантирилди. Нурлантиришнинг ҳар бир босқичидан сўнг бир хил вазиятда намуналарнинг электрофизик, магнит ва фотоэлектрик хусусиятлари тадқиқ қилинди.

Тажриба натижалари асосида марганец киришма атомлари киритилган кремний намунасида хона ҳароратида ғайри табиий ММҚ (11 - расм, 1 - эгри чизиқ) ҳамда ўта юқори фотоўтказувчанлик (12– расм, 1 - эгри чизиқ) ҳолатлари кузатилди. Бу намуналар  $T = -70$  °С ҳароратда  $\Phi = 10^3 \div 10^6$  Р дозали интервалгача  $\gamma$ -квантлари ( $Co^{60}$ ) билан нурлантирилади.  $\Phi = 1 \cdot 10^5$  Р нурланиш фотосезгир спектр оралиғи деярли



11 - расм. Кремний марганец атомларни кластерли намуналарда мнагнит қаршилигини нурлатиш дозасига  $T=300$  К,  $E=100$  В/см боғлиқлиги



12 - расм. Si<В, Мn> намуналарни фотоўтказувчанлигини ҳар хил нурлантириш қийматларидан сўнги спектрал боғлиқлиги

«Марганец атомлари кластерларининг VI гуруҳ элементлари билан ўзаро таъсири» деб номланган тўртинчи бобида марганец кластерларини S, Se ва Те билан бир вақтни ўзида ёки кетма-кет диффузия қилинганда ўзаро таъсири тадқиқ қилинган. Қиздиришнинг маълум қийматларида диффузиядан кейин кремнийдаги марганец атомларини кўшимча VI гуруҳ элементлари S, Se ва Те билан легирлашда кучли ўзаро бирикиши аниқланди. Ўзаро максимал бирикиш ҳарорати аниқланган, ўзаро бирикиш механизми таклиф қилинган,  $\text{Si}_2\text{Mn}^{2-}\text{S}^{2+}$ ,  $\text{Si}_2\text{Mn}^{2-}\text{Se}^{2+}$ ,  $\text{Si}_2\text{Mn}^{2-}\text{Te}^{2+}$  янги типдаги нанобирикмаларнинг шаклланиш мумкинлиги кўрсатилган, яъни улар кремний панжарасида кимёвий боғланишлар бузилмасдан ҳосил бўлади.

Марганец кластерларининг теллур, олтингугурт, селенлар билан ўзаро бирикишига диффузия ҳароратининг таъсири ўрганилган. Бунда  $\rho=10$  Ом·см р-турли кремний учун макбул диффузия ҳарорати  $1100$  °С бўлиб, марганец ва олтингугуртларни максимал кластерлари шаклланадиган ҳарорат. Бунинг учун кремнийни марганец, олтингугурт ва марганецли олтингугурт билан легирланган 3 гуруҳ намуналар тайёрланган. Барча намуналарнинг 3 та гуруҳи алоҳида ҳавоси сўрилган ампулаларда бир хил шароитда қиздирилган ва бир хил совутилган. Диффузиядан кейин турли ҳароратларида қиздириш билан олинган барча намуналар электр параметрлари бир хил шароитда ўлчанди. 1 – жадвалда  $1100$  °С да олинган барча намуналарни электр параметрларининг ўртача қиймати келтирилган. Жадвалдан кўриниб турибдики, коваклар учун ҳаракатчанликнинг кичик қийматларига эга Si<В,Мn> намуналар р-турли бўлиб қолади. Ҳаракатчанликнинг бундай бўлиши марганец кластерлари бор

намуналар учун ўринлидир. Бунда  $Si\langle B,S \rangle$  n-турли бўлиб қолади, яъни Ферми сатҳларини ҳолати  $F=E_C-0,28$  эВ бўлганида қайта компенсирланади. Бундай намуналарда S атомларининг асосий қисми  $S^{+}>>S^{++}$  ҳолатда бўлади.

**1 - жадвал.**

**$T=1100$  °C,  $t=56$  соат диффузиядан кейин намуналарнинг асосий электр параметрлари**

Намуна	$\rho$ , [Ом см]	Тип	$\mu$ , [см <sup>2</sup> /В·с]	$N^*$ , [см <sup>-3</sup> ]
Дастлабки материал	10	p	245	$5 \cdot 10^{15}$
$Si\langle B,Mn \rangle$	$6,1 \cdot 10^3$	p	100	$1,1 \cdot 10^{13}$
$Si\langle B,S \rangle$	10,2	n	1270	$5 \cdot 10^{14}$
$Si\langle B,Mn,S \rangle$	20	p	260	$1,8 \cdot 10^{15}$

1 – жадвалда S ва Mn билан легирланган намуналар электр параметрлари материаллар дастлабки параметрлари билан мос тушади, яъни бунда нафақат Mn ва S атомлари балки, диффузияда ҳосил бўладиган термодонорлар мавжуд бўлмаган ҳолат назарда тутилади. Тадқиқотда киришма атомларини геттерлаш имкониятлари ёки Mn ва S ни ҳисобга олган ҳолда қандайдир қаттиқ эритмаларнинг ҳосил бўлишини истисно қилишга имкон беради, яъни уларни кристалл ҳажмидаги диффузиясини қийинлаштиради. Шундай қилиб,  $Si\langle B,Mn,S \rangle$  намуналарда S ва Mn атомлари  $Si\langle B,Mn \rangle$  ва  $Si\langle B,S \rangle$  каби концентрацияда ҳосил бўлади.

$Si\langle S \rangle$  нинг спектрал боғлиқлигини тадқиқ қилиш шуни кўрсатдики, уларда S учун характерли бўлган энергетик сатҳлар кузатилди,  $Si\langle B,Mn \rangle$  да эса марганец кластерлари билан боғлиқ бўлган  $0,16 \div 0,8$  эВ соҳасида ғайри оддий ўта катта қийматдаги фотоўтказувчанлик аниқланди.  $Si\langle B,Mn,S \rangle$ ,  $Si\langle B,Mn,Se \rangle$  ва  $Si\langle B,Mn,Te \rangle$  намуналарда S, Se, Te ёки Mn билан боғлиқ қандайдир энергетик сатҳларни борлиги аниқланмади, шу билан бирга уларда фотоўтказувчанлик ўзгармади (14 - расм, 2 - эгри чизик).  $Si\langle B,Mn \rangle$  намуналар магнит қаршилигини тадқиқ қилиш шуни кўрсатдики, уларда хона ҳароратида ғайри оддий юқори манфий магнит қаршилиқ аниқланди. 15 – расмда  $Si\langle B,S \rangle$ ,  $Si\langle B,Se \rangle$ ,  $Si\langle B,Te \rangle$ ,  $Si\langle B,Mn,S \rangle$ ,  $Si\langle B,Mn,Se \rangle$  ва  $Si\langle B,Mn,Te \rangle$  да олинган магнит қаршилиқларни боғлиқлиги келтирилган. Ўхшаш натижалар дастлаб S кейин Mn билан кетма – кет диффузия этилган намуналарда ҳам олинди. Бундай натижалардан қуйидагиларни фараз қилиш мумкин, яъни бир вақтни ўзида S ва Mn билан легирланган намуналар нафақат Mn атомларининг кластерлари шаклланади, шунингдек барча киритилган Mn ва S атомлари электр нейтрал ҳолатда бўлади. Шунинг учун, Mn кластерлари бор кремнийда S атомларининг мавжудлиги кластерларни парчалайди ёки кластерларни пайдо бўлишига имкон бермайди, ва натижада S ва Mn атомларининг электронейтрал комплекслари ҳосил бўлади. Кўриниб турибдики,  $Si\langle B,Mn \rangle$  намуналардан фарқли равишда  $Si\langle B,Mn,S \rangle$ ,  $Si\langle B,Mn,Se \rangle$  ва  $Si\langle B,Mn,Te \rangle$  намуналарда фақат катта бўлмаган мусбат магнит қаршилиқ кузатилди (15 - расм. 2 - эгри чизик).

Кўп босқичли диффузия усули ишлаб чиқилиб, бунда диффузия ҳарорати доимий босқичма – босқич орттирилиб борилди. Тадқиқот натижалари шуни

кўрсатдики, дастлабки  $\rho$  – кремний  $\rho=5$  Ом·см учун  $T=1150$  °C ҳарорат диффузиянинг мақбул ҳарорати бўлиб ҳисобланади (2-жадвал).

## 2 - Жадвал.

### Намуналарнинг диффузиядан сўнги электрик параметрлари, $T=1150$ °C

Намуналар	ТП	$\rho$ , Ом·см	$\mu$ , см <sup>2</sup> /В·с	n, p, см <sup>-3</sup>
Дастлабки материал	p	5,1	245	$5 \cdot 10^{15}$
Si <B,Mn>	p	$(3 \div 6) \cdot 10^3$	90÷120	$(2,3 \div 1,1) \cdot 10^{13}$
Si <B,Se>	n	25÷30	1150÷1200	$(2,5 \div 3) \cdot 10^{14}$
Si <B,Te>	n	9÷12	1100÷1150	$(5 \div 3) \cdot 10^{14}$
Si<B,Mn,Se>	n	25 ÷30	1150÷1200	$(2,5 \div 3) \cdot 10^{14}$
Si<B,Mn,Te>	n	9÷12	1100÷1150	$(5 \div 3) \cdot 10^{14}$

Марганец кластерлари билан Se ва Te атомларининг ўзаро бирлашуви ҳосил бўлмади. 3 – жадвалда Si<B,Mn>, Si<B,Se> ва Si<B,Mn,Se> намуналарнинг электр параметрлари келтирилган, улар  $T=600 \div 850$  °C ҳароратда 5 соат мобайнида қиздирилган.

## 3 – Жадвал.

### Паст ҳароратли қиздиришдан кейинги намуналарни электр параметрлари

Намуналар	Қиздириш ҳарорати							
	600 °C		700 °C		750 °C		820 °C	
	ТП	$\rho$ , Ом·см	ТП	$\rho$ , Ом·см	ТП	$\rho$ , Ом·см	ТП	$\rho$ , Ом·см
Si<B,Mn>	p	3	p	2,5	p	3	p	3
Si<B,Se>	n	24	n	27	n	24	n	24
Si<B,Mn,Se>	n	$4 \cdot 10^4$	n	$2,5 \cdot 10^3$	p	$7 \cdot 10^2$	p	3

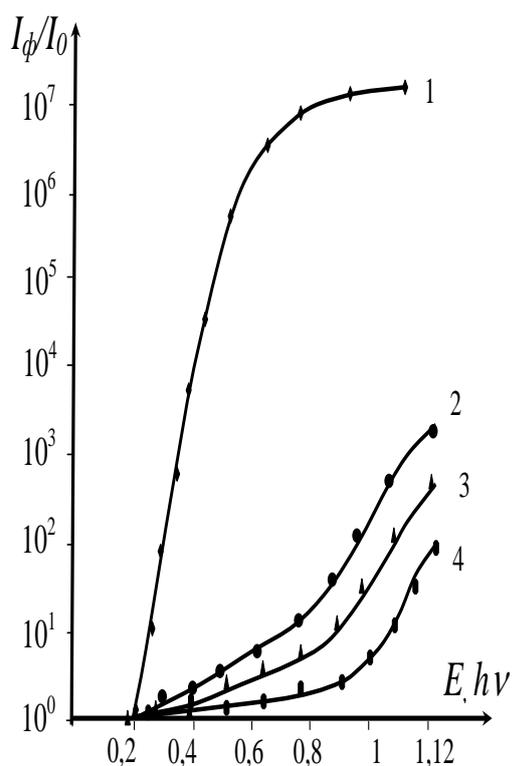
3 – жадвалдан, Si<B,Mn> намунасида тадқиқ қилинган ҳароратлар соҳаларида парчаланаяди ва намуна ўзининг дастлабки аҳолига қайтади. Si<B,Se> намунасининг электр параметрлари ўзгармайди, бу каттик эритманинг ҳароратга чидамлилигини кўрсатади. Si<B,Mn,Se> намуналарида сезиларли ўзгариш кузатилмайди, аммо куйдириш ҳарорати  $T > 600$  °C ортиши билан Si<B,Mn,Se> намуналарнинг солиштирма қаршилиги сезиларли ортади ва ҳарорат ортиши билан  $\rho$  камайиши кузатилади.  $T=800$  °C бўлганда ўтказувчанлик ишораси ўзгаради ва  $\rho$  сезиларли камаяди, ҳарорат  $T=820 \div 830$  °C бўлганда эса Si<B,Mn,Se> намуналар электрофизик параметрларига, яъни дастлабки диффузиягача бўлган ҳолатига ўтади.

## 4 – Жадвал

### Паст ҳароратли қиздиришдан кейинги намуналарни электр параметрлари

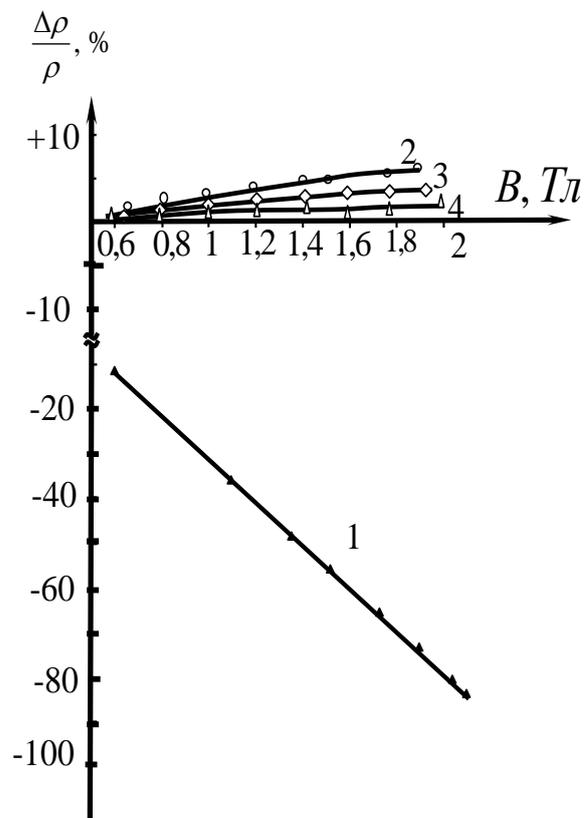
Намуналар	Қиздириш ҳарорати							
	500 °C		550 °C		600 °C		650 °C	
	ТП	$\rho$ , Ом·см	ТП	$\rho$ , Ом·см	ТП	$\rho$ , Ом·см	ТП	$\rho$ , Ом·см
Si <B,Mn>	p	2,5	p	2,7	p	3	p	2,5
Si <B,Te>	n	11	n	11,5	n	12	n	11
Si <B,Mn,Te>	n	$2,5 \cdot 10^2$	n	$6 \cdot 10^4$	p	$1,2 \cdot 10^2$	p	2,7

4 – жадвалда  $T=500\div 650$  °C паст ҳароратли куйдириш соҳасини Si<B,Mn>, Si<B,Te> ва Si<B,Mn,Te> намуналарнинг электрфизик параметрларига таъсири келтирилган.



1. Si<B,Mn> кластерли. 2. Si<B, Mn,S>.

**13 – расм. Киришма атомларнинг кластерларли кремний фотоўтказувчанлигининг спектрга боғлиқлиги,  $T=100$  К.**



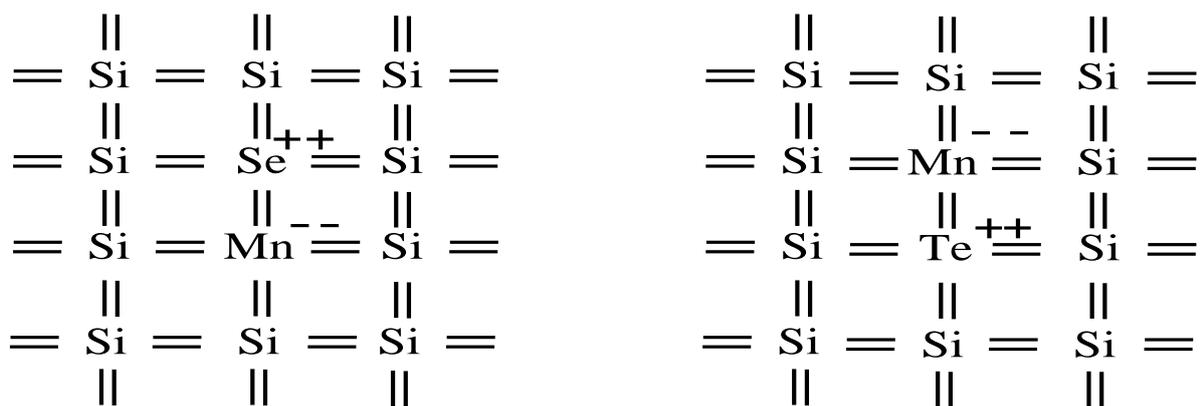
3. Si<B, Mn,Se> 4. Si<B, Mn,Te>

**14 – расм. Киришма атомларнинг кластерларли кремний намуналарининг магнит майдоннинг таъсирида ўзгариши,  $T=300$  К.**

Si<B,Mn>лар  $\lambda=1,5\div 8$  мкм тўлқин узунлиги оралиғида киришмали фотоўтказувчанликни ўта катта қийматига эга бўлиши аниқланган (13 – расм, 1 – эгри чизик), шу намуналарга магнит майдоннинг таъсирида ғайри табиий катта қийматдаги ММҚ аниқланди (14 – расм, 1-эгри чизик).

Si<B,Mn,S>, Si<B,Mn,Se>, Si<B,Mn,Te> ҳамда Si<B,Se> ва Si<B,Te> намуналарида магнит майдоннинг таъсири ўрганилганда кичикроқ қийматларда мусбат магнит қаршилик кузатилади (14 – расм, 3-4 эгри чизиклар). Худди шу намуналарда Si<B,Mn> нисбатан кичик миқдорда фотосезувчанлик кузатилди (13 – расм, 3,4 эгри чизиклар).

Натижаларнинг таҳлили асосида марганец кластерларини қўшимча киргизилган S, Se, ва Te атомлари билан  $T=1100$  °C,  $820$  °C,  $650$  °C ҳароратларда ўзаро бирлашиб кўпкомпонентли  $\text{Si}_2\text{Mn}^{2-}\text{S}^{2+}$ ,  $\text{Si}_2\text{Mn}^{2-}\text{Se}^{2+}$ ,  $\text{Si}_2\text{Mn}^{2-}\text{Te}^{2+}$  кластерларни шаклланиш қонунияти S, Se, Te киришма атомларининг ташқи электрон қобиғида электронларни кластерларда кимёвий боғланишни ҳосил қилиши асосида содир бўлиши аниқланди (15 – расм).



15 – расм. Кремний панжарасидаги янги турдаги наноструктура

## ХУЛОСА

1. Кремнийни легирлаш жараёнида кластер ҳосил бўлиши учун киришма атомларнинг ҳаммасини максимал қатнаштирувчи ва киришма атомлар кластерларини ўзаро таъсирлашувини бошқарувчи кўп босқичли усули диффузия усули ишлаб чиқилди.

2. АКМ, Jeol JXA – 8800R ҳамда ИНФРАМ - И микроскоп қурилмаларида микрозондли усул орқали кремнийда Ni кластерларини ҳолати, зичлиги, тақсимоти ва бошқа параметрлари аниқланди.

3. Никел атомлари асосида шакллантирилган кластерлар ўлчамини юқори қийматли  $\gamma$  - нурланиш орқали камайиши мумкинлиги ва кристалл панжаранинг умумий ҳажми бўйича тенг тақсимланган наноўлчамли кластер олиш мумкинлиги кўрсатилган.

4.  $\gamma$  – нурланишни кремнийдаги Ni атомларининг миқдори ва электр активлари сонини ўзгартириш учун янги усулларида бири сифатида фойдаланиш мумкинлиги аниқланди.

5. Марганец атомларини кластерлари паст нурланишларда ( $>10^6$  Р) вакансиялар билан кучли ўзаро таъсирлашиши натижасида парчаланиши кўрсатилди.

6. Киришма атомларининг электр нейтрал комплекслар ҳосил қилишда максимал иштирокини таъминловчи термик қайта ишловнинг қулай ҳарорати аниқланди, S ва Mn атомлари учун  $T=1100$  °C, Se ва Mn учун  $T=820$  °C, Te ва Mn учун  $T=650$  °C.

7. Молекуляр комплекслар ҳосил қилиш ҳисобига кремний панжарасида  $Si_2 Mn^{2-} S^{2+}$ ,  $Si_2 Mn^{2-} Se^{2+}$  ёки  $Si_2 Mn^{2-} Te^{2+}$  янги наноструктурага эга бўлган электр нейтрал комплекслар шакллантириш мумкинлиги кўрсатилди.

Диссертация ишимни бажаришда кўрсатилган ҳар тарафлама ёрдам учун устозимиз академик М.К.Баҳадирхановга, илмий раҳбарим профессор Х.М.Илиевга ва ТДТУ «Рақамли электроника ва микроэлектроника» кафедрасининг барча жамоасига раҳмат айтаман.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.31.01.2019.FM/Т.03.05 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ  
ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ, АНДИЖАНСКОМ  
ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

---

**КАРАКАЛПАКСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**САПАРНИЯЗОВА ЗЛИХА МАХСЕТБАЕВНА**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КЛАСТЕРОВ АТОМОВ НИКЕЛЯ  
И МАРГАНЦА С ДЕФЕКТАМИ РЕШЕТКИ КРЕМНИЯ**

**01.04.10 – Физика полупроводников**

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

**Ташкент – 2019**

**Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2018.3.PhD/FM286.**

Докторская диссертация выполнена в Каракалпакском государственном университете и Ташкентском государственном техническом университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекском, русском, английском (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (tdtu.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyo.net.uz).

- Научный руководитель:** **Илиев Халмурат Миджитович**  
доктор физико-математических наук, профессор
- Официальные оппоненты:** **Утамурадова Шарифа Бекмурадовна**  
доктор физико-математических наук, профессор (НУУ)
- Расулов Рустам Явкочевич**  
доктор физико-математических наук, профессор (ФГУ)
- Ведущая организация:** **Институт ионно-плазменных и лазерных технологий**

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 года в \_\_\_ часов на заседании Научного совета DSc.31.01.2019.FM./T.03.05 при Ташкентском государственном техническом университете, Андижанском государственном университете. (Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, дом 2. Факультет «Электроника и автоматика» ТГТУ, аудитория № 232. Тел. (+99871) 246-46-00, факс (+99871) 227-10-32, e-mail: tstu\_info@edu.uz).

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

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 года.  
(реестр протокола рассылки № \_\_\_\_ от «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.).

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

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

**Н.Ф. Зикриллаев**  
председатель научного семинара при  
Научном совете по присуждению ученых  
степеней, д.ф.-м.н., профессор

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

**Актуальность и востребованность данной темы диссертации.** В настоящее время в мире очень интенсивно ведутся работы по разработке технологии получения объёмно наноструктурированных полупроводниковых материалов и исследованию их свойств. Это связано с достаточно широкими возможностями таких материалов, чем у одномерно наноструктурированных материалов, позволяющих создать на их основе принципиально новые оптоэлектронные и фотомагнитные приборы и высокоэффективные солнечные элементы. Одним из современных перспективных способов создания новых наноструктур в решетке кристалла является управляемое взаимодействие микро- и нанокластеров полученных в кристаллической решетке с дефектами полупроводникового материала.

На сегодняшний день в мире большое внимание уделяется исследованию стабильности нанокластеров введенных примесных атомов при различных внешних воздействиях, таких как термоотжиг и влияние радиационного облучения, а так же влияния других примесных атомов. Решение данных задач очень важно и актуально не только для более глубокого понимания механизма формирования нанокластеров введенных примесных атомов, но и для практического использования данных материалов при разработке различных новых приборов, при изготовлении которых данные материалы подвергаются различным внешним воздействиям.

В соответствии со Стратегией действий по дальнейшему ускоренному развитию Республики, особое внимание уделяется вопросам стимулирования научно-исследовательской и перспективной инновационной деятельности, создания эффективных актуальных механизмов внедрения инновационных достижений в практику. Поддержке активного реального предпринимательства, перспективных инновационных идей и технологий, нацеленных на получение научных результатов, отвечающих современным требованиям. В том числе важнейшей задачей наноэлектроники является получение кремния с нанокластерами (квантовыми точками), устойчивому к внешним воздействиям, который может использоваться для изготовления полупроводниковых приборов со стабильными параметрами. В этом аспекте весьма актуальной задачей является определение взаимодействия кластеров атомов никеля и марганца с дефектами решетки кремния и определение влияния внешнего радиационного  $\gamma$ -облучения и термоотжига на стабильность данных кластеров, позволяющие создать на их основе высокостабильные приборы микроэлектроники и оптоэлектроники.

Исследования, выполненные в диссертационной работе в определенной степени служат выполнению задач, предусмотренных в Указе Президента Республики Узбекистан УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 гг.» от 7 февраля 2017 года, № ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-

исследовательской деятельности» и в постановлениях Президента № ПП-3899 «О мерах по повышению эффективности системы интеграции научной и инновационной деятельности» от 6 августа 2018 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Данная диссертационная работа была выполнена в полном соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан: ППИ-3 – «Энергетика, энергоресурсосбережение, транспорт, машино- и приборостроение».

**Степень изученности проблемы.** В настоящее время специалисты в области нанотехнологии и нанoeлектроники уделяют большое внимание проблемам получения примесных кластеров и в частности технологии получения бинарных кластеров на основе различных примесей с управляемой структурой и составом. В своих работах М.Г. Мильвидский, И.В. Бажин, Ю.А. Астров изучили распределение и состояние примесных кластеров в различных полупроводниках. Атомную структуру нанокластеров и их межатомное взаимодействие с различными примесными атомами исследовали Е.А. Михайлов, А.Т. Косилов, Таскин Тишковский. Взаимодействие примесных атомов с различными радиационными дефектами в кремнии исследовали Т.А. Пагава, А.А. Лебедев, А.П. Долголенко, наличие кадмия в кремнии исследовали Bayu L.B, Wallace J.B, Lin Y.R, Chen L.C, Nakai K, Hrant N, взаимодействие с термодefектами исследовалось Е.А. Климановым, Е. Weber, H.G. Riotte, Zhang Xiangli, Sun Zhaowei.

В Узбекистане академиком А.Т. Мамадалимовым исследовалось температурное гашение фотопроводимости кремния легированного различными примесями, в научной школе академика Р.А. Муминова был разработан детектор ядерного излучения на основе кремния легированного литием. В работах Ш. Махкамова, Н.А. Турсунова, К.П. Абдурахманова разработан способ управления радиационными дефектами в кремниевых приборах. Ш.Б. Утамурадова, С. Зайнобиддинов и Н.А. Тургунов изучали образование примесных микровключений никеля и марганца в кремнии. В научной школе академика М.К. Бахадырханова, профессорами Н.Ф. Зикриллаевым, Г.Х. Мавлоновым и Х.М. Илиевым было научно обосновано формирование магнитных нанокластеров в кремнии. Исследования внешних факторов на физические процессы в МДП – структурах были очень подробно изучены К.А. Исмайловым и С.И. Власовым.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного или научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационная работа была выполнена на кафедре ТГТУ «Цифровая электроника и микроэлектроника» согласно программе государственных грантов: ЁФ-2-06 «Исследование влияния радиационного облучения и термического отжига на состояние примесных кластеров в решетке кремния» в 2009-2012 годах. ОТ-Ф2-55 «Разработка научных основ получения объёмно

наноструктурированного кремния на основе формирования примесных кластеров как нового класса наноматериалов с уникальными функциональными возможностями» (2017-2020).

**Целью исследования** является исследование взаимодействия кластеров атомов никеля и марганца с дефектами решетки кремния.

**Задачи исследования:**

определить влияние концентрации и типа исходных имеющихся примесных атомов (кислород, бор и фосфор) на формирование и взаимодействие примесных кластеров никеля;

определить технологию диффузии (скорость охлаждения и конечная температура) обеспечивающую формирование кластеров никеля и марганца в кремнии с необходимыми параметрами;

определить влияние дополнительного термоотжига и  $\gamma$ -облучения на стабильность электронейтральных и магнитных кластеров никеля в кремнии;

определить влияние  $\gamma$ -облучения на стабильность магнитных, электрических и фотоэлектрических свойств кремния с кластерами примесных атомов;

выявить взаимодействие элементов VI группы (S, Se, Te) с кластерами атомов марганца и их влияние на фотоэлектрические и магнитные свойства кремния.

**Объектом исследования** является монокристаллический кремний марки КДБ и КЭФ с различной концентрацией кислорода, бора и фосфора, легированный атомами марганца, никеля, серы и селена.

**Предметом исследования** является технологический процесс управления параметрами и свойствами кластеров никеля и марганца в кристаллической решетке кремния, при наличии воздействия радиации, термоотжига, а также других примесных кластеров.

**Методы исследований.** Методами микронзондового анализа (установка Joel JXA-8800R), ИК-микроскопии (ИНФРАМ-И), а также АСМ (Dimension 3000) было исследовано образование кластеров, изменение их структуры, размера и плотности. На основе гальваномагнитных исследований (эффект Холла) исследовано взаимодействие кластеров никеля с точечными структурными дефектами решетки кремния. Взаимодействие кластеров атомов марганца с примесями серы и селена исследовалось с помощью изучения спектральной фотопроводимости (ИКС-21) и гальваномагнитных исследований. На основе теоретических расчетов, используя статистику Ферми-Дирака, определены концентрации введенных примесных атомов участвующих в кластерообразовании.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

установлено, что концентрация и тип исходных мелких примесных атомов (бора и фосфора) практически не влияет на параметры и кинетику образования кластеров никеля в объеме кристаллической решетки кремния;

показана возможность управления концентрацией, размером и состоянием примесных кластеров никеля в кристаллической решетке кремния, путем

изменения скорости после диффузионного охлаждения образцов, а также выбором температуры и времени дополнительного термоотжига в области  $T=600\div 900$  °C;

установлено, что при больших дозах облучения  $\gamma$  – лучами ( $\Phi\sim 10^9$  P) происходит интенсивный распад кластеров никеля, в результате которого существенно на 2 порядка увеличивается концентрация электроактивных атомов никеля в узлах кристаллической решетки кремния;

под действием  $\gamma$ -излучения с дозой  $\Phi>10^6$  P кластеры атомов марганца распадаются и аномальные фото и магнитные свойства проявляющиеся за счет кластеров атомов марганца исчезают;

установлено, что наличие атомов VI группы (S, Se, Te) препятствует формированию примесных кластеров марганца в объёме кристаллической решетки кремния и приводит к существующему изменению электрофизических и магнитных свойств кремния с кластерами атомов марганца;

показана возможность формирования новых наноструктур с участием атомов марганца и элементов VI группы в виде  $Si_2 Mn^{-} S^{++}$ ,  $Si_2 Mn^{-} Se^{++}$ ,  $Si_2 Mn^{-} Te^{++}$  в решетке кремния;

определены оптимальные термодинамические условия формирования таких наноструктур в решетке кремния для атомов серы и марганца при температуре  $T=1100$  °C, селена и марганца при  $T=820$  °C, теллура и марганца при  $T=650$  °C соответственно.

#### **Практические результаты исследования:**

установлены оптимальные термодинамические условия управления параметрами, составом и кинетикой формирования примесных кластеров никеля в кремнии;

показана возможность увеличения концентрации электроактивных атомов никеля на два порядка при облучении кремния  $\gamma$ - излучением с дозой  $10^9$  P, что позволяет расширить физические возможности кремния с кластерами никеля при разработке новых приборов;

показана возможность формирования новых бинарных кластеров атомов марганца и элементов VI группы (S, Se, Te), которая позволяет управлять фундаментальными параметрами кремния.

установлены условия стабильного состояния кластеров никеля и марганца в зависимости от температуры и дозы облучения, что очень важно при использовании таких материалов в разработке радиационноустойчивых и термостабильных электронных приборов.

**Достоверность результатов исследований** обеспечивается применением традиционных, хорошо апробированных экспериментальных методов, а также большим количеством полученных экспериментальных данных и воспроизводимостью полученных результатов. Соответствием физической интерпретации экспериментальных результатов современным теоретическим представлениям. Полученные результаты широко обсуждались на многих международных научных семинарах и конференциях.

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

Результаты полученные в диссертации с одной стороны существенно расширяют физику формирования и взаимодействия примесных кластеров. А с другой стороны показывают возможность создания объемно наноструктурированных полупроводниковых материалов с управляемыми параметрами наноструктур, как нового класса полупроводниковых материалов.

Полученные результаты могут найти широкое применение при создании идеальных микро- и нано- размерных диодов Шоттки, гетеропереходов с идеальными параметрами, а также микро- и нано- варизонных структур в решетке кремния на основе которых можно создать новые оптоэлектронные приборы, а также повысить радиационную устойчивость и термическую стабильность кремния в пределах дозы  $\gamma$ - облучения  $10^5 \div 5 \cdot 10^7$  Р и температуры  $T=600$  °С.

**Внедрение результатов исследования.** Метод повышения стабильности параметров полупроводниковых приборов к радиационному облучению, путем использования материала с примесными кластерами марганца и никеля в кремнии был внедрен и использован в производстве акционерным обществом «FOTON» (Справка № 02 – 1875 акционерной компании «Ўзэлтехсаноат» от 25 августа 2018 года). Применение научных результатов дает возможность повышения стабильности к радиационному облучению производимых АО «FOTON» полупроводниковых приборов на основе монокристаллического кремния.

Разработанная технология получения наноструктур нового класса типа  $\text{Si}_2\text{Mn}^{2+}\text{S}^{2+}$ ,  $\text{Si}_2\text{Mn}^{2+}\text{Se}^{2+}$ ,  $\text{Si}_2\text{Mn}^{2+}\text{Te}^{2+}$  на основе элементов шестой группы в решетке кремния также была применена в акционерном обществе «FOTON» (Справка №02 – 1875 акционерной компании «Ўзэлтехсаноат» от 25 августа 2018 года). Полученные научные результаты были применены при разработке совершенно новых оптоэлектронных приборов.

**Апробация результатов исследования.** Основные научные результаты представленной диссертационной работы были доложены и обсуждены на 9 международных и 7 республиканских научно-практических конференциях.

**Публикация результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано 24 научных труда из них 7 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

**Структура и объём диссертации.** Представленная диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и 101 списка использованной литературы. Текст диссертации изложен на 115 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** представленной диссертации показана востребованность темы диссертации, определена связь проведенных исследований с основными определенными приоритетными направлениями перспективного развития науки и технологий в республике, проведён обзор существующих международных научных исследований по теме диссертации, степень изученности проблемы, сформулированы цель и задачи, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также дана информация об объеме и структуре диссертации.

В первой главе **«Современное состояние проблемы изучения примесных кластеров в кремнии»** анализируются методы получения примесных кластеров в полупроводниках и рассматриваются результаты исследований влияния радиационных и термических дефектов на примесные кластеры в монокристаллическом кремнии, а также взаимодействие примесных атомов с радиационными и термическими дефектами в полупроводниках. Приведены результаты по межпримесному взаимодействию элементов переходной группы в кремнии.

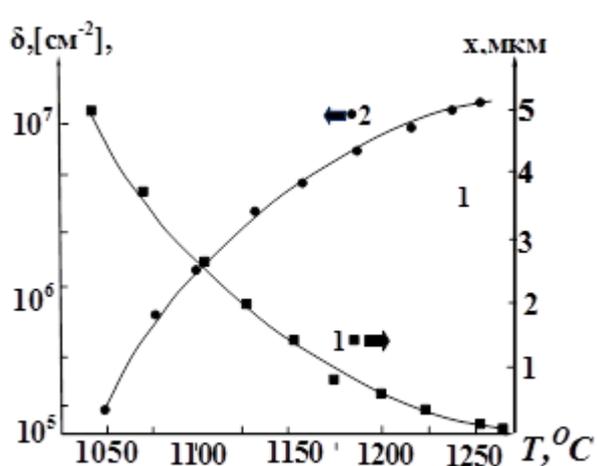
На основании анализа имеющихся теоретических и экспериментальных данных сформулированы задачи диссертации.

Во второй главе **«Технология получения образцов с кластерами примесных атомов и методы их исследования»** приведены хорошо обоснованные, оптимальные определенные термодинамические условия, а также технологические режимы обеспечивающие взаимодействие электронейтральных кластеров никеля сформированных в кремнии, разработанная технология формирования электронейтральных кластеров с управляемыми параметрами. Показано, что разработанная технология, позволяет максимально использовать введенные примесные атомы в образовании кластеров.

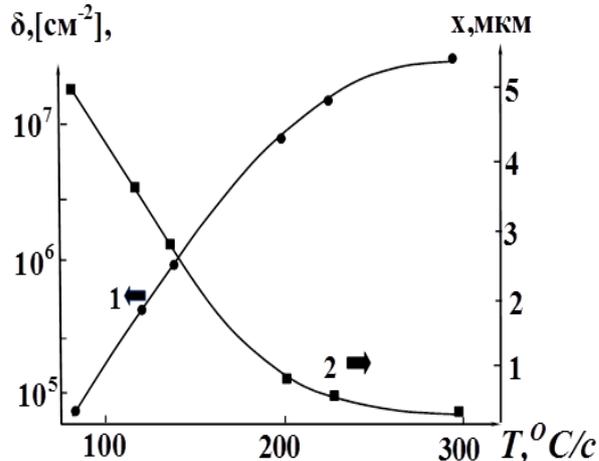
Исследования показали, что в образцах, где концентрация кислорода больше, плотность кластеров увеличивается в 2÷3 раза, но их размер уменьшается в два раза в сравнении с образцами выращенными методом бестигельной зонной плавкой. При этом определяющими факторами являются конечная температура диффузии, скорость охлаждения и температура дополнительного термоотжига. Исследовано влияние конечной температуры диффузии на состояние кластеров. Установлено, что с изменением температуры от  $T=1100$  °С до  $1250$  °С плотность кластеров увеличивается на 1,5 порядка, а их размер уменьшается в 5÷6 раз (рис. 1).

Определено влияния скорости охлаждения на состояние кластеров на основе Ni для этого, были изготовлены 3 партии образцов. В образцах подвергнутых охлаждению со скоростью 9~100 °С/с, наблюдается уменьшение плотности кластеров и увеличение их размера. В то же время в образцах,

охлажденных в диффузионной печи, не возможно наблюдать наличие каких либо кластеров не только на поверхности, но и по всему объему. Установлено, что меняя условия диффузии, можно управлять плотностью и размером кластеров. Для получения кластеров с воспроизводимыми параметрами, оптимальной скоростью охлаждения является  $200 \div 300 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}$  (рис. 2).



**Рис. 1. Изменение параметров кластеров сформированных на основе никеля в зависимости от температуры в конце диффузии**



**Рис. 2. Влияние скорости охлаждения на параметры кластеров сформированных на основе атомов никеля**

Результаты проведенных исследований свойств образцов с кластерами подвергнутых низкотемпературному отжигу с различной температурой показаны на рис. 3. До температуры термоотжига равной  $600 \text{ } ^\circ\text{C}$  независимо от времени отжига ( $t=0 \div 10$  часов), электрические параметры исследуемых образцов не меняются, т.е. они сохраняют свои исходные значения.



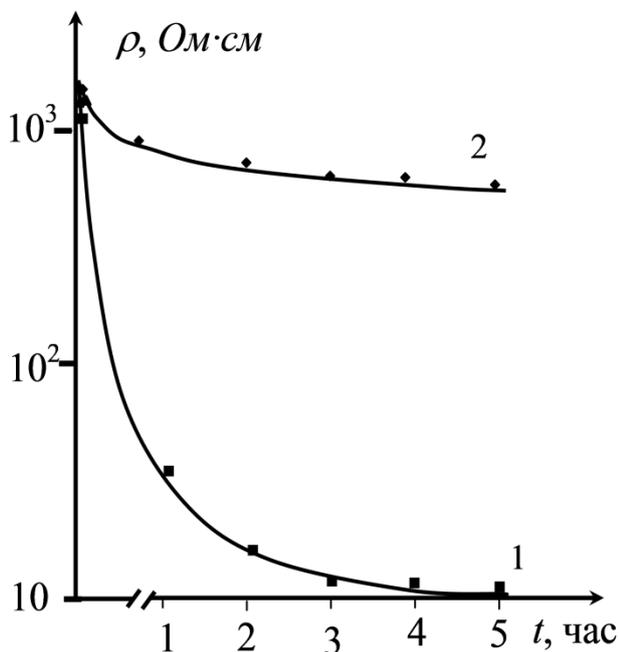
1 -  $T=600 \text{ } ^\circ\text{C}$  -  $(3 \div 5) \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$ ,  $4 \div 5 \text{ мкм}$ , 2 -  $T=800 \text{ } ^\circ\text{C}$  -  $(2 \div 4) \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$ ;  $2 \div 3 \text{ мкм}$  3 -  $T > 900 \text{ } ^\circ\text{C}$

**Рис. 3. Состояние кластеров никеля после низкотемпературного отжига**

При термоотжиге в интервале  $T=650 \div 800 \text{ } ^\circ\text{C}$  происходит укрупнение и упорядочение кластеров. Концентрация электроактивных атомов Ni уменьшается почти в  $3 \div 5$  раза, а в результате термоотжига при  $T > 900 \text{ } ^\circ\text{C}$  образцы приобретают свои исходные параметры (рис. 3). Таким образом установлено, что кластеры сформированные на основе Ni в кремнии обеспечивают достаточно высокую термостабильность электрофизических параметров образцов в интервале дополнительного термоотжига  $T=100 \div 600 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,

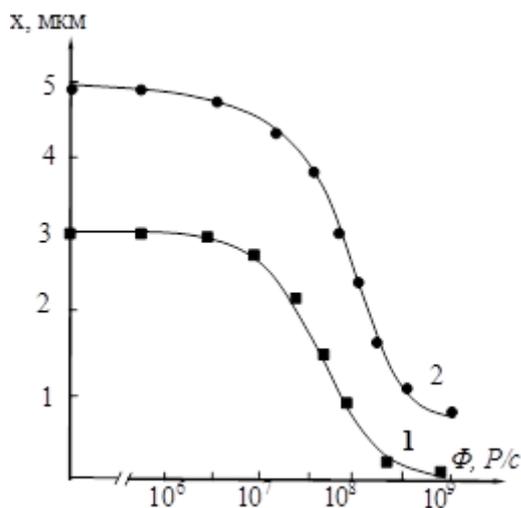
независимо от времени отжига. Это связано с распадом кластеров сформированных на основе атомов Ni, или разделением их на мелкие частицы, которые не возможно визуалью наблюдать.

Установлено, что в области термоотжига  $T \leq 120$  °C начинается



1.  $T \leq 120$  °C, образцы без кластеров
2.  $T \leq 120$  °C, образцы с кластерами

**Рис. 4. Влияние низкотемпературного отжига на состояние кластеров атомов марганца**



1.  $x \sim 1 \div 3$  мкм
2.  $x \sim 3 \div 5$  мкм

**Рис. 5. Влияние  $\gamma$  облучения на размеры кластеров никеля в кремнии**

кремнии. Изготовлены 3 партии образцов с различной плотностью и размером кластеров. Результаты показали, что начиная с дозы  $10^8$  P происходит уменьшение размеров кластеров, это заметно в таких образцах, где кластеры

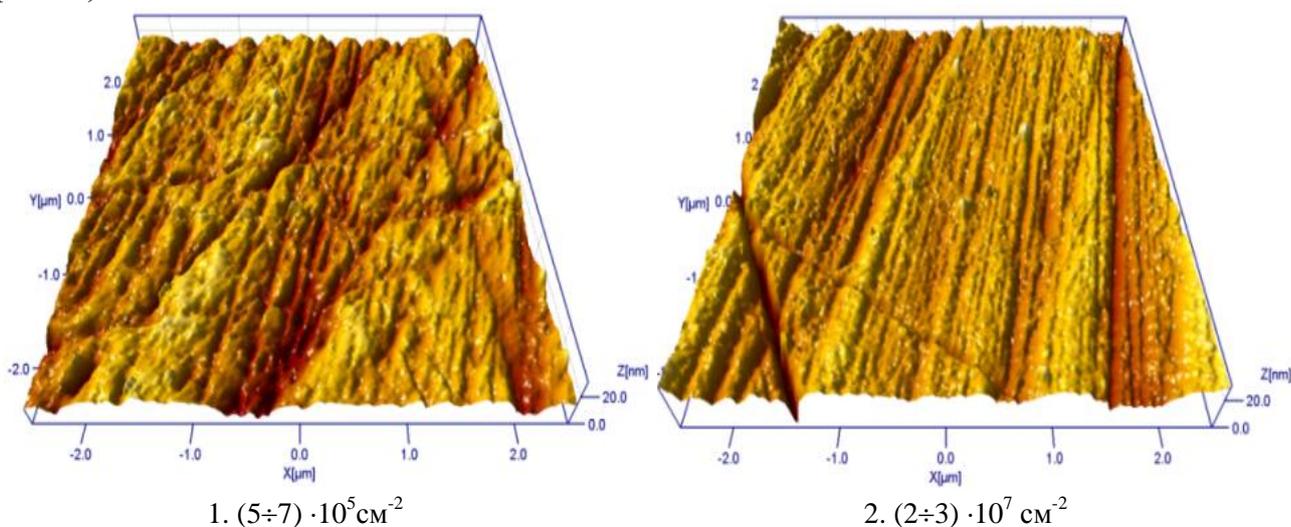
существенное изменение  $\rho$  кремния с марганцем без кластеров. При  $t=5$  часов, образцы приобретают свои исходные параметры, т.е. имеется интенсивный распад. С ростом температуры этот процесс ускоряется (рис. 4). В образцах с кластерами практически до  $T \leq 120$  °C (рис. 4, крив. 2) не происходит заметного изменения электрических параметров и в них наблюдается ОМС и высокая фоточувствительность в области  $\lambda=1,5 \div 8$  мкм. При длительности отжига ( $t=3 \div 5$  час) образцы приобретают исходные параметры, т.е. имеется исчезновение кластеров и их распад (рис. 4).

В третьей главе «Взаимодействие кластеров сформированных на основе атомов никеля и марганца с дефектами решетки кремния» рассматривается взаимодействие кластеров сформированных на основе никеля и кластеров сформированных на основе марганца с радиационными дефектами, образующимися при  $\gamma$ -облучении. Кластеры сформированные на основе марганца в решетке Si можно рассматривать как квантовые точки.

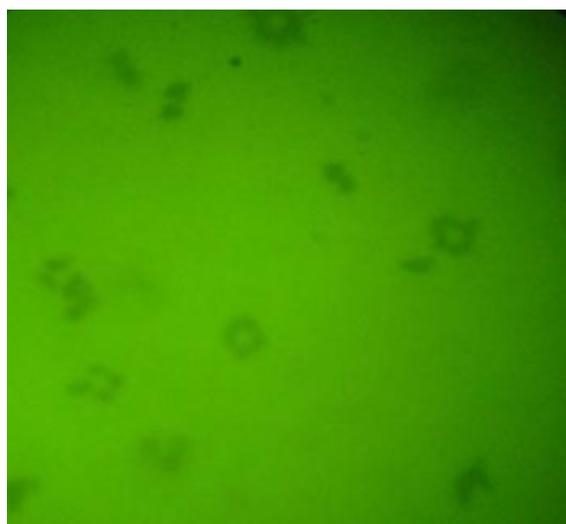
Исследовано влияния  $\gamma$  - облучения на состояние кластеров сформированных на основе никеля в

имеют большие размеры (3÷5 мкм). На рис. 5 представлено состояние кластеров образцов, облученных при различных дозах облучения.

Как показывают расчеты размеры кластеров уменьшаются в 2÷3 раз, а их плотность не меняется. В образцах с высокой плотностью и маленькими размерами кластеров (образцы I-партии), облученных с  $10^9$  Р из-за уменьшения размеров кластеров, наблюдать их состояние было трудно. Это связано с тем, что разрешающей способности ИК- микроскопа было не достаточно для наблюдения мелких кластеров. Поэтому нами были исследованы образцы на сканирующем зондовом микроскопе АСМ. Результаты показали, что кластеры практически превращаются в нанокластеры с размером порядка 10÷50 нм (рис. 6).



**Рис. 6. Распределение кластеров никеля на поверхности и по глубине образцов до 20 мкм, после облучения  $\Phi > 10^9$  Р**



а)  $\sim 10^8$  Р



б)  $> 10^8$  Р

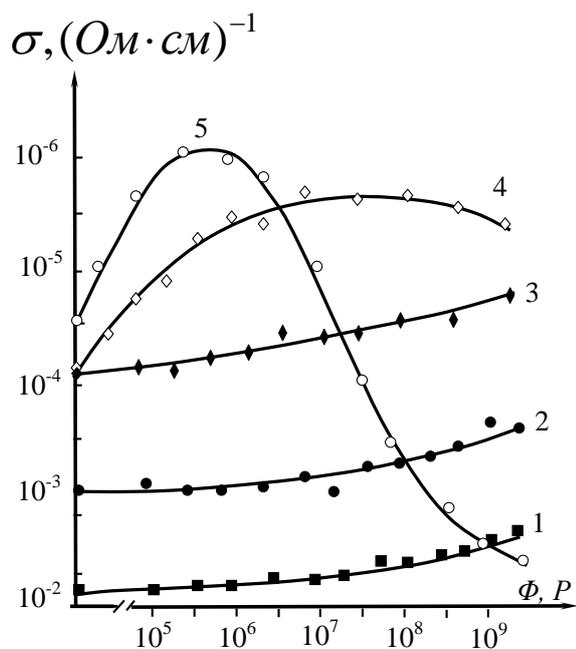
**Рис. 7. Кластерные петли кремния легированного никелем при различных дозах  $\gamma$ -облучения**

Образцы кремния полученного бестигельной зонной плавкой, в которых обычно наблюдаются кластерные петли также подвергались облучению в

аналогичных условиях. При высоких дозах  $\gamma$ -облучения ( $>10^8$  P), хотя размер кластерных петель заметно не меняется, размер кластеров, которые участвуют в образовании петель заметно уменьшается и поэтому имеет место разрыв между кластерами (рис. 7).

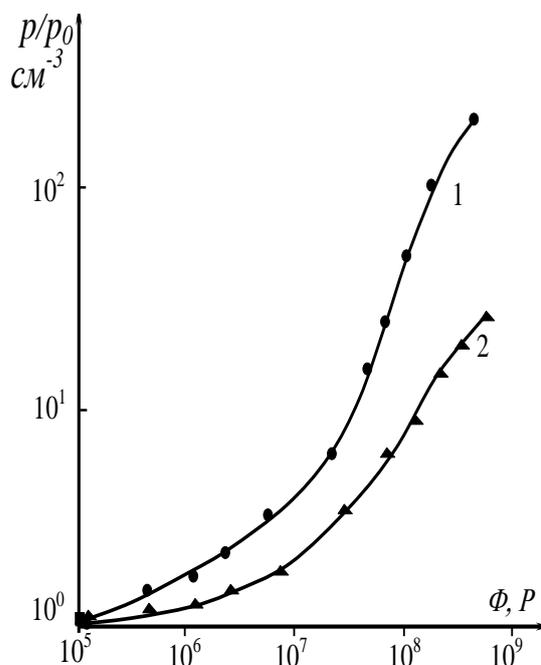
Результаты исследования убедительно показали, что в образцах с высокой плотностью кластеров никеля, электрические свойства образцов существенно не меняются в интервале дозы облучения  $\leq 10^8$  P.

Как видно из рис. 8, начиная с дозы  $10^8$  P удельная проводимость образцов уменьшается и при дозе  $7 \cdot 10^8$  P происходит инверсия типа наблюдаемой проводимости, т.е. материал становится p – типа и в дальнейшем его удельная проводимость увеличивается с ростом дозы облучения. Эти данные позволяют сделать заключение, что при больших дозах из – за увеличения неравновесной концентрации вакансий и распада кластеров, отдельные междоузельные атомы никеля захватываются вакансиями и они выступают в виде акцепторов.



1 -  $8,3 \cdot 10^{-3} (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$ , 2 -  $9 \cdot 10^{-4} (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$ ,  
 3 -  $2 \cdot 10^{-5} (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$  (p-тип),  
 4 -  $2 \cdot 10^{-4} (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$ , 5 -  $2,5 \cdot 10^{-5} (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$  (n-тип)

**Рис. 8. Изменение проводимости образцов Si<Ni> при различной дозе облучения**



1 -  $(2 \div 3) \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$   
 2 -  $(5 \div 7) \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$

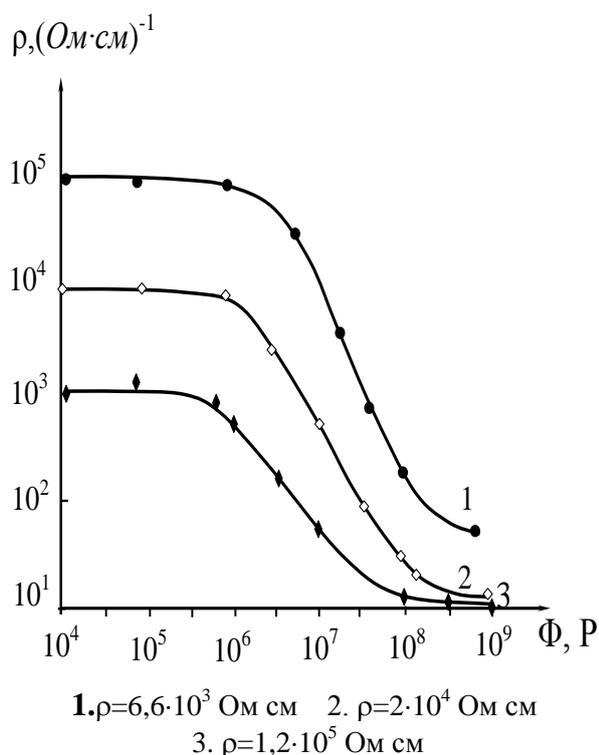
**Рис. 9. Относительное изменение концентрации электроактивных атомов никеля в кремнии при  $T=300$  К от дозы облучения**

При взаимодействии кластеров и при больших дозах облучения можно увеличить концентрацию электроактивных введенных атомов никеля на  $1,5 \div 2$  порядка (рис. 9). Это может служить способом управления концентрацией электроактивных введенных атомов никеля в кремнии.

Результаты исследования убедительно показали, что во-первых в них также наблюдается увеличение концентрации дырок, связанное с активацией атомов никеля, и аналогичные энергетические уровни, а во – вторых концентрация атомов никеля, активированных в результате облучения, уменьшается с уменьшением плотности кластеров.

Таким образом, в кремнии с кластерами при облучении генерирование дырок происходит за счет активации электронейтральных атомов никеля.

Изменение удельного сопротивления зависит от кратности зарядового состояния кластеров и с уменьшением последнего, сдвигается в сторону больших доз облучения (рис. 10, крив. 1 и 3). При дальнейшем увеличении дозы облучения до  $10^6$  Р,  $\rho$  образцов существенно уменьшается до  $\rho=10\div 15$  Ом·см, т.е. образцы практически приобретают исходные параметры кремния р-типа до диффузии марганца.



**Рис. 10. Зависимость  $\rho$  образцов Si от дозы  $\gamma$ - облучения**

фоточувствительности образцов Si практически сохраняют свои характеристики как до облучения.

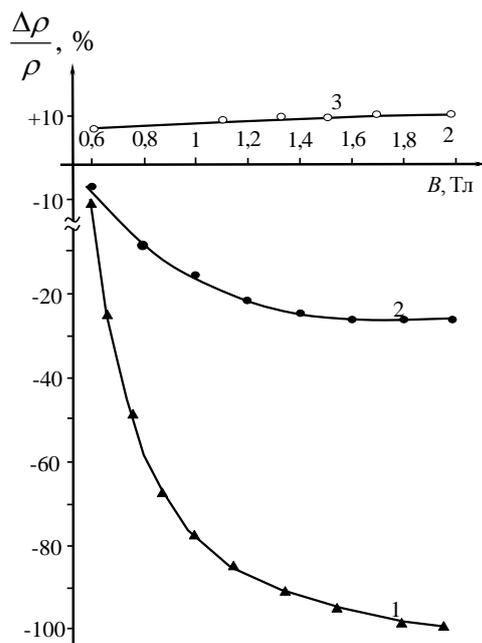
Начиная с дозы  $\Phi > 5 \cdot 10^5$  Р свойства образцов меняются, т.е. примесная фоточувствительность образцов с ростом дозы облучения существенно уменьшается, а при дозах  $\Phi > 10^6$  Р, практически приобретает фоточувствительность образцов без кластеров (рис. 12).

Исследование магнитных свойств образцов показало, что с ростом дозы облучения  $\Phi \sim 5 \cdot 10^5$  Р, значение ОМС уменьшается, при  $\Phi > 10^6$  Р, наблюдается инверсия знака магнитосопротивления, т.е. ОМС переходит в положительное магнитосопротивление, значение которого практически не зависит от величины приложенного магнитного поля (рис. 11).

типа до диффузии марганца.

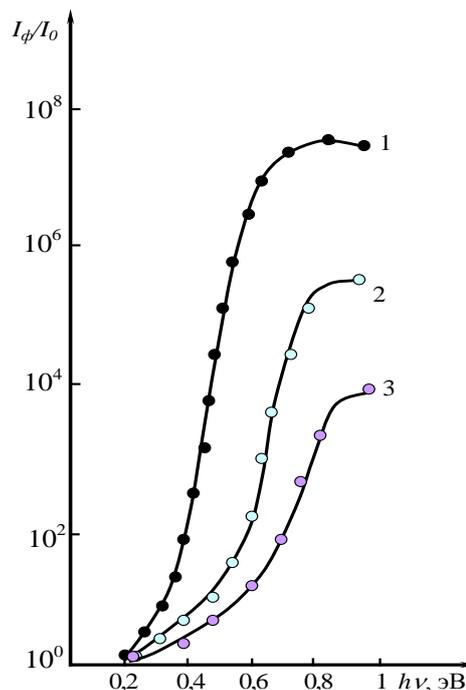
Облучению подвергались образцы с кластерами марганца с одинаковым удельным сопротивлением. После каждого этапа  $\gamma$ - облучения электрические, магнито – и фотоэлектрические свойства полученных образцов исследовались в идентичных условиях.

Результаты исследования показали, что в образцах наблюдается аномально большое ОМС (рис. 11, крив. 1), а также гигантская примесная фотопроводимость (рис. 12, крив. 1). Образцы подвергались  $\gamma$ - облучению ( $\text{Co}^{60}$ ) в интервале доз  $\Phi=10^3\div 10^6$  Р при температуре  $T=-70$  °С. До дозы облучения  $\Phi=1 \cdot 10^5$  Р значение ОМС и спектральная область



1.  $\Phi=0$ ; 2.  $\Phi=1 \cdot 10^5 \text{P}$ ;

**Рис. 11. Зависимость магнитосопротивления образцов кремния с кластерами атомов марганца от дозы облучения,  $T=300\text{K}$ ,  $E=100\text{V/cm}$**



3.  $\Phi=5 \cdot 10^6 \text{P}$

**Рис. 12. Спектральная зависимость фотопроводимости исследуемых образцов  $\text{Si}\langle\text{B}, \text{Mn}\rangle$ , после различных доз облучения**

В четвертой главе «**Взаимодействие кластеров атомов марганца с элементами VI группы**» исследовано взаимодействие кластеров сформированных на основе атомов марганца с примесными атомами S, Se и Te, как при одновременном, так и при последовательном легировании. При оптимальных условиях отжига, после диффузионного легирования, в образцах кремния с примесными атомами марганца при последующем дополнительном легировании элементами VI группы происходит взаимодействие Mn с примесями S, Se и Te. Показана возможность формирования наноструктур нового типа  $\text{Si}_2\text{Mn}^{2-}\text{S}^{2+}$ ,  $\text{Si}_2\text{Mn}^{2-}\text{Se}^{2+}$ ,  $\text{Si}_2\text{Mn}^{2-}\text{Te}^{2+}$ , которые образуются в решетке кремния без существенного нарушения химической связи.

Нами исследовано влияние температуры диффузии на взаимодействие кластеров атомов марганца с атомами селена, серы и теллура. Установлено, что для исходного кремния p-типа с  $\rho \sim 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  температура диффузии  $1100^\circ\text{C}$  является самой оптимальной температурой для формирования кластеров с максимальным участием введенных атомов серы и марганца. Для этого были подготовлены 3 партии образцов Si легированные серой, марганцем и серой с марганцем. Все три партии исследуемых образцов в отдельных откачанных кварцевых ампулах отжигались в одинаковых условиях и имели одинаковые скорости охлаждения. После диффузионной обработки, измерение электрических параметров всех образцов, полученных при различных температурах отжига, проводилось идентично. В таб. 1 приведены значения электрических параметров образцов всех видов, полученных при  $1100^\circ\text{C}$ . Как,

видно из таблицы образцы Si<В,Mn>, становятся р- типом с аномально маленькими значениями подвижности для дырок. Такое поведение подвижности характерно для образцов с многозарядными нанокластерами образцов марганца. Образцы Si<В,S> становятся n-типом, т.е. перекомпенсированными при положении уровня Ферми  $F=E_C-0,28$  эВ. В таких образцах основная часть атомов серы находится в состоянии  $S^{+}>>S^{++}$ .

**Таблица 1**

**Основные параметры полученных образцов, после легирования при  $T=1100^{\circ}\text{C}$ ,  $t=56$  часов**

Образцы	$\rho$ , [Ом·см]	Тип	$\mu$ , [см <sup>2</sup> /В·с]	$N^*$ , [см <sup>-3</sup> ]
Исходный материал	10	р	245	$5 \cdot 10^{15}$
Si<В,Mn>	$6,1 \cdot 10^3$	р	100	$1,1 \cdot 10^{13}$
Si<В,S>	10,2	n	1270	$5 \cdot 10^{14}$
Si<В,Mn,S>	20	р	260	$1,8 \cdot 10^{15}$

Как видно из таблицы 1, электрические параметры образцов одновременно легированных S и Mn, полностью совпадают с параметрами исходного материала, т.е. как будто в них нет не только S и Mn, а также не образуется термодоноров. Результаты позволяют исключить возможность геттерирования примесных атомов или образование каких то твердых растворов с учетом примесных атомов Mn и S, которое затрудняет их диффузию в объеме кристалла. Таким образом в образцах Si<В,Mn,S> присутствуют как атомы S так и атомы Mn, с такой же концентрацией как и в образцах Si<В,Mn> и Si<В,S>.

Исследование имеющейся спектральной зависимости фотоэлектрических свойств Si<S>, показало, что наблюдаются энергетические уровни атомов S, а в образцах Si<В,Mn> наблюдается аномальная фотопроводимость для области  $h\nu=0,16 \div 0,8$  эВ, связанная с кластерами марганца в кремнии. В то же время в образцах Si<В,Mn,S>, Si<В,Mn,Se> и Si<В,Mn,Te>, не только не было обнаружено наличие энергетических уровней S, Se, Te или Mn, но в них так же практически не наблюдается фотопроводимости (рис. 14, крив. 2). Исследование магнитосопротивления образцов Si<В,Mn> показало, что в них при комнатной температуре наблюдается аномально высокое ОМС. На рис. 15 представлена зависимость магнитосопротивления полученная в образцах Si<В,S>, Si<В,Se>, Si<В,Mn,Te>, Si<В,Mn,S>, Si<В,Mn,Se> и Si<В,Mn,Te>. Аналогичные результаты имеются в образцах легированных последовательно, т.е. сначала S затем марганцем. Результаты дают возможность предполагать, что в образцах легированных одновременно серой и марганцем, не только не формируют кластеры марганца, но и практически все введенные атомы марганца и S находятся в электронейтральном состоянии. Потому что наличие атомов серы в кремнии с кластерами сформированными на основе атомов Mn разрушает или не позволяет, формировать нанокластеры и образуются электронейтральные комплексы между введенными атомами S и Mn. Как видно, в отличие от образцов Si<Mn>, в образцах Si<В,Mn,S>, Si<В,Mn,Se> и Si<В,Mn,Te> наблюдается только не большое ПМС (рис. 15, крив. 2).

Разработан многоэтапной диффузии, с поэтапным плавным увеличением температуры диффузии. Как показали результаты исследования, температура диффузии для исходного р-кремния с  $\rho \sim 5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  является  $T=1150 \text{ }^\circ\text{C}$  (таб. 2).

**Таблица 2**  
**Электрические параметры образцов после диффузии при  $T=1150 \text{ }^\circ\text{C}$**

Образцы	ТП	$\rho$ , Ом·см	$\mu$ , см <sup>2</sup> /В·с	n, p, см <sup>-3</sup>
Исходный материал	p	5,1	245	$5 \cdot 10^{15}$
Si <B,Mn>	p	$(3 \div 6) \cdot 10^3$	90÷120	$(2,3 \div 1,1) \cdot 10^{13}$
Si <B,Se>	n	25÷30	1150÷1200	$(2,5 \div 3) \cdot 10^{14}$
Si <B,Te>	n	9÷12	1100÷1150	$(5 \div 3) \cdot 10^{14}$
Si<B,Mn,Se>	n	25 ÷ 30	1150÷1200	$(2,5 \div 3) \cdot 10^{14}$
Si<B,Mn,Te>	n	9÷12	1100÷1150	$(5 \div 3) \cdot 10^{14}$

Взаимодействие между кластерами Mn и атомами Se и Te отсутствует. В таб. 3 приведены электрические параметры образцов Si<B,Mn>, Si<B,Se> и Si<B,Mn,Se> отожженных в течение 5 часов в интервале температур  $T=600 \div 850 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Таблица 3**  
**Электрические параметры образцов после низкотемпературного отжига**

Образцы	Температура отжига							
	600 <sup>o</sup> C		700 <sup>o</sup> C		750 <sup>o</sup> C		820 <sup>o</sup> C	
	ТП	$\rho$ , Ом·см	ТП	$\rho$ , Ом·см	ТП	$\rho$ , Ом·см	ТП	$\rho$ , Ом·см
Si<B,Mn>	p	3	p	2,5	p	3	p	3
Si<B,Se>	n	24	n	27	n	24	n	24
Si<B,Mn,Se>	n	$4 \cdot 10^4$	n	$2,5 \cdot 10^3$	p	$7 \cdot 10^2$	p	3

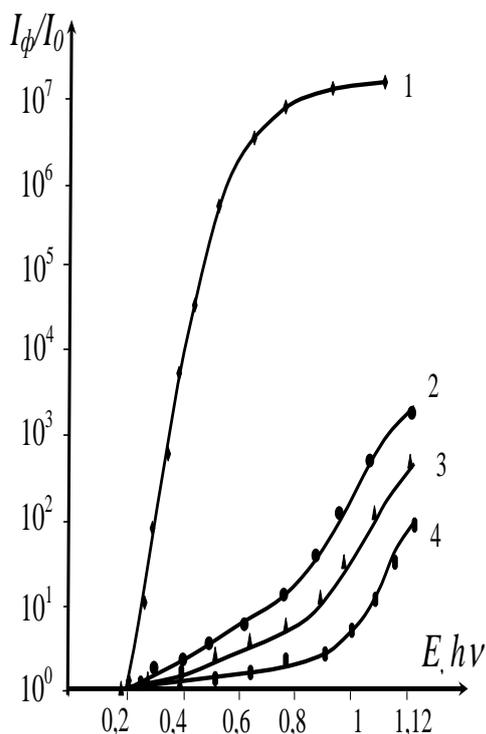
Как видно из таблицы 3 в исследуемой области температур, в образцах Si<B,Mn> происходит распад и образцы приобретают свои исходные параметры, электрические параметры образцов Si<B,Se>, почти не меняются, что свидетельствует о термостабильности твердого раствора.

Результаты существенно меняются в образцах Si<B,Mn,Se>, с повышением температуры отжига  $T > 600 \text{ }^\circ\text{C}$  удельное сопротивление образцов Si существенно увеличивается и при дальнейшем увеличении температуры происходит уменьшение  $\rho$ . При  $T=800 \text{ }^\circ\text{C}$  происходит инверсия проводимости и  $\rho$  существенно уменьшается, а при  $T=820 \div 830 \text{ }^\circ\text{C}$  они приобретают исходные электрические параметры т.е. переходят в до диффузионное состояние.

**Таблица 4**  
**Электрические параметры образцов после низкотемпературного отжига**

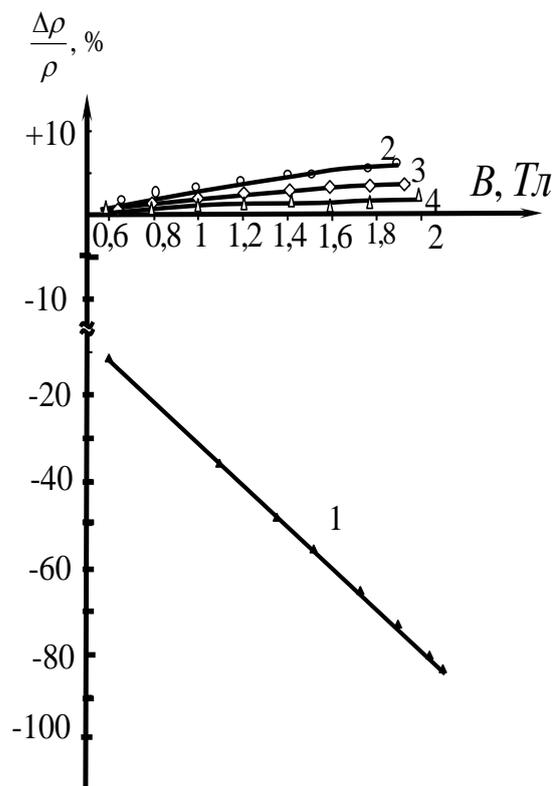
Образцы	Температура отжига							
	500 <sup>o</sup> C		550 <sup>o</sup> C		600 <sup>o</sup> C		650 <sup>o</sup> C	
	ТП	$\rho$ , Ом·см	ТП	$\rho$ , Ом·см	ТП	$\rho$ , Ом·см	ТП	$\rho$ , Ом·см
Si <B,Mn>	p	2,5	p	2,7	p	3	p	2,5
Si <B,Te>	n	11	n	11,5	n	12	n	11
Si <B,Mn,Te>	n	$2,5 \cdot 10^2$	n	$6 \cdot 10^4$	p	$1,2 \cdot 10^2$	p	2,7

В таблице 4 приведено влияние низкотемпературного отжига в области  $T=500\div 650$  °C на электрические параметры образцов Si<B,Mn>, Si<B,Te> и Si<B,Mn,Te>.



1. Si<B,Mn> (с кластерами).. 2. Si<B, Mn,S>.

**Рис. 13. Спектральная зависимость фотопроводимости**

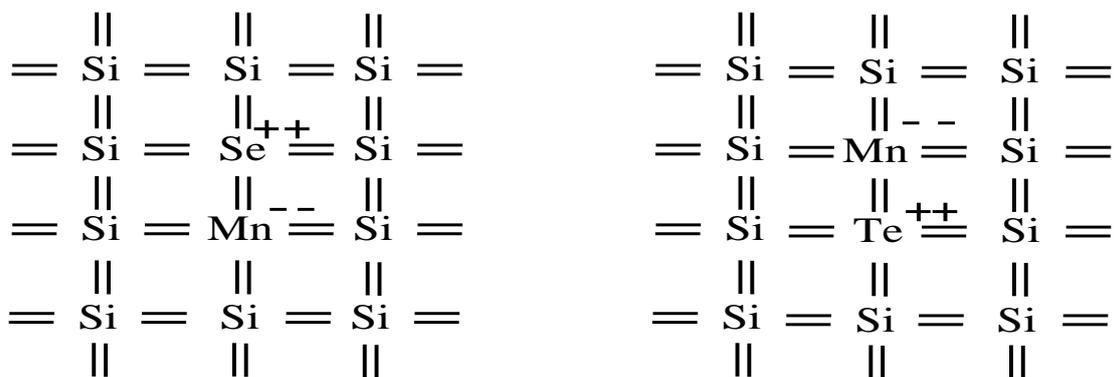


3. Si<B, Mn,Se> 4. Si<B, Mn,Te>

**Рис. 14. Зависимость магнитосопротивления образцов Si с кластерами примесных атомов от величины магнитного поля,  $T=300$  К**

Si<B,Mn> обладает гигантской примесной фотопроводимостью в области  $\lambda=1,5\div 8$  мкм (рис. 13, крив. 1) и в нём наблюдается аномально высокое отрицательное магнитное сопротивление (рис. 14, крив. 1). В образцах Si<B,Mn,S>, Si<B,Mn,Se>, Si<B,Mn,Te>, а также в Si<B,Se> и Si<B,Te>, имеет место незначительное положительное магнитосопротивление, значение которого очень слабо зависит от величины магнитного поля (рис. 14, крив. 3, 4), в этих образцах наблюдается более слабая фотопроводимость чем в Si (рис. 13, крив .3, 4).

На основе результатов исследования показано взаимодействие кластеров сформированных на основе атомов марганца в кремнии с атомами серы, а также установлено, что эффективная температура формирования многокомпонентных кластеров составляет  $T=1100$  °C,  $820$  °C,  $650$  °C соответственно для кластеров  $Si_2 Mn^{2-} S^{2+}$ ,  $Si_2 Mn^{2-} Se^{2+}$ ,  $Si_2 Mn^{2-} Te^{2+}$ . Такая закономерность возможно связана с энергетическим состоянием внешних электронов S, Se и Te, участвующих в формировании кластеров (рис. 15).



**Рис. 15. Наноструктуры нового типа  $\text{Si}_2\text{Mn}^{2-}\text{Se}^{2+}$  и  $\text{Si}_2\text{Mn}^{2-}\text{Te}^{2+}$  в решетке кремния**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан многоэтапный способ легирования кремния стимулирующий взаимодействие примесных кластеров и обеспечивающий максимальное участие всех атомов в кластерообразовании.

2. Определены, методом микронзондового анализа на установке АСМ, Jeol JXA-8800R, а также инфракрасного микроскопа ИНФРАМ-И, состояние, плотность, распределение и другие параметры примесных кластеров никеля в кремнии.

3. Установлено, что при больших дозах облучения можно существенно уменьшить размер кластеров сформированных на основе атомов никеля и получить наноразмерные кластеры, равномерно распределенные по всему объему кристаллической решетки.

4. Установлено, что гамма-облучение можно использовать как новый технологический способ управления размером и концентрацией электроактивных введенных атомов никеля в кремнии.

5. Установлено, что кластеры сформированные на основе атомов марганца в кремнии распадаются при низких дозах облучения ( $>10^6$  Р) из-за сильного взаимодействия с вакансиями.

6. Определены оптимальные температуры отжига обеспечивающие максимальное участие введенных примесных атомов в формировании электронейтральных комплексов. Для атомов серы и марганца  $T=1100$  °С, селена и марганца  $T=820$  °С, теллура и марганца  $T=650$  °С.

7. Показано, что за счет образования молекулярных комплексов, в решетке кремния создаются электронейтральные комплексы, имеющие структуру  $\text{Si}_2\text{Mn}^{2-}\text{S}^{2+}$ ,  $\text{Si}_2\text{Mn}^{2-}\text{Se}^{2+}$  или  $\text{Si}_2\text{Mn}^{2-}\text{Te}^{2+}$ .

В заключении хочу выразить благодарность моему научному консультанту академику М.К.Бахадирханову, научному руководителю профессору Х.М.Илиеву и всему коллективу кафедры «Цифровая электроника и микроэлектроника» ТГТУ за помощь и поддержку, оказанные при выполнении моей диссертационной работы.

**SCIENTIFIC COUNCIL FOR AWARDING SCIENTIFIC DEGREES  
DSc.31.01.2019.FM/T.03.05 UNDER TASHKENT STATE TECHNICAL  
UNIVERSITY, ANDIJAN STATE UNIVERSITY**

---

**KARAKALPAK STATE UNIVERSITY  
TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

**SAPARNIYAZOVA ZLIKHA MAKHSETBAYEVNA**

**INTERACTION OF CLUSTERS OF NICKEL AND MANGANESE  
ATOMS WITH DEFECTS OF SILICON LATTICE**

**01.04.10- Physics of semiconductors**

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

**Tashkent – 2019**

**The theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under № B2018.3. PhD/FM286.**

Dissertation has been prepared at the Karakalpak State University and Tashkent State Technical University.

Abstract of the dissertation is posted in three (uzbek, russian, english (resume) languages on the website (tdtu.uz) and on Information and educational portal «Ziyonet» (www.ziyonet.uz).

**Scientific supervisor:** **Iliyev Khalmurat Midjitovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

**Official opponents:** **Utamurodova Sharifa Bekmuradovna**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor (NUU)

**Rasulov Rustam Yavkoichovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor (FSU)

**Leading organization:** **Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies**

Dissertation defense will be held on « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 at \_\_\_\_\_ at the meeting of Scientific Council number DSc.31.01.2019.FM/T.03.05 at the Tashkent State Technical University, Andijan State University (Address: 100095, 2 University Street, Tashkent, Uzbekistan. Phone/fax: (+99871) 246-46-00, (+99871) 227-10-32; e-mail: tsu\_info@edu.uz).

Dissertation is possible to review in Information-Resource Centre at the Tashkent State Technical University (registered under № \_\_\_\_). Address: 100095, 2 University Street, Tashkent, Uzbekistan. Phone/fax: (+99871) 246-03-41).

Abstract of dissertation sent out on « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019.

(Registry record № \_\_\_\_ on « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019).

**M.K. Bakhadir Khanov**

Chairman of Scientific Council on award of scientific degrees, DSc in physics and mathematics, professor, academician

**B.E. Egamberdiyev**

Scientific secretary of Scientific Council on award of scientific degrees, DSc in physics and mathematics, professor

**N.F. Zikrillayev**

Chairman of Scientific Seminar under Scientific Council on award of scientific degrees, DSc in physics and mathematics, professor

## INTRODUCTION (abstract of thesis of Doctor of Philosophy (PhD))

**The aim of the study** is to study the interaction of clusters of nickel and manganese atoms with defects of silicon lattice.

**The object of the study** is monocrystalline silicon of the silicon doped by boron and silicon doped by phosphorus with different concentrations of oxygen, boron and phosphorus doped with manganese, nickel, sulfur and selenium atoms.

**The scientific novelty of the research is as follows:**

It has been established that the concentration and type of the initial small impurity atoms (boron and phosphorus) have practically no effect on the parameters and kinetics of the formation of clusters of nickel atoms in the silicon lattice;

The possibility of controlling the concentration, size and state of clusters of nickel impurity atoms in a silicon lattice is shown by changing the cooling rate of samples after diffusion annealing, as well as the choice of temperature and time for additional thermal annealing in the range  $T = 600 \div 900$  °C;

It has been established that at high doses of irradiation with  $\gamma$  rays ( $\Phi \sim 10^9$  R), there is an intense decomposition of nickel atom clusters, as a result of which the concentrations of electroactive nickel atoms in the silicon lattice sites increase significantly by 2 orders of magnitude;

under the action of  $\gamma$  – radiation with a dose of  $\Phi > 10^6$  R, the manganese atom clusters decay and the anomalous photo and magnetic properties manifested due to manganese atom clusters disappear;

It has been established that the presence of atoms of group VI (S, Se, Te) prevents the formation of clusters of impurity manganese atoms in the silicon lattice and leads to the existing change in the electro-physical and magnetic properties of silicon with clusters of manganese atoms;

The possibility of the formation of new binary clusters with the participation of manganese atoms and Group VI elements in the form of  $\text{Si}_2 \text{Mn}^{2-} \text{S}^{2+}$ ,  $\text{Si}_2 \text{Mn}^{2-} \text{Se}^{2+}$ ,  $\text{Si}_2 \text{Mn}^{2-} \text{Te}^{2+}$  in the silicon lattice is shown.

The optimal thermodynamic conditions for the formation of such binary clusters in the silicon lattice for sulfur and manganese atoms at  $T = 1100$ °C, selenium and manganese at  $T = 820$ °C, tellurium and manganese at  $T = 650$ °C, respectively, are determined.

**The implementation of research results.** A method for increasing the stability of semiconductor devices to radiation exposure, using material with clusters of impurity atoms of manganese and nickel in silicon, was introduced and used in production by FOTON Joint-Stock Company (Reference No. 02 - 1875 of the Joint-Stock Company «ELTEKHSANOAT» of August 25, 2018). The application of scientific results makes it possible to increase the stability to radiation exposure of silicon-based semiconductor devices manufactured by FOTON, as.

The developed technology for producing nanostructures of the new class type  $\text{Si}_2 \text{Mn}^{2-} \text{S}^{2+}$ ,  $\text{Si}_2 \text{Mn}^{2-} \text{Se}^{2+}$ ,  $\text{Si}_2 \text{Mn}^{2-} \text{Te}^{2+}$  based on the sixth group elements in the silicon lattice was also applied in joint-stock company FOTON of the year (Information No. 02 - 1875 of the joint-stock company «ELTEKHSANOAT» of August 25, 2018).

Based on the application of the obtained scientific results, were applied in the development of completely new optoelectronic devices.

**The scope and structure of the thesis.** The thesis consists of an introduction, four chapters, conclusion, one hundred and eight list of references and applications. The text of the thesis is outlined on 115 pages.

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

**I бўлим (I часть; I part)**

1. Илиев Х.М., Исмаилов К.А., Сапарниязова З.М. Влияние гамма-облучения на состояние кластеров примесных атомов в кремнии // Узбекский физический журнал. Ташкент. 2016. – В.18(№2). – С. 90-94. [01.00.00; №5].
2. Bakhadyrkhanov M.K., Saparniyazova Z.M., Iliev Kh.M., Ismailov K.A. Interaction of multiply charged manganese nanoclusters with selenium and tellurium atoms in silicon // Inorganic materials, Moscow 2015, Vol. 51, No. 8, pp. 767-771. [№40; ResearchGate, IF=0,567], (Springer, Impact Factor 0,567).
3. Илиев Х.М., Сапарниязова З.М., Исмаилов К.А., Ережепов. М.Т, Маджитов М.Х. Влияние  $\gamma$ -облучения на состояние кластеров примесных атомов марганца в кремнии. // Вестник Каракалпакского отделения АН РУз. Нукус. - 2015. -№3(240). – С. 5-7. [05.00.00; №19].
4. Saparniyazova Z.M., Bakhadyrkhanov M.K., Sattarov O.E., Iliev Kh.M. Ismailov K.A., Norkulov N. and Asanov D.Zh Interaction between multiply charged manganese nanoclusters // Inorganic materials. Moscow 2012, Vol. 48, No. 4, pp. 325-328. [№40; ResearchGate, IF=0,376], (Springer, Impact Factor 0,376).
5. Iliev Kh.M., Saparniyazova Z.M., Ismailov K.A., Sattarov O.E., Nigmonkhodzhaev S Interaction of radiation defects with nickel atom clusters in silicon // Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2011. №5, pp. 12-14. [01.00.00; №14], (Springer, Impact Factor 0,289).
6. Iliev Kh.M., Saparniyazova Z.M., Ismailov K.A., Madzhitov M.Kh Formation of nanoclusters of gadolinium atoms in silicon // Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2011. №1, pp. 1-3. [01.00.00; №14], (Springer, Impact Factor 0,289).
7. Илиев Х.М., Исмаилов К.А., Саттаров О.Э., Сапарниязова З.М. Влияние  $\gamma$ -облучения на свойства кремния с нанокластерами атомов марганца // Доклады АН РУз. – Ташкент, 2011. – № 1.– С. 37-40. [01.00.00; №7].

**II бўлим (II часть; II part)**

8. Абдурахманов Б.А., Бахадырханов М.К., Зикриллаев Н.Ф., Исмаилов Б.К., Сайтов Э.Б., Исамов С.Б., Сапарниязова З.М. Функциональные возможности кремния с кластерами примесных атомов // «Использование возобновляемых источников энергии: новые исследования, технологии и инновационные подходы». – Ташкент, 2018 г. – с. 105-108.
9. Сапарниязова З.М. Асанов Д.Ж., Исмаилов Б.К., Исмаилов Т.Б. Влияние низкотемпературного отжига на взаимодействия нанокластеров атомов никеля в кремнии // Материалы республиканской научно-практической конференции «Инновационные технологии в науке и образовании». – Нукус, 2018г. – с. 64-66.
10. Бахадырханов М.К., Исмаилов К.А., Илиев Х.М., Сапарниязова З.М. Технология формирования нанокластеров в решетке кремния // Материалы

международной научно-практической конференции «Структурная релаксация в твердых телах». – Винница, 2015 г. – с. 159-161.

11. Сапарниязова З.М. Исследование влияния комплексообразования примесных атомов марганца с селеном и теллуром на фундаментальные свойства кремния // Материалы международной научно-практической конференции «Структурная релаксация в твердых телах». – Винница, 2015 г. – с. 178-179.

12. Сапарниязова З.М. Технология формирования бинарные кластеры в решетке кремния // Материалы республиканской конференции «Современные проблемы физики полупроводников». – Нукус, 2015 г.

13. Зикриллаев Н.Ф., Абдурахманов Б.А., Исамов С.Б., Содиков У.Х., Сайтов Э.Б., Сапарниязова З.М., Миркомилова М. Кремний с кластерами примесных атомов - как новый класс материалов для фотоэнергетики // Материалы республиканской научно-технической конференции «Актуальные проблемы использования альтернативных источников энергии». – Карши, 2014 г.

14. Илиев Х.М., Саттаров О.Э., Рахманов Б.Р., Тачилин С.А., Сапарниязова З.М., Асанов Д.Ж. Формирование бинарных нанокластеров примесных атомов в решетке кремния // Материалы международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». – Ташкент, 2013г. – с. 156-157.

15. Илиев Х.М., Мавлонов Г.Х., Дустмухаммедов Х., Камалов К., Гофуров Д., Сапарниязова З.М. Бинарные квазы примесных атомов в решетке кремния // Республика илмий-амалий конференция «Нанотехнология ва кайта тикланадиган энергия манбалари». – Карши, 2012 г. – С. 82-79

16. Исмаилов К.А., Сапарниязова З.М. Эффект упорядочения кластеров примесных атомов никеля в кремнии // Материалы республиканской научно-технической конференции «Замонавий физиканинг долзарб муаммолари». – Бухоро, 2012г. – С. 78-79.

17. Илиев Х.М., Абдурахманов Б.А., Сайдов Э., Гафуров Д., Сапарниязова З.М., Дусмухаммадов Х.А., Тачилин С.А. Технология формирования нанокластеров в решетке кремния // Материалы международной научно-практической конференции «Современные материалы, техника и технологии в машиностроение». – Андижон, 2012 г. – С. 144-147.

18. Илиев Х.М., Абдурахманов Б.А., Аюпов К.С., Сапарниязова З.М., Асанов Д.Ж., Саттаров О.Э. Вольт-амперная характеристика микробарьеров Шоттки кремний-кластер атомов никеля // Материалы международной научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики». – Саранск, 28-30 май, 2012 г. – С. 86-88.

19. Сапарниязова З.М., Саттаров О.Э., Илиев Х.М., Абдурахманов Б.А., Асанов Д.Ж. Влияние  $\gamma$ -облучения на состояние кластеров примесных атомов в кремнии // Материалы 3- международной научной конференции «Физика и физическое образование: достижения и перспективы развития». – Бишкек, 19-25 август, 2011 г. – С. 55.

20. Илиев Х.М., Абдурахманов Б.А., Сапарниязова З.М., Саттаров О.Э., Асанов Д.Ж. Термодинамические условия формирования нанокластеров примесных атомов в полупроводниках // Материалы 2-международной конференции

«Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниковых микро- и наноструктурах». – Фергана, 8-9 сентября, 2011 г. – С. 49-50.

21. Зикриллаев Н.Ф., Аюпов К.С., Саттаров О.Э., Сапарниязова З.М., Асанов Д.Ж. Бинарные кластеры примесных атомов в кремнии // Материалы республиканской конференции (с участием ученых стран СНГ) «Современные проблемы физики полупроводников». – Нукус, 23-25 ноября, 2011 г. – с. 109-111.

22. Исмаилов К.А., Илиев Х.М., Сапарниязова З.М., Саттаров О.Э., Зикриллаев Х.Ф. Влияние  $\gamma$ -облучения на свойства кремния с нанокластерами атомов марганца // Материалы четвертой международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». – Ташкент, 24-25 ноября 2010 г. – С. 197-198.

23. Норкулов Н., Сапарниязова З.М., Саттаров О.Э., Исмаилов К.А., Тачилин С.А. Эволюция формирования нанокластеров и многозарядных структур в решетке кремния // Материалы четвертой международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». – Ташкент, 24-25 ноября 2010 г. – С. 243-244.

24. Сапарниязова З.М. Влияние  $\gamma$ -облучения на свойства кремния с нанокластерами атомов марганца // Тизислар туплами, Ўзбекистоннинг инновацион тараққиёти- ёшлар нигоҳида «Физика фанининг бугунги ривожига истедодли ёшларнинг ўрни». – Тошкент, 8-9 апрель 2010 г. – С. 167-168.

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари  
«Тил ва адабиёт таълими» таҳририясида таҳрирдан ўтказилди.  
(«\_\_\_»\_\_\_\_\_2019 йил)

Босишга рухсат этилди: «\_\_\_»\_\_\_\_\_2019 йил.  
Бичими 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>, «Times New Roman»  
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.  
Шартли босма табағи 2.9. Адади: 100. Буюртма: № 69.

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»  
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.