

**АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.28.02.2018.FM.60.01
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

ТУРГУНОВ НОЗИМЖОН АБДУМАННОПОВИЧ

**КИРИШМА АТОМЛАРИ МИКРОБИРИКМАЛАРИ ҲОСИЛ
БЎЛИШНИНГ ФИЗИК АСОСЛАРИ ВА УЛАРНИНГ
МОНОКРЕМНИЙ ХУСУСИЯТЛАРИГА ТАЪСИРИ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Андижон – 2018

Докторлик (DSc) диссертацияси автореферати мундарижаси

Оглавление автореферата докторской (DSc) диссертации

Contents of the doctoral (DSc) dissertation abstract

Тургунов Нозимжон Абдуманнопович Киришма атомлари микробирикмалари ҳосил бўлишининг физик асослари ва уларнинг монокремний хусусиятларига таъсири	3
Тургунов Нозимжон Абдуманнопович Физические основы образования микровключений примесных атомов и их влияние на свойства монокремния	35
Turgunov Nozimjon Abdumannopovich Physical bases of education microinclusions of impurity atoms and their influence on properties of monosilicon	65
Эълон қилинган ишлар рўйхати Список опубликованных работ List of published works	69

**АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.28.02.2018.FM.60.01
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

ТУРГУНОВ НОЗИМЖОН АБДУМАННОПОВИЧ

**КИРИШМА АТОМЛАРИ МИКРОБИРИКМАЛАРИ ҲОСИЛ
БЎЛИШНИНГ ФИЗИК АСОСЛАРИ ВА УЛАРНИНГ
МОНОКРЕМНИЙ ХУСУСИЯТЛАРИГА ТАЪСИРИ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Андижон – 2018

Физика-математика фанлари бўйича доктор (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2018.1DSc/FM114 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Андижон давлат университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида (www.adu.uz) ҳамда «ZiyoNet» ахборот-таълим порталига (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи: **Зайнабидинов Сирожиддин Зайнабидинович**
физика-математика фанлари доктори, профессор,
Ўзбекистон Республикаси ФА академиги

Расмий оппонентлар: **Вайткус Юозас Юозович**
физика-математика фанлари доктори, профессор,
Литва ФА академиги,

Гулямов Гофур
физика-математика фанлари доктори, профессор

Зикриллаев Нурилла Фатхуллаевич
физика-математика фанлари доктори, профессор

Етакчи ташкилот: **Ўзбекистон Миллий университети**

Диссертация ҳимояси Андижон давлат университети ҳузуридаги DSc.28.02.2018.FM.60.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2018 йил «__» _____ соат ____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 170100, Андижон шаҳри, Университет кўчаси, 129-уй. Тел./факс: 0(374) 223-88-30; e-mail: agsu_info@edu.uz, Андижон давлат университети мажлислар зали)

Диссертация билан Андижон давлат университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (__ рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 170100, Андижон шаҳри, Университет кўчаси, 129-уй. Тел./факс: 0(374) 223-88-30.

Диссертация автореферати 2018 йил «__» _____ да тарқатилди.

(2018 йил «__» _____ даги № __ рақамли реестр баённомаси).

Р.У. Алиев

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш раиси ўринбосари, т.ф.д., профессор

А.О. Курбанов

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

И.Н. Каримов

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

КИРИШ (докторлик (DSc) диссертацияси аннотация)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳон миқёсида яримўтказгичли электроника ва микроэлектрон технологияларнинг жадал ривожланиши оммавий қўлланувчи яримўтказгич материалларни ишлаб чиқаришни такомиллаштириш ёки янгиларини ишлаб чиқиш, шунингдек, улар асосида электрон қурилмаларнинг функционал имкониятларини кенгайтириш соҳасидаги тадқиқотларни рағбатлантирмоқда. Яримўтказгичларни диффузиявий, ўстириш жараёнида, ион ва ядровий трансмутацион усуллар орқали легирлаш бўйича тадқиқотларнинг кўрсатишича, яқин ўн йиллар ичида одатий диффузиявий легирлаш материалларнинг физик-кимёвий хусусиятларини олдиндан белгиланган катталиклар бўйича шакллантиришнинг асосий усулларида бири бўлиб қолмоқда.

Бугунги кунда жаҳоннинг кўплаб давлатларидаги етакчи илмий масканларда олдиндан берилган хусусиятлар асосида яримўтказгичли кремний монокристалларини олишга катта эътибор қаратилмоқда. Бу борада мақсадли илмий тадқиқотлар, жумладан диффузияли легирлаш ёрдамида киришмали микробирикмаларга эга бўлган материалларни олиш усуллари ишлаб чиқиш; кремний монокристаллидаги никель, кобальт ва марганец микробирикмаларининг тузилиши, ўлчамлари, шакли ва кимёвий таркибини аниқлаш; киришмавий микробирикмаларнинг ҳосил бўлиш, шунингдек, термик куйдириш (ТК), нурланиш (радиация) ва ҳар томонлама гидростатик босим (ХТГБ) таъсирида уларнинг парчаланиш механизмларини аниқлаш; киришма микробирикмаларига эга бўлган кремнийнинг электрофизик хусусиятларини ташқи таъсирлар турлари ва шароитларига боғлиқ ҳолда бошқариш муҳим вазифалар ҳисобланади.

Мамлакатимизда фаннинг устивор йўналишларида, жумладан, қайта тикланувчи энергия манбаларидан фойдаланишни ривожлантириш бўйича чуқур энергетик сатҳли киришма атомлари билан диффузияли легирлаш усули ҳамда уларнинг электр, оптик ва бошқа хусусиятларини ташқи босим, ҳарорат, тезкор зарралар билан нурлантириш ёрдамида бошқариш бўйича тадқиқотларда сезиларли натижалар олинган. Ўзбекистон Республикасини 2017-2021 йилларда ривожлантириш стратегиясига асосан қуйидаги вазифалар белгилаб берилган «илмий-тадқиқот ва инновация фаолиятини рағбатлантириш, илмий ва инновация ютуқларини амалиётга жорий этишнинг самарали механизмларини яратиш, олий ўқув юртлари ва илмий-тадқиқот институтлари ҳузурида ихтисослаштирилган илмий-экспериментал лабораториялар, юқори технология марказлари ва технопаркларни ташкил этиш»¹. Бу борада кремний монокристалли ҳажмида микробирикма кўринишида жойлашган киришма атомлари табиатини тадқиқ этиш, ташқи таъсирлар ёрдамида яримўтказгичли материаллар ва улар асосидаги

¹ Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони // ЎзР ҚХТ Ўзбекистон Республикаси қонун ҳужжатлари тўплами, 2017 й., 6-сон, 70-модда, 20-сон, 354-модда, 23-сон, 448-модда, 37-сон, 982-модда.

асбобларнинг янги функционал имконияларини шакллантириш ва электрофизик катталикларини бошқариш муҳим аҳамиятга эга.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар Стратегияси тўғрисида»ги Фармонида келтирилган бешта устивор йўналишнинг тўртинчи йўналиши, 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон «Фанлар Академияси фаолияти, илмий-тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги ва 2018 йил 20 июлдаги ПҚ-3876-сон «Фан ва олий таълим соҳаси ходимларининг меҳнат ҳақи миқдорини янада ошириш, илмий ва илмий-техник фаолият натижалари жорий этилишини давлат томонидан қўллаб-қувватлаш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меърий ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологияларни ривожлантиришнинг устивор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг III. «Қайта тикланувчи энергия манбаларидан фойдаланишни ривожлантириш» устувор йўналишига доир бажарилган.

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи². Киришма нуқсонларига эга бўлган яримўтказгич материалларнинг электрофизик хусусиятларини бошқариш соҳасидаги илмий изланишлар жаҳоннинг етакчи илмий марказлари ва олий таълим муассасалари, жумладан, Массачусетс технология институти, Калифорния университети (АҚШ), Токио технология институти (Япония), Россия фанлар академияси қаттиқ жисмлар физикаси институти, Санкт-Петербургнинг Физика-техника институти (Россия), Физика-техника институти, Ядро физикаси институти (Ўзбекистон) томонидан олиб борилмоқда.

Киришма микробирикмаларига эга бўлган яримўтказгичли материалларни олиш ва уларнинг электрофизик хусусиятларини турли ташқи таъсирлар остида бошқаришга оид жаҳонда олиб борилган илмий тадқиқотлар натижасида жумладан қуйидаги илмий натижалар олинган: кобальт билан легирланган кремнийдаги кўп компонентли металл зарраларининг ҳосил бўлиш механизмлари ва морфологияси аниқланган; кобальт зарраларининг ўлчамлари легирлаш ҳарорати ва совутиш тезлигига боғлиқлиги аниқланган (Калифорния университети, АҚШ); ҳажмида никель силицидларидан ташкил топган киришма чўкиндилари мавжуд бўлган кремний намуналари сиртида энергетик барьерлар кузатилмаганлиги аниқланган (Массачусетс технология институти, АҚШ); 3d-гурух

² Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи: Heuer M, Buonassisi T, Marcus M., Istratov A., Pickett D., Shibata T., Weber R. Complex intermetallic phase in multicrystalline silicon doped with transition metals // Physical Review. 2006. В 73. 235204, Kveder V., Khorosheva M., Seibt M. Interplay of Ni and Au atoms with dislocations and vacancy defects generated by moving dislocations in Si. // Solid State Phenomena. 2016. Vol. 242. P. 147-154.

элементлари билан легирланган кремнийда ҳосил бўлувчи киришма тўпламларининг хусусиятлари ва кимёвий таркиби аниқланган (Санкт-Петербург Физика-техника институти, Россия); киришма атомлари бирикмаларига эга бўлган кремний асосида кўп қатламли структуралар олинган (Физика-техника институти, Ўзбекистон).

Жаҳонда алоҳида хусусиятларга эга бўлган яримўтказгичли материалларни олиш технологияларини такомиллаштириш бўйича жумладан қуйидаги қатор устивор йўналишларда тадқиқотлар олиб борилмоқда: яримўтказгичли монокристалларнинг электрофизик хусусиятларини бошқариш учун киришма микробирикмаларига эга бўлган материалларни олиш; киришма микронуксонлари морфологиясини аниқлаш; киришма микронуксонлари бўлган кремний монокристалли асосидаги яримўтказгичли материалларнинг термик, барик ва радиацион сезгирликларини ошириш; монокремний ҳажмидаги киришма микробирикмаларининг ҳосил бўлиш ва парчаланиш механизмларини аниқлаш.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Ҳозирги вақтда кремний монокристаллари ҳажмида 3d-элементлари атомлари ҳосил қилувчи киришма микро- ва нанобирикмаларининг хусусиятлари етарлича жадал ўрганилмоқда. Б.И. Болтакс, С.В. Булярский, В.И. Фистуль, Э.М. Омеляновский каби таниқли физиклар ҳамда етакчи ўзбек олимлари ҳисобланган академик С.З. Зайнабидинов, академик М.К. Бахадырханов, М.С. Юнусов ва бошқа муаллифларнинг ишларида киришма нуксонларининг ҳосил бўлиш механизми ва уларнинг хусусиятлари, ўтувчи гуруҳ элементлари атомларининг диффузия катталиклари, киришма нуксонларининг термодинамик ҳолатлари, шунингдек, уларнинг ташқи таъсирлар остида парчаланиш жараёнлари тадқиқ этилган. Киришма нуксонларига эга яримўтказгич материалларнинг электрик, фотоэлектрик, оптик ва механик хусусиятлари аниқланган.

О.В. Феклисов ва Е.Б. Якимовларнинг ишларида 1273 К ҳароратда, 0,5 соат давомида кейинги тез совутиш орқали диффузия йўли билан олинган p-Si<Fe> намуналарида темирнинг киришма преципитатлари ҳосил бўлиши аниқланган. Кристалл тузилишидаги дислокациялар киришма преципитатларининг ҳосил бўлиш жойлари эканлиги ва уларнинг ўлчамлари бир неча юзлаб нанометрларга етиши аниқланган.

А.А. Истратов, Е.Р. Вебер, В.В. Кведер ва М.А. Хорошева, шунингдек, ўзбек олимлари: академик М.К. Бахадырханов, К.П. Абдурахманов, Т.С. Камилловларнинг ишларида 3d-гуруҳ элементлари ҳосил қилувчи киришма атомлари кластерларининг ҳосил бўлиш механизми тадқиқ этилган. Киришма нуксонларига эга бўлган кремнийнинг электрофизик, фотоэлектрик ва магнит хусусиятлари ва уларга турли ташқи таъсирларнинг таъсири ўрганилган. 3d-гуруҳ ўтувчи металлари орасида мис, никель ва кобальт кремнийда энг юқори диффузия коэффициенти ва эрувчанлигига эга эканлиги кўрсатилган, шунингдек, ушбу киришмаларнинг нанокластерлар ва комплекслар ҳосил қилиши аниқланган. Бундан ташқари кристалл матрицада

ўзининг индивидуал физик хусусиятларига эга бўлган квазимолекула кўринишидаги киришма нуқсонлари ҳосил бўлиши ҳам аниқланган.

Тадқиқотнинг диссертация иши бажарилган олий таълим муассасасидаги илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Андижон давлат университети илмий-тадқиқот ишлар режасининг ОТМ-Ф2-28 рақамли «Легирланган кремнийдаги сиртий ва ҳажмий квант ўлчовли эффектлар ва уларни р-, n- тузилмалардаги генерация-рекомбинация ва ток ташувчиларни ажралиш жараёнига таъсири» (2012-2016 йй.); ОТМ-Ф2-68 «Кристалларда киришма-нуқсонли микро- ва нанобирикмаларнинг ҳосил бўлиш механизмлари ва уларнинг кенг функционал имкониятли кўпқатламли структураларни яратишдаги роли» (2017-2020 йй.) мавзуларидаги фундаментал лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади кремнийда никель, марганец ва кобальт киришма атомларининг преципитат ва микробирикмалари ҳосил бўлиш технологик шароитларини, уларнинг морфологик тузилиши ва хусусиятларини, ташқи омиллар таъсирида парчаланиш кинетикасини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

микробирикмалар ҳосил бўлишига олиб келувчи Ni, Co ёки Mn билан кремнийни легирлашнинг мақбул технологик шароитларини аниқлаш;

кремний – киришма атом қаттиқ қоришмаларида атомлар ҳолатини термодинамик таҳлил қилиш асосида кристалл структураларда турли микробирикмалар ҳосил бўлишини аниқлаш;

кремний монокристаллидаги микробирикмаларнинг кимёвий таркиби, структуранинг шаклланиш механизмлари, ўлчамлари ва шакллари ҳосил бўлиш шароитларини тадқиқ қилиш;

легирланган кремнийга термик ишлов беришда киришма атомлари уюшмалари парчаланишининг технологик шароитларини ва уларнинг физик-кимёвий механизмларини тадқиқ этиш;

ташқи ҳар томонлама гидростатик босим таъсирида турли ўлчамли ва таркибли киришма тўпламларининг парчаланиш қонуниятларини аниқлаш ҳамда парчаланиш кинетикасини илмий асослаш;

киришма атомларининг кремнийдаги радиацион, барик ва хусусий нуқсонлар билан ўзаро таъсирлашиш механизмларини аниқлаш;

монокремнийни тез диффузияланувчи киришма атомлари билан диффузиявий легирлашда киришма атомлари уюшмаларининг ҳосил бўлиши термодинамик муқаррарлигини кўрсатиш ва илмий асослаш.

Тадқиқотнинг объекти КДБ – 5, 10, 20 ва КЭФ – 5, 10, 20, 40 маркали кремний монокристаллари ҳамда электрон структуралари $3d^8 4s^2$, $3d^7 4s^2$ ва $3d^5 4s^2$ бўлган махсус тозаликдаги Ni, Co ва Mn металл киришмалардан иборат.

Тадқиқотнинг предмети кремний монокристаллидаги никель, кобальт ва марганец атомларининг микробирикмалари, преципитатлари ёки

нанобирикмаларини ҳолатлари, шунингдек, уларни ТК, радиация ва ХТГБ таъсирида парчаланиш жараёнларидан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Илмий ишни бажариш жараёнида замонавий электрон-зондли микроанализ усули, радиоактив анализ усули ва стандарт усуллардан фойдаланилган, кристаллардаги киришма тўпламлари тузилиши ва таркибини юқори аниқлик билан аниқлаш имконини берувчи «Superprobe JXA-8800R» қурилмаси ёрдамида кремнийдаги никель, кобальт ва марганец атомларининг киришма микробирикмалари шакллари, кимёвий таркиби ва ўлчамлари тадқиқ этилди.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

3d-гурух элементлари атомлари билан диффузия усулида легирланган кремнийда киришма микробирикмалари ва преципитатлари ҳосил бўлишининг термодинамик муқаррарлиги аниқланган;

монокремнийда Ni, Co ва Mn микробирикмаларининг тузилиши ва кимёвий таркиби тажриба орқали аниқланган ва илмий асосланган;

киришма тўпламларининг таркибий тузилиши уларнинг ўлчамлари ва геометрик шаклларига боғлиқлиги, яъни ўлчами катта тўпламлар ($>10^{-6}$ м) кўп қатламли тузилишга, кичиклари эса ($<5 \cdot 10^{-7}$ м), асосан, Ni, Co ёки Mn нинг бир турдаги силицидларидан ташкил топганлиги ва монокатламли тузилишга эга эканлиги аниқланган;

кремний монокристаллида турлича тузилиш ва шаклдаги киришма атомлари микробирикмалари ва преципитатлари ҳосил бўлишининг физик механизми аниқланган;

киришма микробирикмалари ҳажмида технологик киришмалар (масалан: Fe, Cr, Cu ва бошқалар) атомлари мавжудлиги ҳамда уларнинг микробирикмалар ҳажми бўйича маълум бир қонуният асосида тақсимланиши аниқланган;

Ni, Co ёки Mn билан диффузияли легирланган кремнийда кузатилувчи янги электрик ва фотоэлектрик жараёнларнинг механизмлари аниқланган;

легиранган кремнийда термик қуйдириш, юқори гидростатик босим, гамма ва нейтрон нурланишларнинг таъсирлари ва уларнинг моҳияти аниқланган;

легиранган кремний кристаллидаги киришма атомлари ва улар микробирикмаларининг термик ишлов, ҳар томонлама босим ва нурланиш таъсирида мумкин бўлган парчаланиш механизмлари аниқланган;

чуқур энергетик сатҳларнинг ҳосил бўлиши, электр жихатдан фаол бўлмаган атомларнинг иккинчи фаза уюшмалари ва уларнинг ташқи таъсирлар остида деградацияланиши аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

диффузияли легирлаш усулида, ўтиш элементлари атомларининг киришма микробирикмаларига эга бўлган монокремнийни олиш технологиялари ишлаб чиқилган;

яримўтказгичли материалларни олдиндан берилган физик хусусиятларни таъминловчи, кремний монокристаллини ўтиш элементлари

атомлари билан диффузиявий легирлашнинг технологик шароитлари ишлаб чиқилган;

легирланган кремний монокристаллининг хусусиятларини мақсадли йўналишда бошқариш учун диффузиядан сўнг термик, барик ва радиацион ишлов бериш режимлари аниқланган;

кремний монокристаллининг ҳажмини киришма микробирикмалари томонидан геттерлаш ҳисобига нуқтавий нуқсонлардан тозалаш имкониятлари аниқланган;

ўтиш элементлари атомлари билан легирланган кремний монокристаллининг термик ва радиацион чидамлилигини ошириш механизмлари таклиф этилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончилиги киришма атомлари билан легирланган кремнийдаги физик жараёнларни тадқиқ қилишда умумқабул қилинган илмий ва технологик услублар, стандарт ва кенг қўлланиладиган тадқиқот усулларида фойдаланилганлиги, шунингдек киришма микробирикмалари катталиклари ҳамда уларнинг ҳосил бўлиш ва ташқи омиллар таъсири остида парчаланиш механизмлари бўйича олинган натижаларни таққослаш орқали таҳлил қилиниши билан таъминланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти кремний монокристаллида Ni, Co ва Mn киришма атомлари микробирикмаларининг ҳосил бўлиши ва уларнинг ташқи таъсирлар остида парчаланишининг физик механизмларини, микробирикмалар ҳажмида киришма атомлари тақсимоти, яъни киришма атомларининг фоизли улуши микробирикмаларнинг марказидан унинг сиртига томон камайиб бориш тартибда жойлашиш қонуниятларини тушунтириш имконини яратади. Юқори ҳароратларда кремний монокристаллини легирлаш жараёнида ҳосил бўлувчи вакансион ғовақлар киришма микробирикмалари ёки преципитатларининг ҳосил бўлиш марказлари эканлиги катта эҳтимолликка эга.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти киришма микробирикмалари ўлчамлари, шакллари ва кимёвий таркибларини аниқлаш, кремнийни Ni, Co ва Mn билан легирлашда диффузия шароитларини ва намуналарни диффузиядан сўнг соvuтиш тезликларининг таъсирини, шунингдек, Ni, Co ёки Mn киришма атомлари микробирикмаларига эга бўлган Si ни электрофизик хусусиятларини ташқи таъсирлар ёрдамида бошқариш имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Киришма микробирикмаларига эга бўлган кремний монокристаллининг турли ташқи таъсирлар остидаги физик параметрларига боғлиқ ҳолда электрофизик хусусиятларини бошқариш бўйича олинган натижалар асосида:

яримўтказгич материаллар физик хоссалари ва улар асосидаги асбобларнинг термик ва радиациявий стабиллигини ошириш имконини берувчи, олдиндан берилган даражада компенсирланган кремнийни олишнинг оптимал технологик шароитларини аниқлашга оид тадқиқотлар натижалари «FOTON» акционерлик жамиятида ижобий характеристикаларга эга яримўтказгичли асбобларни ишлаб чиқариш жараёнида фойдаланилган («Ўзэлтехсаноат» акциядорлик компаниясининг 2018 йил 29 майдаги 02–1229-сон маълумотномаси). Илмий

натижалардан фойдаланиш ноанъанавий киришма атомлари билан легирланган кремний асосида олинган диод ва МДЯ - структуралар функционал имкониятларини кенгайтириш имконини берган;

кремнийга диффузиявий легирлаш орқали киришма атомларини киритиш, унинг ҳажмида микро ва нанобирикмаларни ҳосил қилишнинг тажрибавий натижалари Ф2-28 рақамли «Легирланган кремнийдаги сиртий ва ҳажмий квант ўлчовли эффектлар ва уларни р-, n- тузилмалардаги генерация-рекомбинация ва ток ташувчиларни ажралиш жараёнига таъсири» фундаментал лойиҳасида легирланган кремний намуналар хусусиятларини белгиланган йўналишда бошқаришда фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2018 йил 13 июндаги 89–03–2314- сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш киришма атомлари микро- ва нанобирикмаларининг кремний кристалл структураси нуқсонлари билан ўзаро таъсирлашуви қонуниятларини аниқлаш имкониятини яратган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Ишнинг асосий натижалари 4 та халқаро ва 9 та республика илмий-амалий ажуманларида маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация материаллари бўйича 36 та илмий иш нашр қилинган, улардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий нашрларини чоп этишга тавсия этилган илмий нашрларда 12 та мақола нашр этилган.

Диссертация ҳажми ва тузилиши. Диссертация кириш, 6 та боб, хулоса ва адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг матни 200 бетда келтирилган.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати, тадқиқотларнинг фан ва технологияларнинг асосий устивор йўналишлари билан боғлиқлиги ёритилган, диссертация мавзуси бўйича халқаро илмий тадқиқотларнинг таҳлили ҳамда муаммони ўрганилганлик даражаси келтирилган. Муаммонинг ҳолати таҳлил қилинган ва тадқиқот мавзуси долзарблиги ҳамда йўналишнинг илмий янгилиги асосланган, ишнинг мақсади ва ушбу муаммони ҳал этиш бўйича асосий вазифалар, ўтказилган тадқиқотларнинг илмий ва амалий қиймати ёритилган.

Диссертациянинг **«Яримўтказгич монокристалларидаги микронуқсонлар»** деб номланган биринчи бобида мавзуга оид адабиётлар таҳлил қилинган. Яримўтказгичли кристалларда киришма атомларининг ҳолати ва уларнинг хусусий нуқсонлар билан ўзаро таъсирга оид тадқиқотлар, киришма нанобирикмаларининг ҳосил бўлиш ва парчаланиш механизмлари ҳамда уларнинг тузилиши ва кимёвий таркиби бўйича энг сўнгги маълумотлар тақдим этилган, шунингдек, диффузия жараёнлари шароитлари ва ташқи таъсирларнинг киришма атомлари уюшмаларини

шаклланиши ҳамда уларнинг физик-кимёвий хусусиятларига таъсири таҳлил қилинган.

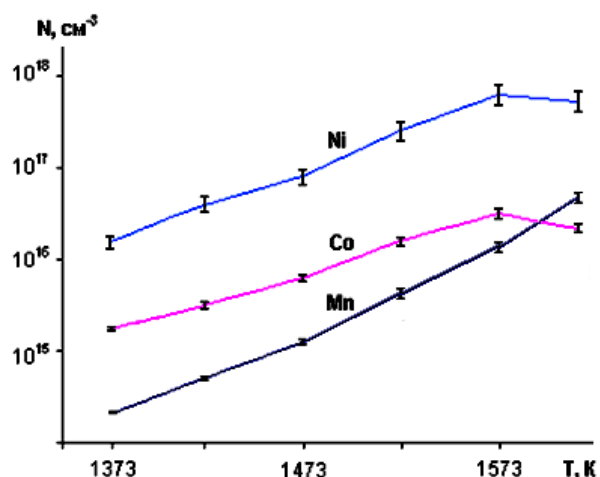
Диссертациянинг «**Киришма микробирикмаларига эга яримўтказгич монокристалларини олиш технологияси ва тадқиқ қилиш усуллари**» деб номланган иккинчи бобида монокремнийни никель, кобальт ва марганец билан диффузиявий легирлаш шароитларини назорат қилиш ҳисобига киришма микро- ва нанобирикмаларига эга бўлган кремний монокристаллини олиш оптимал усуллари, диффузиядан сўнг намуналарни совутиш тезлигининг аҳамияти, шунингдек, амалий тадқиқотларнинг ўтказиш усуллари келтирилган.

Маълумки, диффузиявий легирлаш яримўтказгич материалларга киришмаларни киритишнинг асосий усулларида бири ҳисобланади. Шунингдек, легирловчи элементлардан ташқари айрим элементларни диффузияланиши алоҳида аҳамиятга эга, чунки кристаллга, масалан, темир, мис, хром, алюминий ва шу каби кўплаб металлларнинг кристалларни ўстириш ёки уларга технологик ишлов бериш жараёнида тушиб қолишини тўлиқ чеклаб бўлмайди. Кремнийда металл киришмалардан ташқари, кўпинча, кислород ва углерод мавжуд бўлади, улар хатто дастлабки материалларда мавжуд бўлиши, тасодифий кириб қолиши ёки мақсадли киритилган бўлиши мумкин. Ушбу киришмаларнинг кремнийда нуқсонлар ҳосил бўлиш механизмларига таъсири яхши ўрганилганлиги сабабли, биз томонимиздан асосий эътибор темир, мис ва хром каби бошқа технологик киришмаларнинг микробирикмалар шаклланиши жараёнларидаги ролини ўрганишга қаратилди.

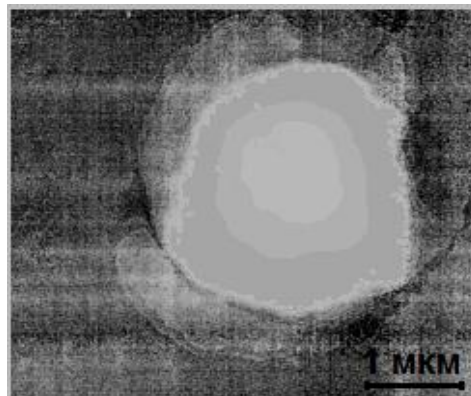
Диффузия жараёнларида кремний сиртининг ҳолати асосий омиллардан бири ҳисобланади. Дастлаб кремний сирти: а) дистилланган сувда қайнатиш орқали; б) гидрохлорик кислотаси орқали; в) $\text{HF}:\text{HNO}_3$ (1:2) эритмаси орқали тозаланиб, унга Ni атомлари киритилди. Диффузиявий куйдиришдан сўнг намуналар турли тезликлар ($v_{\text{сов}} < 1$ град/с дан $v_{\text{сов}} = 600$ град/с гача) билан совутилди.

Киришмали Ni атомларининг Si даги тўлиқ концентрациясини аниқлаш учун радиоактив таҳлил усулидан фойдаланилди. Легирловчи элемент сифатида электролитик усул билан наъмуналар сиртига суртилган Ni^{63} радиоактив изотопи қўлланилди. Сўнгра 1273-1623 К ҳарорат интервалида намуналар 15 минутдан 15 соатгача бўлган вақт мобайнида эвакуация қилинган ва аргон билан тўлдирилган кварц ампулаларида, кейинги совутиш билан куйдирилди. Намуналарнинг сиртини қатламма қатлам олиб ташлаш усулида ва уларнинг радиоактив таҳлили орқали никелнинг кремнийдаги концентрацияси аниқланди. Ni атомларининг энг юқори эрувчанлик қиймати $7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ бўлиб, унга куйдириш ҳарорати 1573 К бўлганда эришилди. 1623 К ҳароратда эса ушбу кўрсаткич сезиларли даражада камая бошлайди (1-расм). Бундан ташқари 1-расмда Co ва Mn ни Si даги эрувчанлиги бўйича маълумотлар келтирилган. Co ўзининг Si даги максимал эрувчанлик қиймати $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ га 1573 К ҳароратда эришиши, Mn атомлари эса Si да максимал

эрувчанлик қиймати $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ га 1623 К ҳароратда эришиши аниқланди.



1-расм. Ni, Co ва Mn нинг Si даги эрувчанлигининг диффузия ҳарорати қийматига боғлиқлиги.



2-расм. Superprobe JXA-8800R микроанализатори ёрдамида олинган Si даги Ni микробирикмаси тасвири.

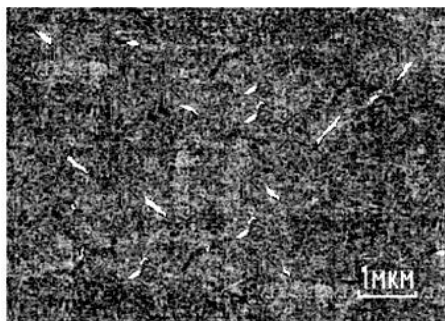
n-Si<Ni> намуналарининг электрофизик хусусиятлари бўйича тадқиқот натижалари никель атомлари кремнийда ионлаштириш энергиялари $E_v+0,2$ эВ ва $E_c-0,41$ эВ га тенг бўлган иккита чуқур акцептор энергия сатҳлари ҳосил қилишини кўрсатди. Mn атомлари эса Si да донор характерли $E_c-0,5$ эВ энергия сатҳига эга. Mn нинг Si даги киришма атомларини қолган қисми микробирикмалар, шунингдек тўртта атомдан иборат кластерлар ҳосил қилишга кўпроқ мойиллиги маълум бўлди. Кобальт кремнийда иккита акцептор $E_v+0,2$ эВ ва $E_c-0,52$ эВ ҳамда битта донор $E_c-0,28$ эВ сатҳларни ҳосил қилади.

Кремний монокристаллида никель, кобальт ва марганец киришма атомларининг ҳолатини тадқиқ қилиш электрон-зондли микроанализатор «Superprobe JXA-8800R» замонавий қурилмаси ёрдамида амалга оширилди. Тадқиқ этилаётган намуна латунли тагликка ток ўтказувчи, қора кўмир асосида махсус тайёрланган қарма ёрдамида маҳкамланади. Таглик қурилманиннг вакуум камерасига жойлаштирилади. Қарма вакуум ($10^{-4} \div 10^{-5}$ бар) олинган, электронлар манбаси уланади. Вольфрам толасидан ҳосил бўлувчи қучланиши 20 кV га тенг бўлган электрон нури билан тадқиқ этилаётган намунага тушади. Кремнийда қўзғатиш чуқурлиги $\sim 15 \div 20$ мкм ни ташкил этади. Бунда зонд токи 10 нА, зонд диаметри эса 10^{-7} м ни ташкил этади. Электрон нур намунанинг сирти билан таъсирлашганда диафрагма орқали таҳлил қилувчи кристалл (LiF, PERJ, TAP) иккиламчи рентген нурланишини келтириб чиқаради ва ундан қайтганда пропорционал ҳисоблагичда қайд қилинади. Натижалар микроанализаторнинг электрон тизимида қайта ишланади. Таҳлил қилинаётган чизиқларда элементнинг миқдори эталонлар: тоза металллар, эритмалар, элементларнинг кислород ёки олтингугурт билан сунъий ва табиий бирикмаларига нисбатан ҳисобланади. Қурилманиннг сезгирлиги $10^{-2} \%$ ни ташкил этади.

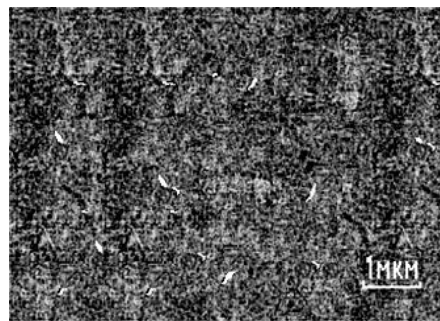
Тез совутилган ($v_{\text{сов}} > 200$ град/с) намуналарда киришмали Ni, Co ва Mn микробирикмалари тузилишини ўрганиш, бундай намуналар ҳажмида мос

равишда ўлчамлари 10^{-6} м, $4 \cdot 10^{-7}$ м ва $2 \cdot 10^{-7}$ м. дан кичик микробирикмалар мавжуд бўлишини кўрсатди. Бундай микробирикмаларнинг электрон-микроскоп таҳлили шуни кўрсатадики, улар маълум турдаги силицидлардан ташкил топган бир ёки бир нечта қатламлардан иборат бўлади. Бундан ташқари улар игнасимон, дисксимон, сферасимон ва мураккаб кўп қиррали шаклларга эга. Секин совутилган ($v_{\text{сов}} < 10$ град/с) намуналарда ҳосил бўлувчи киришмалари Ni, Co ва Mn микробирикмалари, асосан, кўп қатламдан иборат бўлиб, сферасимон шаклга эга бўлади. Superprobe JXA-8800R микроанализатори ёрдамида олинган Ni микробирикмаси тасвирида (2-расм) қатламлар ҳамда микробирикма-монокристалл орасидаги чегараларнинг аниқ ажралиб турганлигини кўриш мумкин.

Диссертациянинг «Кремний монокристаллида киришма атомларининг хатти-ҳаракатларини айрим жиҳатлари» деб номланувчи учинчи бобида Ni, Co ва Mn билан легирланган Si нинг физик хусусиятларини тадқиқ қилиш натижалари келтирилган. Электрон-зондли микроанализатор ёрдамида олинган амалий тадқиқотлар натижалари Чохральский усулида олинган n-Si<Ni> намуналарида ўлчамлари $\sim 5 \cdot 10^{-7}$ м гача бўлган киришма микробирикмалари ҳосил бўлишлигини кўрсатди (3-расм). Шундай усул билан олинган n-Si<Co> намуналарида ҳам ўлчамлари $\sim 3 \cdot 10^{-7}$ м гача бўлган микробирикмалар мавжудлиги кузатилди (4-расм). n-Si<Ni> ва n-Si<Co> намуналаридаги микрокиришмалар монокатламли тушилишга эга бўлиб, улар бир турдаги никель ёки кобальт силицидидан ташкил топган.



3-расм. Чохральский усулида олинган n-Si<Ni> намуналаридаги микробирикмалар.



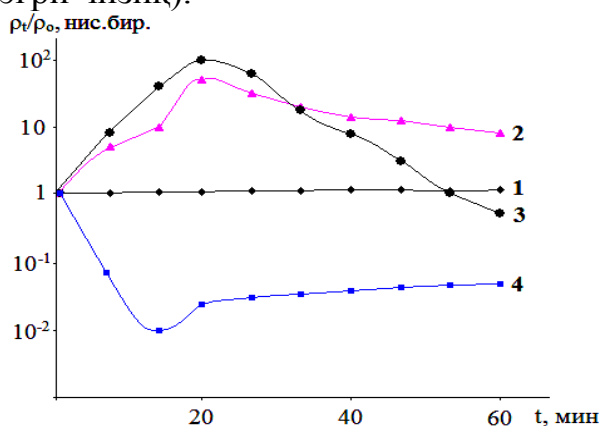
4-расм. Чохральский усулида олинган n-Si<Co> намуналаридаги микробирикмалар.

Si<Ni> ва Si<Co> намуналарининг электр ўтказувчанлиги бўйича тадқиқотлар натижалари солиштирма қаршилиги $\rho > 5$ Ом·см бўлган n-Si намуналарини легирлаш улар солиштирма қаршилигининг ортишига, солиштирма қаршилиги $\rho > 10$ Ом·см бўлган p-Si намуналарида эса легирлаш, легирланмаган намуналарга нисбатан, ушбу кўрсаткичнинг камайишига олиб келишини кўрсатди. Ушбу тадқиқотлар Ni атомлари Si да акцептор киришма кўринишида мавжуд бўлса, Co атомлари эса амфотер хусусиятини намоён этишини ҳамда уларнинг концентрациялари мос равишда $5 \cdot 10^{14}$ см⁻³ ва $5 \cdot 10^{13}$ см⁻³ ни ташкил қилишини кўрсатди.

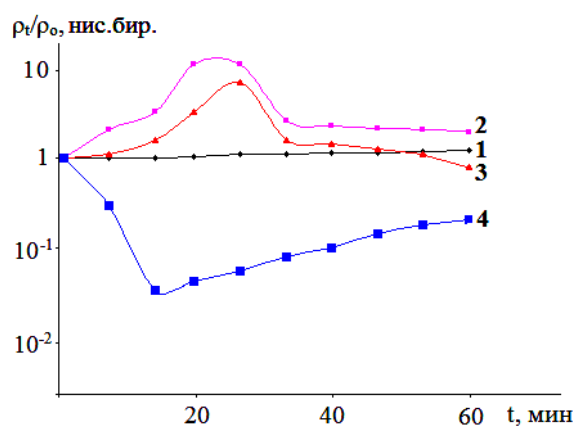
5-расмда n-Si<Ni> намуналари учун ρ_i/ρ_0 нинг паст ҳароратли куйдириш (ПХК) вақтига ($T=573 \div 1273$ К ҳарорат интервалида) боғлиқлиги бўйича

тадқиқот натижалари келтирилган. Олинган натижалар $T=573$ К ҳароратдаги ТК таъсирида намуналарнинг ρ_t/ρ_0 қийматида сезиларли ўзгаришлар содир бўлмаслигини кўрсатди (5-расм, 1-эгри чизик). $T=773\div 1073$ К интервалида ПХК ҳарорати кўтарилган сари 20 минут вақт мобайнида намуналарнинг ρ_t/ρ_0 қийматида доимий ортиб борувчи ўсиш кузатилади (5-расм, 2 ва 3-эгри чизиклар) ва бу ўсиш $\sim 10^2$ мартага етиши мумкинлиги аниқланди. Куйдириш вақтининг ортиб бориши билан эгри чизиклар ўз максимумидан ўтиб, ундан сўнг камайиши кузатилади. ПХК ҳарорати қанча юқори бўлса, намуналар ρ қиймати ўсиши шунча юқори бўлиши тасвирда кузатилади. ПХК ҳароратини $T=1273$ К га кўтариш, намуналар ρ қийматининг кескин камайишига олиб келади (5-расм, 4-эгри чизик). $t=15$ минутни ташкил этганда n-Si<Ni> намуналари ρ қиймати $\sim 10^2$ Ом·см ни ташкил этади. ПХК нинг $773\div 1073$ К ҳарорат интервалида намуналари ρ қийматининг бундай кўринишда ўзгариши киришма атомларининг кремний кристалл панжарасидаги ҳолатига боғлиқ бўлиши мумкин. Акцептор характердаги ўрин алмашиш ҳолатида жойлашган электр жиҳатдан фаол киришма атомлар ПХК нинг 1173 К дан юқори ҳароратларида, тугундаги ҳолатини тарк этади ва n-Si да олдинроқ тутиб олинган электронларни озод қилади ва бу намуналарнинг ρ қиймати камайишига олиб келади, яъни бунда киришма-кристалл тўйинган қаттиқ қоришмасида киришма атомларнинг парчаланиши содир бўлади.

6-расмда n-Si<Co> намуналари учун ρ_t/ρ_0 нинг ПХК вақтига боғлиқлиги бўйича тадқиқотлар натижалари келтирилган. Тасвирда n-Si<Co> намуналари учун бу боғлиқлик характери бўйича n-Si<Ni> намуналарига унча катта бўлмаган микдорий ўзгаришлар билан ўхшаш эканлиги кўриниб турибди. n-Si<Ni> дан фарқли равишда n-Si<Co> намуналарида ρ қийматининг сезиларли камайиши $T=1173$ К ҳароратда, 15 минут вақт мобайнидаги ТК да кузатилади ва у, деярли, 1,5 тартибга камаяди (6-расм, 4-эгри чизик).



5-расм. n-Si<Ni> намуналарида ρ_t/ρ_0 нинг ТК вақтига боғлиқлиги, бунда: 1-573 К; 2-773 К; 3-1073 К; 4-1273 К.



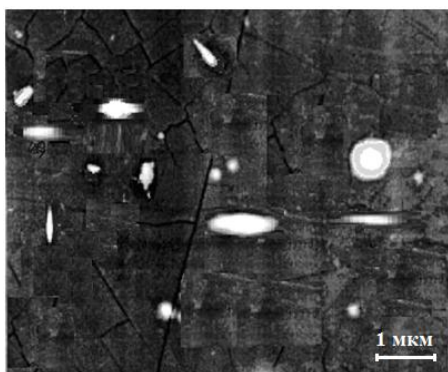
6-расм. n-Si<Co> намуналарида ρ_t/ρ_0 нинг ТК вақтига боғлиқлиги, бунда: 1-573 К; 2-773 К; 3-1073 К; 4-1173 К.

Диффузиявий легирлаш жараёнида киришма атомларининг ҳаракатларини аниқлаш мақсадида диффузиянинг турли шароитларида кремний структурасини ўрганиш бўйича тадқиқотлар ўтказилди.

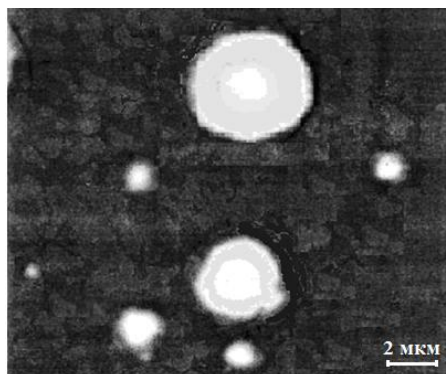
Тадқиқотлар электрон-зондли микроанализ усулида n-Si<Ni> нинг модел намуналарида ўтказилди. Намуналар электрон ўтказувчанликка эга, солиштирма қаршилиги $\rho=1\div 10$ Ом·см га тенг, Чохральский усулида ўстирилган кремний монокристалли асосидаги дастлабки материаллардан олинди. Легирлаш диффузия усулида, $T=1373-1523$ К ҳароратларда, шунингдек, кейинги турли тезликдаги совутиш орқали амалга оширилди.

n-Si<Ni> намуналари билан ўтказилган тадқиқотлар диффузиядан кейинги совутиш тезлигига – $v_{сов}$ боғлиқ ҳолда намуналар ҳажмида турли шакллардаги преципитатлар кузатилишини кўрсатди. $v_{сов}>200$ град/с қийматларида, ўлчамлари $\sim 2\cdot 10^{-6}$ м гача бўлган, асосан, игнасимон ва линзасимон шаклларга эга бўлган преципитатлар ҳосил бўлади. Тез совутилган $v_{сов}=600$ град/с n-Si<Ni> намуналарида ўлчамлари $\sim 10^{-6}$ м гача бўлган преципитатлар мавжуд. Бундай преципитатларнинг электрон-микроскопик таҳлили, улар бир нечта никель силицидлари қатламларидан ташкил топганлиги ҳамда игнасимон, дисксимон, линзасимон ва мураккаб кўп қиррали, сферага ўхшаш бўлган шаклларга эга эканлигини кўрсатди (7-расм). Бундай преципитатларнинг намуналар ҳажми бўйича зичлиги ўртача $\sim 2\cdot 10^3$ см⁻³ ни ташкил этади. Диффузиявий куйдиришдан сўнг худди шундай совутиш тезлиги билан олинган p-Si<Ni> намуналарида ўлчамлари $\sim 0,5\cdot 10^{-6}$ м гача бўлган, турли шаклларга эга бўлган преципитатлар ҳосил бўлади.

Совутиш тезлиги $v_{сов}<10$ град/с билан олинган n-Si<Ni> намуналари ҳажмида нисбатан катта ўлчамли ($\geq 2\cdot 10^{-6}$ м), асосан, сферасимон шаклдаги преципитатлар ҳосил бўлади (8-расм). Бундай преципитатларнинг микроструктуравий таҳлили, улар бир нечта силицид қатламлардан ташкил топганлигини кўрсатди. Олинган преципитат микротасвирларида ушбу қатламлар орасидаги чегаралар аниқ кўриниб турибди.



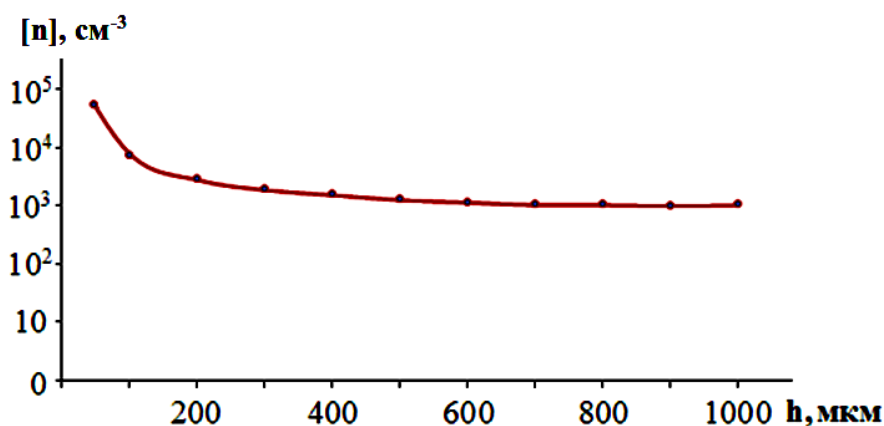
7-расм. $v_{сов}=600$ град/с бўлган n-Si<Ni> намуналарида киришма преципитатларининг тасвири.



8-расм. $v_{сов}=1$ град/с бўлган n-Si<Ni> намуналарида киришма преципитатларининг тасвири.

9-расмда $v_{сов}=600$ град/с билан олинган n-Si<Ni> намуналарида киришма микробирикмалари зичлигининг намуна сиртидан чуқурлашиш масофасига боғлиқлиги бўйича амалий тажрибалардан олинган натижалари келтирилган. Унда намунанинг сиртки соҳасида (~ 50 мкм) микробирикмаларнинг зичлиги

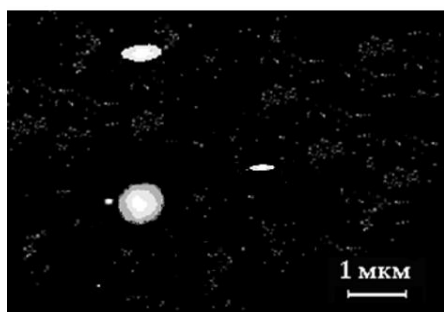
унинг бошқа соҳаларига нисбатан бир тартибга юқори эканлигини кўриш мумкин.



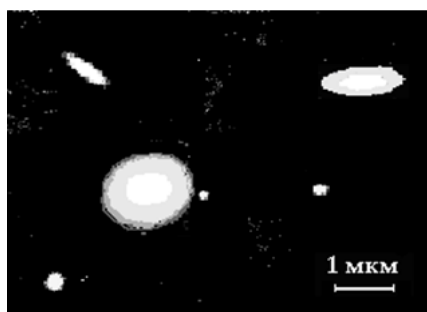
9-расм. $v_{\text{сов}}=600$ град/с бўлган n-Si<Ni> намуналарида киришма микробиримчалари зичлигининг намуна сиртидан чуқурлашиш масофасига боғлиқлиги.

Диффузиявий куйдиришдан сўнг $v_{\text{сов}} < 1$ град/с бўлган p-Si<Mn> намуналарини тузилмавий тадқиқ қилиш, уларнинг ҳажмида ўлчамлари $\sim 10^{-6}$ м гача бўлган, турли геометрик шаклдаги, зичлиги $\sim 4 \cdot 10^2$ см⁻³ ни ташкил этувчи микробиримчалар ҳосил бўлишини кўрсатди (10-расм). Совутиш тезлиги $v_{\text{сов}} < 1$ град/с бўлган n-Si<Mn> намуналари тузилишини ўрганиш, улар ҳажмида ҳам ўлчамлари $\sim 4 \cdot 10^{-7}$ м гача бўлган киришма микробиримчалари ҳосил бўлишини кўрсатди.

Совутиш тезлиги $v_{\text{сов}}=400$ град/с бўлган n-Si<Co> намуналари билан ўтказилган худди шундай тадқиқотлар улар ҳажмида игнасимон, линзасимон, дисксимон ва сферасимон шакллардаги, энг катта ўлчамлари $\sim 5 \cdot 10^{-7}$ м га етувчи киришма микробиримчалари ҳосил бўлишини кўрсатди. Бундай микробиримчаларнинг зичлиги $\sim 10^3$ см⁻³ ни ташкил этади. $v_{\text{сов}} \leq 1$ град/с бўлган n-Si<Co> намуналари ҳажмида, асосан, сферасимон шаклдаги, ўлчамлари $\sim 8 \cdot 10^{-7}$ м га етувчи микробиримчалар кузатилади. $v_{\text{охл}} \geq 400$ град/с бўлган p-Si<Co> намуналари тузилишини тадқиқ этиш, ҳосил бўлувчи микробиримчалар моноқатлам тузилишига ҳамда турли шаклларга ва $5 \cdot 10^{-7}$ м гача ўлчамларга эга микробиримчалар ҳосил бўлишини кўрсатди. $v_{\text{сов}} \leq 1$ град/с бўлган p-Si<Co> намуналарида, асосан, кўп қатламли тузилишга эга, ўлчамлари $1,5 \cdot 10^{-6}$ м га етувчи микробиримчалар кузатилади (11-расм).



10-расм. $v_{\text{сов}} < 0,1$ град/с бўлган p-Si<Mn> намуналарида киришма микробиримчаларининг тасвири.



11-расм. $v_{\text{сов}}=1$ град/с бўлган p-Si<Co> намуналарида киришма микробиримчаларининг тасвири.

Диффузиявий легирлаш усули билан олинган n ва p-турдаги Si<Ni>, Si<Co> ва Si<Mn> намуналарида ҳосил бўлувчи киришма преципитатлари ёки микробирикмаларининг ўлчамлари, шакллари ва таркибий тузилиши, асосан, намуналарни диффузиядан сўнг совутиш тезлигига боғлиқ эканлиги аниқланди. Намуналарда $v_{сов}$ қиймати қанча кичик бўлса, уларда нисбатан катта ўлчамдаги, кўп қатламли линзасимон ва сферасимон шаклларга эга бўлган термодинамик мувозанат ҳолатидаги преципитатлар ёки микробирикмаларнинг ҳосил бўлиш эҳтимоли шунча юқори бўлади.

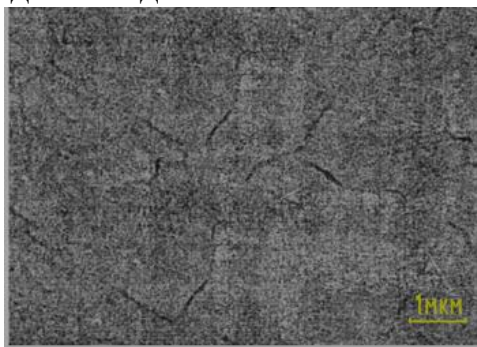
Диссертациянинг «**Кремний монокристаллида киришма микробирикмаларининг ҳосил бўлиш механизмларини тадқиқ қилиш**» деб номланувчи тўртинчи бобида кремний монокристаллида киришма микробирикмаларининг ҳосил бўлиш механизмларини тадқиқ қилиш бўйича натижалар келтирилган. Ҳозирги вақтда мавжуд бўлган кремнийда киришма микробирикмалари ҳосил бўлиш механизмларини назарий асослаш усуллари, легирлаш ёки ташқи таъсирлар остида содир бўлувчи реал жараёнлар кинетикаси изоҳининг ишончлилигини ҳар доим ҳам қаноатлантирмайди.

Чохральский усулида ўстирилган n-Si намуналари тузилиши бўйича амалий тадқиқотлар натижалари улар ҳажмида узунликлари $\sim 1,5 \cdot 10^{-6}$ м гача бўлган чизиқли дислокацияларнинг кузатилишини кўрсатди (12-расм). Бундай дислокацияларнинг зичлиги $\sim 10^4$ см⁻² ни ташкил қилади. Улар игнасимон шаклга эга эканлиги тасвирда кўриниб турибди. n-Si<Ni> намуналарида бундай шаклни такрорловчи микробирикмалар ҳосил бўлади.

Si монокристалли ҳажмида диффузиявий легирлашда вакансион ғоваклар ҳосил бўлишининг мумкин бўлган механизми тақдим этилди. Маълумки, юқори ҳароратларда диффузия жараёнида атомларнинг кристалл тугунларидан кетиши ҳисобига ортиқча вакансиялар концентрацияси кўпайиб боради. Кристаллдаги дислокациялар ортиқча вакансиялар тўпланиш жойи бўлиб, бунинг натижасида вакансион ғоваклар ҳосил бўлади. Ортиқча вакансияларнинг кичик бўлган дастлабки концентрациясида ($c_v < 10^6$) бундай ғовакларнинг ўсиши босқичли характерга эга бўлади. Ғовакнинг бошланғич тез ўсиш босқичи $R < 0,5R_k$, бунда $R_k = 10^4$ б/Т (б-панжара даври) ўлчамигача, дислокациялар бўйлаб ғоваклараро масофа l_p нинг кичик ўрта қийматига $l_p = (R_k/2)4\pi r_d/3c_v$ тўғри келади. Кейинги босқичда ғоваклар ўсиши, агарда вакансиялар билан таъминланиш йўқ бўлса, кескин секинлашади ва кейинчалик бундай микроғоваклар макроғоваклар пайдо бўлиш жойига айланиши мумкин. Кристалларда вакансия ҳосил бўлиш энергиясининг одатдаги қиймати 1 эВ ни ташкил этишини ҳисобга олганда, $T > 1323$ К ҳароратларда Si монокристаллида вакансиялар концентрацияси 10^{16} см⁻³ дан кам бўлмайди ва у макроғовак ҳосил бўлиши учун етарли ҳисобланади. 13-расмда n-Si намунасида $T = 1323$ К ҳароратда ТК дан сўнг ҳосил бўлган вакансион ғоваклар микротасвири келтирилган.

Диффузиявий легирлашда киришма микробирикмаларининг ҳосил бўлиш жараёни кетма-кетлигини аниқлаш мақсадида электрон-зондли микроанализ усулида намуналар тузилишини комплекс тадқиқ қилинди.

Тадқиқотларда секин совутиш ($v_{\text{сов}} \leq 1$ град/с) орқали олинган ҳажмида нисбатан катта ўлчамли ва кўп қатламли тузилишга эга бўлган микробирикмалар ҳосил бўлувчи $\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle$, $\text{Si}\langle\text{Co}\rangle$ ва $\text{Si}\langle\text{Mn}\rangle$ намуналаридан фойдаланилди.

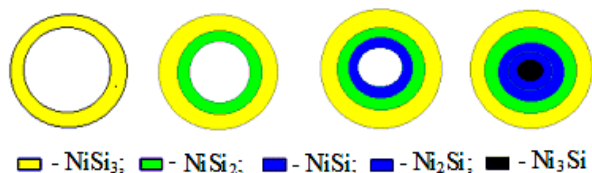


12-расм. n-Si намуналарида ўстириш жараёнида ҳосил бўлувчи чизикли дислокациялар.



13-расм. n-Si намунаси ҳажмида $T=1323$ K ҳароратли ТК да ҳосил бўлувчи вакансион ғоваклар.

Ҳосил бўлувчи преципитат ёки микробирикмалар эволюцион ривожланишининг фазавий ўзгаришлари бўйича ўтказилган электрон-микроскопик таҳлил силицид ҳосил бўлиш жараёнларини таққослаш ҳамда уларнинг содир бўлиш кетма-кетлигини аниқлаш имконини берди. Таъкидлаш жоизки, ҳар хил турдаги силицидларни ҳосил бўлиш энергияси қиймати ва уларнинг преципитатлар ҳажми бўйича маълум бир тартибда мос равишда жойлашуви уларнинг шаклланиш кинетикасини аниқлаш имкониятини яратади. Бизнинг тасаввуримизда катта ўлчамли, кўп қатламли тузилишга эга бўлган преципитатларнинг шаклланиш босқичлари схематик тасвири 14-расмда келтирилган.



■ - NiSi_3 ; ■ - NiSi_2 ; ■ - NiSi ; ■ - Ni_2Si ; ■ - Ni_3Si

14-расм. Катта преципитатлар шаклланишининг схематик тасвири.



Совутиш вақти

15-расм. Кремнийда никель микробирикмалари ҳосил бўлиши кетма-кетлигининг схематик кўриниши.

Диффузиявий легирлаш жараёнида микробирикмалар тузилмавий шаклланишининг алоҳида босқичларини ва уларнинг ўсиш механизмларини кўриб чиқиш, реакция зонасига легирловчи киришма атомларининг кучли оқими мавжуд бўлиши, кристалл панжарадаги вакансион ғоваклар, дислокациялар ва ёриқлар атрофида мустақил фаза сифатидаги Ni атомларининг катта миқдори, NiSi_3 силицидининг барқарор бўлмаган ҳолатга ўтишига ва у NiSi_2 туридаги силицидга айланишига олиб келади. Бу жараёнда диффузия Ni ни реакция зонасига боришида нафақат транспортни таъминлайди, балки NiSi_3 туридаги силицидни ҳосил қилиш учун керакли никель атомларидан ташқари, унинг ортиқча миқдорини ҳам яратади. Шундай қилиб, NiSi_3 туридаги силицид ҳосил бўлиш оддий реакцияси мураккаблашиб, унинг бошланғич босқичларида параллел равишда икки

жараён содир бўлади. Сирт зонасида NiSi_3 ҳосил бўлиб, «силицидланиш» давомида унинг ички зонасида NiSi_2 ҳосил бўлади. Диффузиядан сўнг намуналарни совутиш тезлигига боғлиқ ҳолда силицидланиш жараёнини микротузилмада киришма атомлари миқдорининг ортиб бориши тартибида тасвирлаш мумкин. Преципитат зичлашиб боришининг кейинги босқичлари киришма атомларининг атомлараро ва фазалараро чегараларини сизиб ўтиш жараёнлари билан аниқланади. Буни назарда тутган ҳолда, преципитатларни ҳосил бўлиш жараёнининг бошланғич босқичида NiSi_3 туридаги силицид ҳосил бўлиб, сўнгра қуйидаги тартибда навбатдаги силицидлар ҳосил бўлади: NiSi_2 , NiSi , Ni_2Si , Ni_3Si ва бошқалар.

Силицидлар ўсишини ўрганиш бўйича маълумотлар, уларнинг қалинлиги бўйича ўсиши металл ҳисобига содир бўлишини кўрсатди. Янада юқори ҳароратларда кремний билан бойитилган (масалан NiSi_3) фазалар ҳосил бўлиши, асосий матрица атомлари билан бойитилиши ҳисобига вужудга келади. 15-расмда диффузиядан сўнг намуналарни совутиш вақти давомийлиги бўйича фазавий шаклланиш кетма-кетлигининг схематик кўриниши келтирилган. Кўриниб турибдики, биринчи навбатда NiSi_3 туридаги никель силицидлари, сўнгра ундан кейинги турдаги NiSi_2 силициди ҳосил бўлади ва шу кўринишда никель киришмалари учун микробирикма маркази охирги фаза ҳисобланади. Катта микробирикмаларнинг марказий қисмида металл билан бойитилган Ni_3Si туридаги силицидлар ҳосил бўлади.

Со микробирикмаларининг Si даги шаклланиш босқичлари ҳамда уларнинг ўсиш механизмаларини ўрганиш натижалари кўп қатламли Со микробирикмалари шаклланиши ҳам четки қатламлардан бошланишини кўрсатди. Микробирикмалар шаклланиш жараёнининг дастлабки босқичида CoSi_3 туридаги силициди, сўнгра сирт зонасида киришма атомлари концентрациясининг ортиб бориши билан киришма атомларининг микробирикма-матрица кристали ҳамда фазалараро чегараларида сизиб ўтиш жараёни кучайиб боради ва натижада қуйидаги кетма-кетликда бошқа турдаги силицидлар ҳосил бўлади: CoSi_2 , CoSi , Co_2Si ва бошқалар.

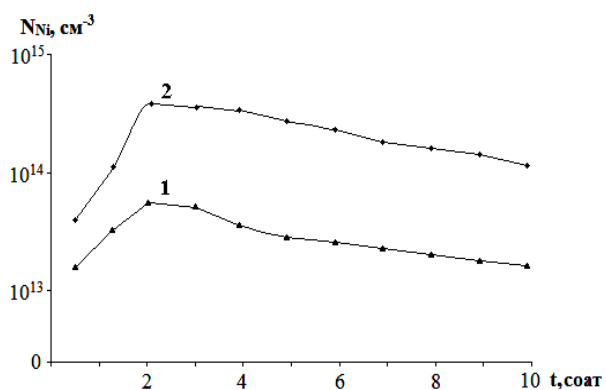
Mn микробирикмаларининг кремнийдаги ўсиш кинетикасини тадқиқ қилиш бу ҳолатда ҳам кўп қатламли Mn микробирикмалари ҳосил бўлиши сиртки қатламлардан бошланишини кўрсатди. Кўп қатламли катта микробирикмалар шаклланиши MnSi_2 туридаги силицидлардан иборат бўлган сиртки қатламдан бошланади, сўнгра қуйидаги кетма-кетликда кейинги силицидлар ҳосил бўлади: MnSi , Mn_5Si_3 , Mn_3Si .

Юқоридагилардан келиб чиқиб, диффузиявий легирлашда кўп қатламли Ni, Co ва Mn киришма микробирикмаларининг ҳосил бўлиши ва шаклланиши қуйидаги кетма-кетликда содир бўлиши аниқланди. Дастлаб таркибида киришма атомлари энг кам бўлган силицид, яъни микробирикманинг сиртки қатлами ҳосил бўлади. Сўнгра таркибида киришма атомлари миқдори ортиб бориш тартибида кейинги силицидлар ҳосил бўлади.

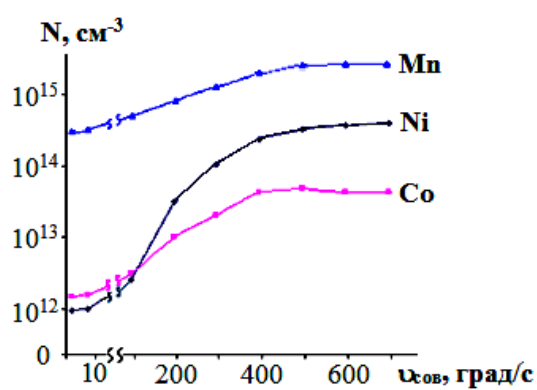
Диффузия ҳароратининг бошқа омиллар бир хил бўлган ҳолда Si даги электр жиҳатдан фаол Ni атомларининг концентрациясига таъсирини 1373 K

ва 1523 К ҳароратларда тадқиқ қилиш натижалари 16-расмда келтирилган. Расмдан кўриниб турибдики, 1523 К ҳароратда, 2 соат мобайнида Ni диффузияси электр жиҳатдан фаол бўлган Ni атомлари концентрациясини 10^{13} дан 10^{14} см⁻³ гача ўсишига олиб келади (16-расм, 2-эгри чизик). Диффузияли куйдириш вақтининг кейинги орттириб борилиши бу қийматни камайишига олиб келади ва t=10 соатга тенг бўлганда бу камайиш ~5 мартани ташкил этади. Кобальт киришмаси билан ўтказилган худди шундай тадқиқот натижалари никельдан фарқли равишда, шундай боғлиқликда тадқиқотнинг ҳарорат интервалида тўлалигича чизиқли ўсишини ва t=10 соатда у ~6 мартани ташкил этишини кўрсатди.

Si монокристалида 1523 К ҳароратли диффузиядан сўнг $v_{сов}$ қийматининг электр жиҳатдан фаол бўлган Ni, Co ва Mn киришма атомлари концентрациясига таъсири, $v_{сов}=1\div 10$ град/с нинг кичик қийматлари Si электр хусусиятида сезиларли ўзгаришларга олиб келмаслигини кўрсатди (17-расм). $v_{сов}=100\div 400$ град/с интервалида $v_{сов}$ қийматининг ошиб бориши билан электр жиҳатдан фаол бўлган Ni ва Co атомларининг концентрацияси сезиларли ортади. Ni атомлари учун бу ўсиш, деярли, икки тартибни, Co атомлари учун эса ~12 мартани ташкил этади. $v_{сов}$ қийматининг мазкур интервалида электр жиҳатдан фаол бўлган Mn атомлари концентрацияси ~6 мартага ортади. $v_{сов}$ қийматини 600 град/с ва ундан ошириш киришма атомларининг электр жиҳатдан фаол концентрацияси ўзгаришига олиб келмайди.



16-расм. Электр жиҳатдан фаол никел атомлари концентрациясининг: 1-1373 К ва 2-1523 К ҳароратларда диффузияли куйдириш давомийлигига боғлиқлиги.



17-расм. Si да электр жиҳатдан фаол Ni, Co ва Mn атомлари концентрациясининг 1523 К ҳароратда 2 соат давомида диффузияли куйдиришдан сўнг $v_{сов}$ га боғлиқлиги.

Шундай қилиб, Si да электр жиҳатдан фаол Ni атомларининг энг юқори концентрацияси икки соатли диффузиявий куйдиришдан сўнг эришилиши амалий тадқиқотлар орқали исботланди. Ni учун Si намуналарида, электр жиҳатдан фаол атомларнинг энг юқори концентрацияси ($5 \cdot 10^{14}$ см⁻³) шароитида, киришма марказларининг энергия сатҳлари E_c - ($0,4 \pm 0,01$) ва E_v + ($0,2 \pm 0,02$) эВ ни ташкил қилади. Кўплаб намуналар учун ушбу энергия сатҳлари ва улар концентрациясининг қийматлари қайта куйдиришларда ҳам юқори даражада ўзгармасдир. Si да Co киришма ҳолатлари учун ўзгармас

катталиклар, Ni ни Si даги диффузия шароитларига айнан ўхшаш бўлгандагина эришилади.

Si монокристалини Ni, Co ва Mn киришмалари билан диффузиявий легирлашда электр жихатдан фаол атомларнинг энг юқори концентрациялари $N_{Ni} \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $N_{Co} \approx 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $N_{Mn} \approx 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ни ташкил этади. Si да Ni атомлари акцептор, Mn - донор хусусиятларини намоиш этса, Co эса амфотер киришма ҳисобланади.

Диссертациянинг «**Si монокристалида киришма атомлари микробирикмаларининг тузилиши ва кимёвий таркиби**» деб номланувчи бешинчи бобида кремний монокристалида никель, кобальт ва марганец киришма атомларининг преципитат, микро- ва нанобирикмалари структуравий тузилиши ва кимёвий таркиби бўйича электрон-зондли микротаҳлил усули ёрдамида олинган тадқиқотлар натижалари келтирилган. Ni, Co ва Mn билан легирланган кремний монокристаллари ҳажмида киришма микробирикмаларининг морфологияси, яъни ўлчамлари, шакллари, структуравий тузилиши бўйича ўтказилган тадқиқотлар, уларнинг ушбу катталиклари, асосан, намуналарни диффузиявий куйдиришдан сўнг совутиш тезлигига боғлиқ эканлигини кўрсатди.

Диффузиявий куйдиришдан сўнг тез совутиш $v_{сов} > 200$ град/с билан олинган Si<Ni>, Si<Mn> ва Si<Co> намуналаридаги киришма микробирикмаларининг геометрик шакллари тадқиқ қилиш, бундай намуналар ҳажмида игнасимон, дисксимон ва линзасимон микробирикмалар шаклланишини кўрсатди. Секин совутилган ($v_{сов} < 1$ град/с) намуналарда эса, асосан, линзасимон ва сферасимон шаклга эга бўлган микробирикмалар кузатилади. Олинган амалий тадқиқотлар натижалари асосида Si<Ni>, Si<Co> ва Si<Mn> намуналарида ҳосил бўлувчи киришма микробирикмаларининг геометрик шакллари уларнинг ўлчамларига ва бу билан намуналарни диффузиявий куйдиришдан сўнг совутиш тезлигига боғлиқлиги салмоқли эканлиги аниқланди.

Кремний монокристалида 3d-гурух элементлари микробирикмаларининг кимёвий таркиби ҳақидаги мавжуд маълумотлар, ҳозирги вақтга қадар мазкур соҳа етарлича ўрганилмаганлигини кўрсатади. Шунинг учун киришма микробирикмаларининг кимёвий таркибини аниқлаш мақсадида биз томонимиздан электрон-зондли таҳлиллар ўтказилди. Si<Ni> намуналаридаги преципитатлар ҳажми бўйича силицид қатламлари кимёвий таркибининг таҳлили, уларда кинди атомларининг фоизли улуши преципитат ўлчами ва шаклига боғлиқ ҳолда турли қийматларга эга эканлигини кўрсатди. n-Si<Ni> намуналарида диаметри $d > 2 \cdot 10^{-6}$ м бўлган катта преципитатларнинг марказида ушбу қиймат $\sim 75\%$ ни, кичикларида ($d \leq 10^{-6}$ м) эса $\sim 25\%$ ташкил қилади. Мазкур намуналарда никель атомлари концентрациясининг преципитат диаметрига боғлиқлиги бўйича тадқиқот натижалари преципитат ҳажми бўйича никель атомларининг фоизли улуши преципитат марказига йўналиш бўйича ортиб боришини кўрсатди.

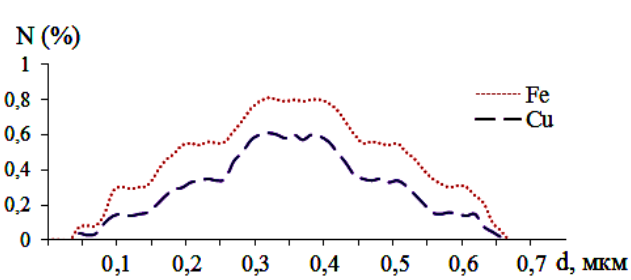
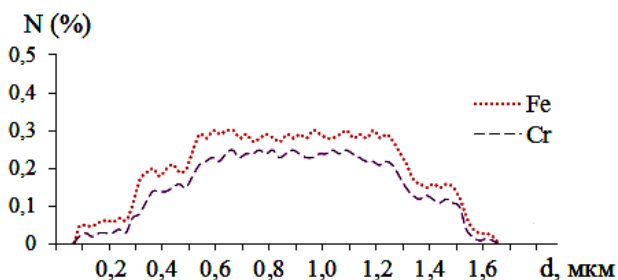
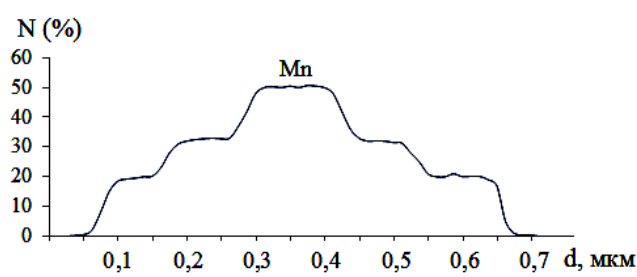
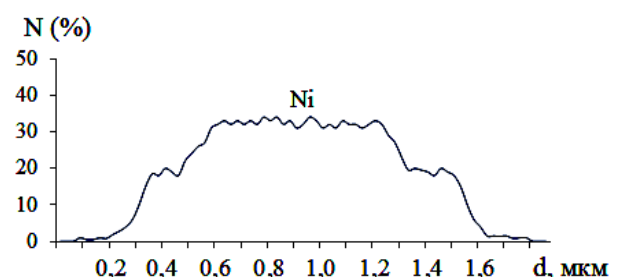
Преципитат ҳажмида жойлашган силицидларнинг кимёвий таркибини комплекс тадқиқ қилиш, ҳар бир силицид қатламида асосий киришма атомлари билан темир, хром, мис ва бошқа шу каби технологик киришмаларнинг атомлари орасидаги нисбатни аниқлаш имконини яратди.

1-жадвалда ўлчами $d=5 \cdot 10^{-6}$ м га тенг бўлган сферасимон шаклдаги тўртта қатламга эга бўлган преципитат диаметри бўйича Si, Ni, Fe ва Cr атомлари тақсимоти ҳақида маълумотлар келтирилган. Унда асосий ва технологик киришмалар атомларининг энг катта улуши преципитат марказида жойлашганлиги кўриниб турибди.

1-жадвал

Элементлар	Преципитат марказидан масофа			
	Марказда	(1/4)R	(1/2)R	(3/4)R
Si	24,50	34,75	65,30	76,45
Ni	73,95	64,15	33,85	22,75
Fe	0,4	0,32	0,2	0,1
Cr	0,3	0,2	0,15	0,05

18-расмда n-Si<Ni> намуналаридаги ўлчами $d=1,5 \cdot 10^{-6}$ м, сфера шаклига эга бўлган преципитат диаметрига асосий ва технологик киришмалар атомлари концентрациясининг боғлиқлик графиклари келтирилган. Унда никель атомларининг фоизли улуши преципитат ҳажми бўйича марказга йўналиш бўйлаб ортиб бориши кўриниб турибди ва марказда у ~30% ни ташкил этади. Бундан ташқари технологик киришмалар атомларининг жойлашувида ҳам маълум бир қонуният кузатилади. Преципитат марказида Fe атомлари ~0,3 % ни, Cr атомлари эса ~0,27 % ни ташкил этади. Йирик ўлчамли никель микробирикмаси ($d=8 \cdot 10^{-6}$ м) марказий қисмида Ni, Fe ва Cr атомларининг фоизли улуши мос равишда ~75%, ~0,8% ва ~0,6% га етади.



18-расм. n-Si<Ni> намуналарида ўлчами $d=1,5 \cdot 10^{-6}$ м бўлган преципитат диаметри бўйича Ni, Fe ва Cr атомларининг тақсимланиши.

19-расм. p-Si<Mn> намуналарида ўлчами $d=0,7 \cdot 10^{-6}$ м бўлган преципитат диаметри бўйича Ni, Fe ва Cu атомларининг тақсимланиши.

19-расмда р-Si<Mn> намуналарида, $d=0,7 \cdot 10^{-6}$ м ўлчамдаги преципитат билан ўтказилган худди шундай тажрибалар натижалари келтирилган. Тасвирда Fe ва Cu технологик киришма атомларининг преципитат ҳажми бўйича тақсимотида асосий киришма Mn атомларининг тақсимотида маълум бир ўхшашлик кўриниб турибди, яъни уларнинг энг юқори улуши преципитат марказида жойлашган бўлиб, сиртга томон у камайиб боради. Ўлчамлари $\sim(0,7 \div 1) \cdot 10^{-6}$ м ни ташкил этувчи преципитатлар марказий қисмида Mn атомларининг энг юқори улуши $\sim 50\%$ ни, Fe ва Cu атомлари учун эса мос равишда $\sim 0,8\%$ ва $\sim 0,6\%$ ни ташкил қилади.

р-Si<Co> намуналаридаги игнасимон ва дисксимон микробирикмалар кимёвий таркибининг микротузилмавий таҳлили бундай микробирикмалар ҳажмида киришма кобальт атомларининг фоизли улуши $\sim 30\%$ ни ташкил этишини кўрсатди. Киришма ва асосий матрица атомларининг бундай нисбати, уларнинг CoSi_2 силицидидан ташкил топганлигини кўрсатади. р-Si<Co> намунасидаги ўлчами $d=6 \cdot 10^{-7}$ м га тенг бўлган линзасимон шаклли микробирикма ҳажми бўйича темир ва мис технологик киришмалари атомларининг тақсимоти бўйича тадқиқотлар натижалари микробирикма ҳажмида Fe ва Cu атомларининг энг юқори фоизли улуши мос равишда $\sim 0,2\%$ ва $\sim 0,15\%$ ни ташкил қилишини кўрсатди.

Шундай қилиб, олинган натижалар асосида таъкидлаш мумкинки, киришма микробирикмаларининг ўсиши сиртқи қобиклардан бошланади, яъни Si_xNi_y , Si_xCo_y ёки Si_xMn_y туридаги бирикмалар ҳосил бўлиши куйидаги тартибда содир бўлади: дастлаб таркибида киришма атомлари концентрацияси энг кам бўлган силицидлар, сўнгра улар таркибида киришма атомларининг улуши ортиб бориши тартибида кейинги силицидлар ҳосил бўлади. Киришма атомларининг энг катта миқдори, микробирикма ўлчамига боғлиқ бўлмаган ҳолда, унинг марказида жойлашган. Si<Ni> намуналарида катта ($d > 2 \cdot 10^{-6}$ м) микробирикмалар ҳажмида асосий киришма атомлари фоизли улушининг энг катта қиймати $\sim 75\%$ ни ташкил қилади. Кичик ($d < 10^{-6}$ м) микробирикмалар ҳажмида эса ушбу қиймат $\sim 25\%$ ни ташкил қилади. Si<Co> намуналаридаги катта ($d \geq 8 \cdot 10^{-7}$ м) микробирикмалар ҳажмида кобальт атомларининг энг юқори миқдори $\sim 70\%$ ни, кичик ($d < 8 \cdot 10^{-7}$ м) ларида эса бу кўрсаткич $\sim 30-33\%$ ни ташкил этади. Si<Mn> намуналарида нисбатан катта ($d \geq 6 \cdot 10^{-7}$ м) микробирикмалар ҳажмида марганец киришма атомларининг энг катта миқдори $\sim 60\%$ ни ташкил этади. Кичик ўлчамли $d < 6 \cdot 10^{-7}$ м микробирикмалар ҳажмида марганец атомлари миқдорий улуши $\sim 25-30\%$ га тенг.

Киришма преципитатлари ва микробирикмалари ҳажмида Fe, Cr, Cu ва бошқалар каби технологик киришмалар атомлари мавжудлиги аниқланди. Бундай киришма атомларининг энг катта миқдори микробирикма марказида жойлашган бўлиб, марказдан сиртга томон масофа узоқлашган сари камайиб боради. Микробирикмалар ҳажмида технологик киришмалар атомлари, асосий киришма атомлари тақсимоти қонунияти бўйича тақсимланади. Бундан эса бошқариб бўлмайдиган киришмалар (Fe, Cr, Cu ва бошқалар)

атомлари кремнийни диффузияли легирлашда, силицидлар ҳосил бўлиш жараёнига маълум бир даражада таъсир қилади, деган хулоса келиб чиқади. Улар турли силицид қатламлари пайдо бўлиши ҳамда ўсишининг кинетикасига таъсир кўрсатади. Ушбу киришмалар атомлари киришма преципитатлари ва микробирикмалари ҳосил бўлиш жараёнида ўзига ҳос катализатор ролини бажариши мумкинлиги эҳтимолдан ҳоли эмас.

Киришма микробирикмалари кремнийнинг кристалл тузилишига сезиларли таъсир кўрсатиши аниқланди. Микробирикмалар атрофида ҳосил бўлувчи дислокациялар ўлчами ва зичлиги микробирикманинг шакли ва ўлчамига, шунингдек, унинг сиртга нисбатан жойлашишига боғлиқ бўлади. Нисбатан кичик ўлчамли $\sim 10^{-6}$ м, термодинамик номувозанат ҳолатида бўлган микробирикмалар аторифидаги кристалл тузилишининг микротузилмавий таҳлили микробирикма шаклига боғлиқ бўлмаган ҳолда улар атрофида узунлиги бир неча микрометрга етувчи дислокация чизиклари, баъзида эса микроёриқлар кузатилишини кўрсатди.

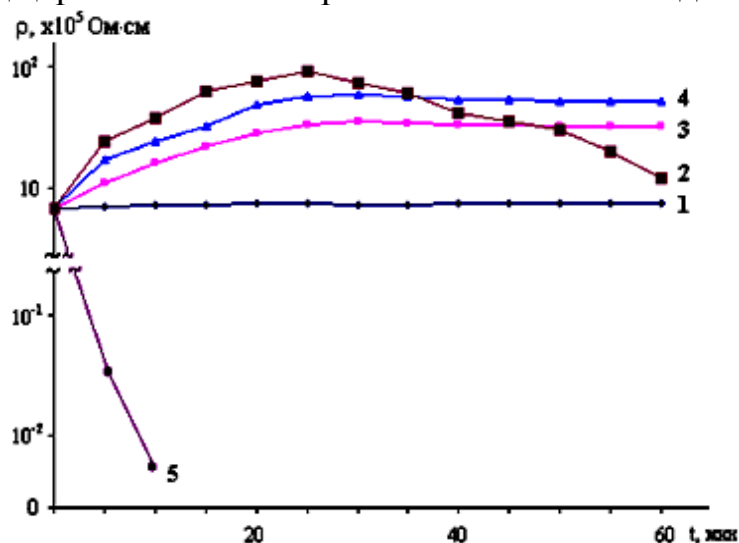
Диссертациянинг **«Киришма микробирикмали кремний хусусиятларига ташқи омилларнинг таъсири»** деб номланувчи олтинчи бобда киришма микробирикмаларига эга бўлган кремний монокристаллининг физик-кимёвий хусусиятларига ташқи таъсирларнинг таъсири бўйича тадқиқотлар натижалари келтирилган.

Ni, Co ва Mn киришма микробирикмаларига эга бўлган кремний монокристаллининг электр хусусиятларига термик куйдиришнинг таъсирини тадқиқ қилиш учун тайёрланган намуналарга 373-1273 К ҳароратларда, 5÷60 минут вақт интервалида кейинги тез совутиш билан изотермик ишлов берилди. Ҳар бир куйдириш босқичидан сўнг намуналарнинг электр хусусиятлари ўрганилди.

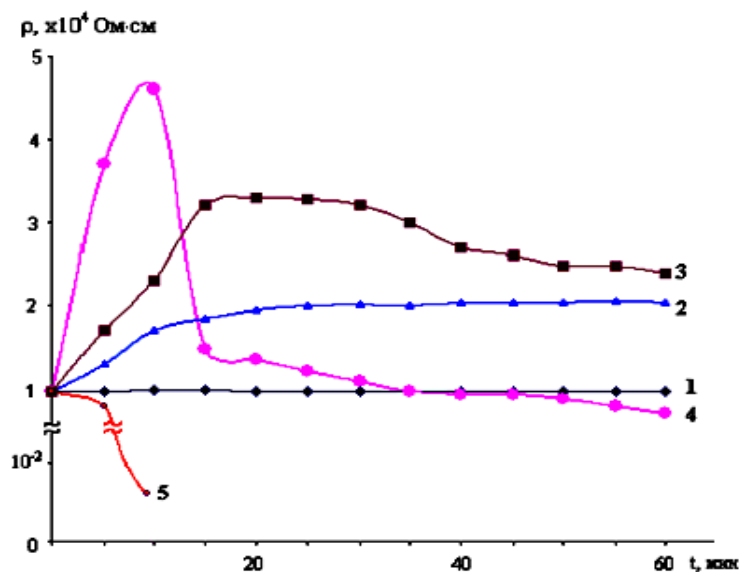
Солиштирама қаршилиги $\rho_0=7 \cdot 10^4$ Ом·см бўлган n-Si<Ni> намуналарида солиштирама қаршилик (ρ) нинг куйдириш вақтига боғлиқлигини тадқиқ қилиш натижалари 373-673 К ҳарорат интервалида ПХҚда сезиларли ўзгаришлар кузатилмаслигини кўрсатди (20-расм, 1-эгри чизик). ПХҚнинг кейинги қийматларида 723-1023 К ҳароратларда, 20÷30 минут давомида n-Si<Ni> намуналари солиштирама қаршилиги қийматининг ортиши кузатилади (20-расм, 2-4-эгри чизиклар). Куйдириш вақтини кейинги ошириб боришда $\rho(t)$ эгри чизиклари ўзининг энг юқори қийматидан ўтиб, сўнгра камайиш кузатилади. Расмда куйдиришнинг дастлабки босқичларида 5 минут давомида ТК ҳарорати ортиши билан $\rho(t)$ эгри чизигининг кескин ўсиши кўриниб турибди. Куйдириш ҳароратини кейинги орттириб боришда бошқа эффект кузатилади, яъни $T=1273$ К ҳароратда, 5÷10 минут мобайнида ТК натижасида n-Si<Ni> намуналарининг ρ қиймати кескин камайиб, дастлабки намунанинг солиштирама қаршилигига деярли тенглашиб қолади. (20-расм, 5-эгри чизик).

Солиштирама қаршилиги $\rho=2 \cdot 10^4$ Ом·см бўлган p-Si<Ni> намуналарида 25 минут давомида $T=1273$ К ҳароратдаги ТК жараёнида намуналар ρ қийматида ~ 12 мартагача кескин ортиш кузатилади. ТК вақтини кейинги 20

минут мобайнида орттириб боришда, ρ қийматининг кескин камайиши кузатилади, бу эса ўта компенсирланган яримўтказгичда яримўтказгич-киришма қаттиқ қоришмасининг парчаланишига мос келади.



20-расм. n-Si<Ni> намуналарида ρ қийматининг куйдириш вақтига боғлиқлиги, бунда ТК: 1-473 К; 2-723 К; 3-823 К; 4-1023 К; 5-1273 К.



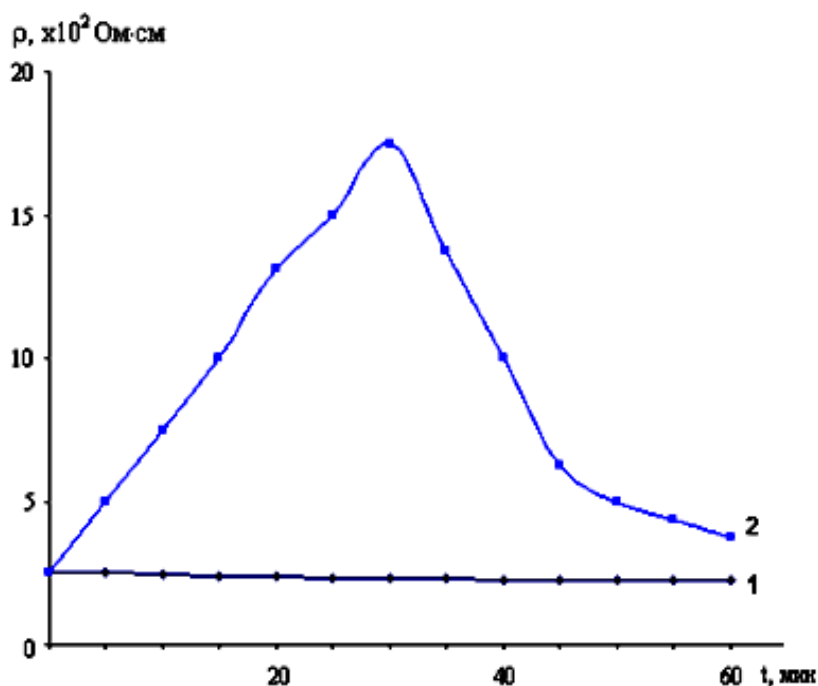
21-расм. n-Si<Co> намуналарида ρ қийматининг куйдириш вақтига боғлиқлиги, бунда ТК: 1-373 К; 2-623 К; 3-873 К; 4-1073 К; 5-173 К.

Солиштира қаршилиги $\rho=9 \cdot 10^3$ Ом·см бўлган n-Si<Co> намуналари билан ўтказилган айнан шундай тадқиқотлар натижалари 373-573 К ҳарорат интервалида ПХК сезиларли ўзгаришлар бўлмаслигини кўрсатди (21-расм, 1-эгри чизиқ). ТК нинг кейинги қийматларида, 623-823 К ҳароратларда 20 минут мобайнида n-Si<Co> намуналарида ρ қийматининг ортиши кузатилади (21-расм, 2 ва 3-эгри чизиқлар). Куйдириш вақтининг кейинги давомида у, деярли, ўзгармайди. 1073 К ҳароратда, ПХКнинг бошланғич босқичида, 10 минутгача ρ қийматининг кескин ортиши кузатилади ва бу ўсиш ~4,5 мартани ташкил қилади. Кейинчалик $\rho(t)$ эгри чизиғи ўзининг энг юқори қийматидан ўтиб, сўнгра 15 минут мобайнида кескин камайиш кузатилади (21-расм,

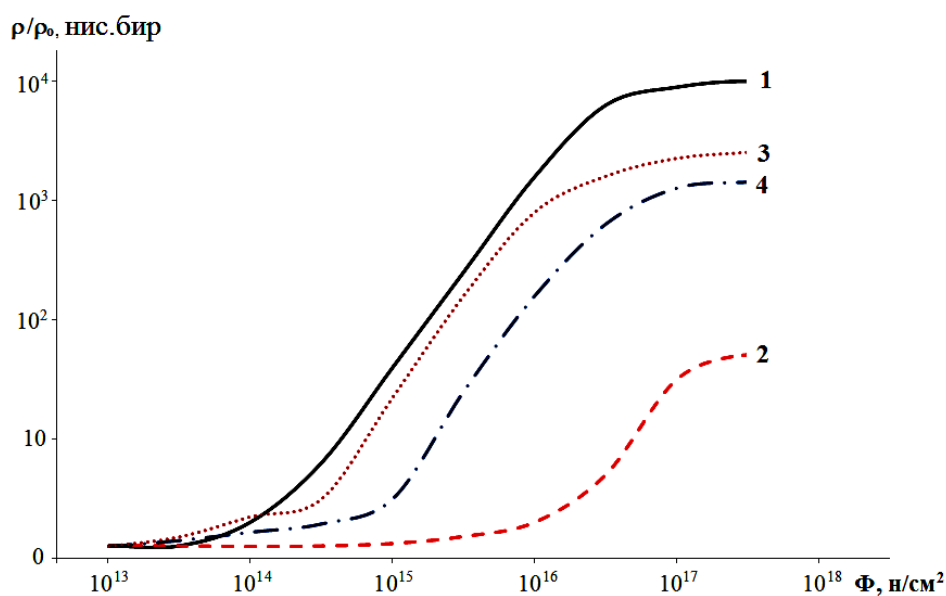
4-эгри чизик). $T=1173$ К ҳароратда 10 минут мобайнида ТК ρ қийматининг кескин камайишига олиб келади ва у дастлабки намунадагига яқинлашади, яъни кремнийда кобальт микробирикмаларининг парчаланиши содир бўлади (21-расм, 5-эгри чизик).

$p\text{-Si}\langle\text{Mn}\rangle$ намуналарида 373-773 К ҳароратларда, 5 дан 60 минутгача бўлган вақт оралиғида ПХКнинг таъсирини тадқиқ қилиш намуналарнинг $\rho(t)$ боғлиқликларида сезиларли ўзгаришлар бўлмаслигини кўрсатди (22-расм, 1-эгри чизик). Бу ҳолат Mn, Co ва Ni каторида марганец атомларининг кремнийда эрувчанлиги энг юқори бўлиб, микробирикмалар ҳосил қилиш қобилияти кичиклиги билан тушунтирилади. Дарҳақиқат, олинган амалий тадқиқот натижалари $p\text{-Si}\langle\text{Mn}\rangle$ намуналарида 373-773 К ҳарорат интервалида ПХК давомида оддий яримўтказгич-киришма қаттиқ қоришмаси парчаланиши содир бўлишини кўрсатади ва бу адабиётлардаги маълумотларга мос келади. Бироқ, $T=973$ К ҳароратда 30 минут мобайнидаги ПХКда намуналарнинг ρ қиймати ўсиши кузатилади (22-расм, 2-эгри чизик). Куйдириш вақтини кейинги орттиришда, навбатдаги 20 минут мобайнида ρ қийматининг, деярли, унинг дастлабки қийматига қадар кескин камайиши кузатилади. $\rho(t)$ боғлиқликнинг бундай ўзгариши киришма марганец микробирикмаларининг парчаланиши билан боғлиқлиги тахмин қилинади.

Шундай қилиб, олинган тажриба натижалари асосида ПХК таъсири остида киришма микробирикмаларига эга бўлган кремний электр хусусиятлари ўзгариш кинетикасида икки босқични ажратиш мумкин. $\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle$ $\text{Si}\langle\text{Co}\rangle$ ва $\text{Si}\langle\text{Mn}\rangle$ намуналарини куйдиришнинг биринчи босқичида, намуналарни диффузияли куйдиришдан сўнг совутиш вақтида ҳосил бўлувчи термодинамик номувозанат ҳолатида бўлган киришма тўпламларининг парчаланиши содир бўлади. Ушбу жараёнда киришма атомларининг алоҳида ажралиб чиқиши уларнинг электр жиҳатдан фаол ҳолатдаги концентрациясини ортишига олиб келади. Бунга Si даги Ni ва Co атомлари микробирикмалари парчаланишида кўшимча ваканцияларнинг ҳосил бўлиши яхши имконият яратади. Натижада бундай намуналарнинг $\rho(t)$ боғланишларида намуналарнинг ρ қийматида кескин ортиш ёки камайишни (легиранган Si нинг ўтказувчанлик типига боғлиқ ҳолда) кузатамиз. Куйдириш вақтини ошириши билан киришма атомларининг яримўтказгич-киришма атом қаттиқ қоришмасида классик парчаланиши содир бўлади, яъни электр жиҳатдан фаол бўлган номувозанат ҳолатидаги тугунларда жойлашган киришма атомлари (Ni^- , Co^-) турли ютувчи марказларга (дислокациялар, нейтрал тўпламлар, сирт)га кетиши содир бўлади. Бу ҳолатни микроскопик тадқиқотлар натижалари ҳам тасдиқлайди, уларда микробирикмаларнинг емирилиши ёки ўлчамининг кичрайиши ва улардаги атомларнинг бир қисми дислокацияларга ўтиши кузатилади.



22-расм. p-Si<Mn> намуналарида ρ қийматининг куйдириш вақтига боғлиқлиги, бунда ТК: 1-373 К; 2-973 К.



23-расм. 1– n-Si<даст>; 2– Si<Ni>; 3– Si<Mn>; 4– Si<Co> намуналарида ρ/ρ_0 ни нурланишнинг интеграл дозасига боғлиқлиги.

Легирланган ва дастлабки намуналарнинг солиштирма қаршилигига нейтронли нурланиш таъсирини тадқиқ қилиш, уларнинг бир бирдан сезиларли даражада фарқ қилишлигини кўрсатди. Дастлабки намуналарда нейтронли нурланишнинг $\Phi=10^{13} \div 5 \cdot 10^{17}$ н/см² дозаларида ρ қиймати, деярли, ~4 тартибга ортишини кўрсатди (23-расм, 1-эгри чизик).

Солиштирма қаршилиги $\rho=5 \cdot 10^3$ Ом·см бўлган Si<Ni> намуналарида ρ нисбий ўзгаришининг нурланиш интеграл дозасига боғлиқлик характери дастлабки намуналарникидан кескин фарқ қилади. $\Phi=5 \cdot 10^{16} \div 2 \cdot 10^{17}$ н/см² нурланиш дозаси интервалида Si<Ni> намуналари ρ/ρ_0 қийматининг нурланиш дозасига боғлиқ ҳолда ўзгариши махсус характерга эга, яъни ушбу

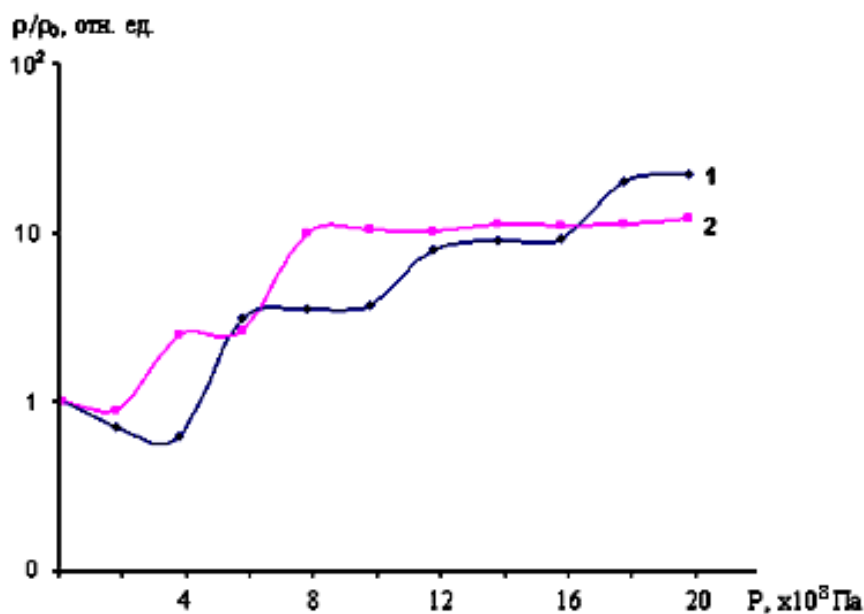
оралиқда намуналар солиштирма қаршилигининг бир тартибга ўсиши кузатилади (23-расм, 2-эгри чизик). $\Phi=5\cdot 10^{17}$ н/см² нурланиш дозасида намуналарнинг ρ қиймати ўсиши ўзининг энг катта қийматига эришади ва у $4,2\cdot 10^5$ Ом·см ни ташкил этади.

Солиштирма қаршилиги $\rho=3,1\cdot 10^2$ Ом·см бўлган n-типли Si<Mn> намуналари ρ қийматида сезиларли ўзгариш $\Phi>10^{14}$ н/см² нурланиш дозасида содир бўлади (23-расм, 3-эгри чизик). Кўриниб турибдики, нурланиш дозасини кейинги ортириб боришда, $\Phi=5\cdot 10^{14}\div 10^{16}$ н/см² интервалида ρ/ρ_0 қийматининг кескин ортиши ва у ~ 2 тартибдан кўпроқни ташкил этиши кузатилади. Солиштирма қаршилиги $\rho=3\cdot 10^3$ Ом·см бўлган Si<Co> намуналарида ρ/ρ_0 қийматининг характерли ўсиши нурланиш дозасининг $\Phi=2\cdot 10^{15}\div 5\cdot 10^{16}$ н/см² интервалида кузатилади, бунда намуналарнинг солиштирма қаршилиги ~ 2 тартибга ортади (23-расм, 4-эгри чизик).

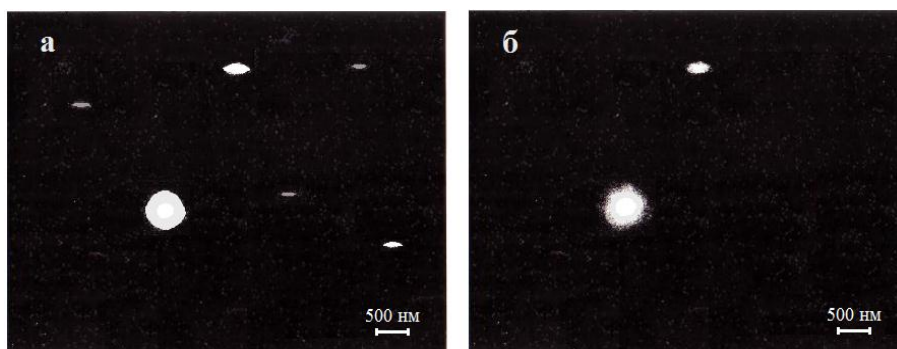
Шундай қилиб, олинган амалий тадқиқотлар натижалари асосида киришма микробирикмаларига эга бўлган монокремнийнинг нурланишга чидамлилиги сезиларли ортиши аниқланди. Si хусусиятига нурланишнинг бундай таъсирини Si<Ni>, Si<Co> ва Si<Mn> намуналаридаги киришма микробирикмаларининг геттерлаш характерига эга эканлиги билан тушунтириш мумкин. Нурланиш жараёнида ҳосил бўлувчи радиацион нуқсонлар киришма микробирикмаларига тортилади ва электр жиҳатдан нейтрал ҳолатга ўтади. Натижада намуналарнинг электр хусусиятларида нисбатан катта бўлмаган ўзгаришлар кузатилади.

Киришма микробирикмаларига эга бўлган Si нинг хусусиятларига ташқи ХТГБнинг таъсирини ўрганиш мақсадида тез совутиш билан ($v_{\text{сов}}>200$ град/с) олинган, солиштирма қаршилиги $\rho=10^3$ Ом·см бўлган n-Si<Ni> намуналари $P=0\div 20\cdot 10^8$ Па интервалида ташқи ХТГБ таъсирига кўйилиб, сўнгра ҳар бир намунанинг ρ қиймати қайта ўлчанди. ХТГБ нинг $P<4\cdot 10^8$ Па гача бўлган дастлабки босқичларида, n-Si<Ni> намуналарида ρ қийматининг ~ 25 % гача камайиши кузатилади (24-расм, 1-эгри чизик). ХТГБ нинг кейинги қийматларида намуналарнинг солиштирма қаршилиги сакрашсимон тарзда ортиб боради. Намуналар ρ қийматининг бундай ўзгариши, ХТГБ нинг маълум бир қийматларида ($4\cdot 10^8$ Па; $12\cdot 10^8$ Па ва $20\cdot 10^8$ Па) киришма микробирикмаларининг парчаланиши содир бўлишини тасдиқлайди. Намуналарнинг $P\geq 4\cdot 10^8$ Па қийматларида, $\rho=f(P)$ боғланишида кузатилувчи қайтмас характери ҳам ХТГБ таъсирида киришма микробирикмаларининг парчаланиши содир бўлишини тасдиқлайди.

Солиштирма қаршилиги $\rho=3\cdot 10^3$ Ом·см бўлган n-Si<Co> намуналари билан ўтказилган айнан шундай тадқиқотлар натижалари, $P<2\cdot 10^8$ Па бўлганда, уларнинг ρ қиймати $10\div 15\%$ га камайишини кўрсатди (24-расм, 2-эгри чизик). $P=4\cdot 10^8$ Па ва $P=8\cdot 10^8$ Па даги ХТГБ таъсири остида намуналар солиштирма қаршилиқ қийматида кескин ўсиш кузатилади ва у ўзининг энг катта қийматига $\rho=7\cdot 10^4$ Ом·см эришади.



24-расм. 1–n-Si<Ni>, 2–n-Si<Co> намуналарида ρ_t/ρ_0 нинг ХТГБ га боғлиқлиги.

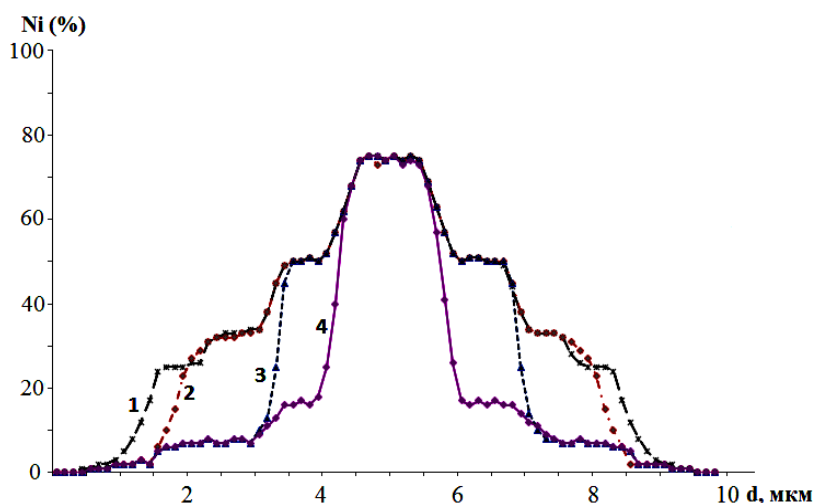


25-расм. n-Si<Co> намунасининг $P=4 \cdot 10^8$ Па даги ХТГБ дан олдинги (а) ва кейинги (б) тасвирлари.

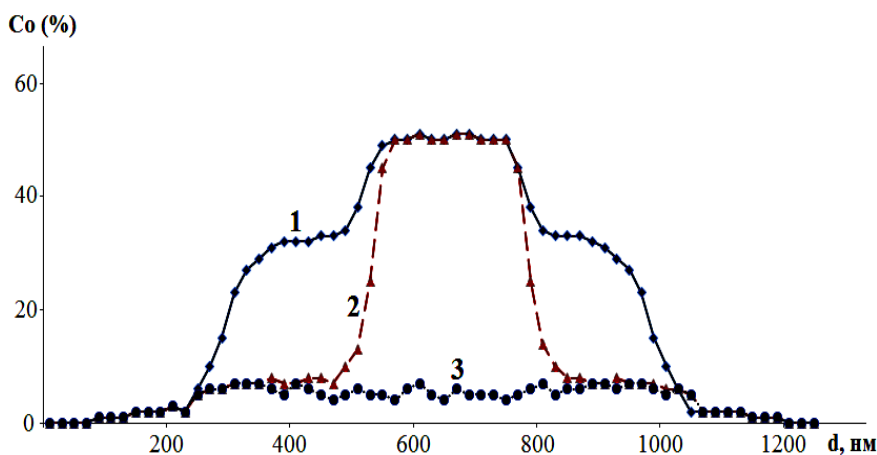
ХТГБ таъсири остида легирланган намуналарнинг солиштирма қаршилиги ўзгаришининг бундай табиатини аниқлаш мақсадида электрон-зондли микроанализатор ёрдамида n-Si<Ni> ва n-Si<Co> намуналаридаги киришма микробирикмаларининг ХТГБ дан олдинги ва кейинги ҳолатини комплекс микротузилмавий таҳлили ўтказилди. n-Si<Co> намуналаридаги киришма микробирикмаларининг микротузилмавий таҳлили, ХТГБ нинг $P=4 \cdot 10^8$ Па қийматида ўлчами $8 \cdot 10^{-7}$ м гача бўлган микробирикмаларнинг парчаланишини тасдиқлайди. 25-расмда n-Si<Co> намуналарининг $P=4 \cdot 10^8$ Па даги ХТГБ дан олдинги ва кейинги микротасвирлари келтирилган. Намуналар ҳажмида мавжуд ўлчами $\sim 8 \cdot 10^{-7}$ м гача бўлган игнасимон ва дисксимон кобальт микробирикмалари ХТГБ таъсиридан сўнг йўқолади, яъни бундай микробирикмалар парчаланadi.

n-Si<Ni> намуналари ҳажмида, $P=4 \cdot 10^8$ Па даги ХТГБ таъсиридан сўнг ўлчамлари $\sim 10^{-6}$ м гача бўлган игнасимон ва дисксимон шаклга эга киришма микробирикмалари миқдори кескин камайиши аниқланди. n-Si<Ni> намуналарини ХТГБ дан олдинги ва кейинги солиштирма таҳлили ҳам, ХТГБ нинг мазкур қийматида кичик микробирикмалар парчаланиши содир бўлишини кўрсатди.

Нисбатан йирик ўлчамли киришма микробирикмаларнинг парчаланиш механизмини ўрганиш мақсадида Si<Ni> намуналаридаги микробирикмалар морфологик тузилишига ХТГБ нинг таъсири комплекс тадқиқ қилинди. 25-расмда сферасимон шаклдаги кўп қатламли микробирикма таркибий тузилишининг микротузилмавий таҳлили келтирилган. ХТГБ таъсирига қадар ушбу микробирикма диаметри бўйича никель атомлари тақсимоти графиги 26-расм (1-эгри чизик) да келтирилган кўринишга эга бўлган. Таҳлиллар $P=4 \cdot 10^8$ Па га тенг бўлган босим таъсирида микробирикма диаметри бўйича киришма атомлари тақсимотида ўзгаришлар кузатилишини, яъни Si_3Ni силицидидан ташкил топган сиртки қобикнинг парчаланишини кўрсатди (26-расм, 2-эгри чизик). ХТГБ қийматини кейинги ортиб бориши микробирикма тузилишининг ўзгаришига олиб келмайди. $P=1,2 \cdot 10^9$ Па даги ХТГБ таъсири остида Si_2Ni туридаги навбатдаги силицид қатлами парчаланаяди (26-расм, 3-эгри чизик). ХТГБ нинг кейинги $P=2 \cdot 10^9$ Па даги таъсирида навбатдаги $SiNi$ туридаги силицид қатламининг парчаланиши кузатилади (26-расм, 4-эгри чизик). Парчаланишнинг бундай кетма-кетлиги сферасимон кўринишдаги нисбатан катта ўлчамли бошқа микробирикмалар учун ҳам характерлидир.



26-расм. 1– 0 Па; 2– $4 \cdot 10^8$ Па; 3– $1,2 \cdot 10^9$ Па; 4– $2 \cdot 10^9$ Па даги ХТГБ таъсирида Ni микробирикмасининг парчаланиш кетма-кетлиги графиги.



27-расм. 1– $2 \cdot 10^8$ Па; 2– $4 \cdot 10^8$ Па; 3– $8 \cdot 10^8$ Па даги ХТГБ таъсирида Со нанобирикмасининг парчаланиш кетма-кетлиги графиги.

27-расмда ўлчами $d=800$ нм, сферасимон шаклга эга икки қатламдан ташкил топган кремнийдаги киришма кобальт нанобирикмасининг ХТГБ таъсири остида парчаланиш кетма-кетлиги графиги келтирилган. Кўриниб турибдики, $P < 2 \cdot 10^8$ Па даги ХТГБ таъсири остида, нанобирикма диаметри бўйича киришма кобальт атомлари тақсимоотида сезиларли ўзгаришлар кузатилмайди, яъни икки қатламли нанобирикма морфологияси ўзгаришсиз қолади (27-расм, 1-эгри чизик). ХТГБ қийматини кейинги ортириб бориш нанобирикма морфологиясида сезиларли ўзгаришларга олиб келади ва $P = 4 \cdot 10^8$ Па га етганда нанобирикма сиртки қобилининг парчаланиши кузатилади (27-расм, 2-эгри чизик). $P = 8 \cdot 10^8$ Па даги ХТГБ таъсири остида нанобирикманинг тўлиқ парчаланиши содир бўлади (27-расм, 3-эгри чизик).

Шундай қилиб, олинган амалий тадқиқотлар натижалари асосида Si даги Ni, Mn ва Co микро- ва нанобирикмаларининг ХТГБ таъсири остида парчаланиш кетма-кетлиги, уларнинг ўлчамлари ва шаклларига боғлиқлиги, яъни дастлаб нисбатан кичик ўлчамли, игнасимон ва дисксимон шаклларга эга бўлган нанобирикмалар, шунингдек, линзасимон ва сферасимон шаклларга эга бўлган каттароқ (>500 нм) нанобирикмаларнинг сиртки қатламлари парчаланиши аниқланди. ХТГБ таъсири остида сферасимон шаклдаги микробирикмаларнинг парчаланиш жараёни қуйидаги тартибда содир бўлиши аниқланди: дастлаб, энг кичик сирт кучланишига эга бўлган сиртки қатлам парчаланadi. Сўнгра ХТГБ қиймати ортиб бориши билан, унинг маълум бир қийматларида микробирикма марказига йўналиш бўйича навбатдаги қатламларнинг парчаланиши содир бўлади.

ХУЛОСА

Ўтказилган амалий тадқиқотлар ва адабиётлар таҳлили, шунингдек, уларни киришма микробирикмалари ҳосил бўлишининг физик асослари ва уларнинг монокремний хусусиятларига таъсири бўйича мавжуд назарий тавсифлар билан таққослаш натижасида қуйидаги хулосаларни қилиш мумкин:

1. Si-Ni, Si-Co ва Si-Mn қаттиқ қоришмаларида киришма атомлари ҳолатларини термодинамик таҳлили асосида киришма микробирикмалари, преципитатлари ёки кластерлари ҳосил бўлишининг муқаррарлиги аниқланди.

2. Диффузиявий легирлаш усули билан олинган n и p-типли Si<Ni>, Si<Co> ва Si<Mn> намуналаридаги киришма преципитатлари ёки микробирикмаларининг ўлчамлари ва шакллари, асосан, намуналарни диффузиявий куйдиришдан кейинги совутиш тезлигига боғлиқлиги аниқланди. Намуналарнинг $v_{\text{сов}}$ қийматини камайтириш нисбатан катта ўлчамли, кўпқатламли сферасимон ва линзасимон шаклга эга бўлган микробирикмалар ўлчамини ортишига олиб келади

3. Si даги Ni, Co ва Mn киришма микробирикмалари, ўлчамлари ва шаклларига боғлиқ ҳолда турлича тузилишларга эга эканлиги аниқланди.

Нисбатан йирик никель (>2 мкм), кобальт ($>0,5$ мкм) ва марганец ($>0,4$ мкм) микробирикмалари мос равишда Ni_xSi_y , Co_xSi_y ва Mn_xSi_y туридаги силицидлардан иборат, икки ёки ундан ортиқ қатламлардан ташкил топиши аниқланди. Нисбатан кичик никель (~ 1 мкм гача), кобальт ($\sim 0,5$ мкм гача) ва марганец ($\sim 0,3$ мкм гача) микробирикмалари эса, асосан, бир турдаги силициддан иборат бўлади.

4. Кўпқатламли структурага эга микробирикмалар ҳажмида киришма атомларининг фоизли улуши микробирикма сиртидан маркази томон йўналишда ортиб бориши аниқланди.

5. Киришма тўпламлари ҳажмида асосий киришма Ni, Co ёки Mn ва матрица материали Si атомларидан ташқари технологик киришмалар (Fe, Cu, Cr кабилар) ва атомлари ҳам мавжуд эканлиги ҳамда микробирикма ҳажми улар асосий киришма атомлари каби тақсимланиши аниқланди. Бундай атомларнинг мавжудлиги кремнийда никель, кобальт ва марганецнинг турли силицидлари ҳосил бўлиш реакцияларида катализатор ролини бажариши мумкин.

6. $T=1273$ К ҳароратли ТК таъсирида Si<Ni> нинг n-типидаги намуналарида 5-10 минут давомида, p-типида намуналарда эса 25 минут давомида киришма микробирикмаларининг парчаланиши аниқланди. p-Si<Co> намуналарида $T=1173$ К ҳароратли ТК таъсирида 10 минут давомида киришма микробирикмаларининг парчаланиши кузатилади. p-Si<Mn> намуналарида $T=973$ К ҳароратли ТК таъсирида 20-40 минут давомида киришма микробирикмалари парчаланadi.

7. Ni, Co ва Mn билан легирланган Si намуналарида радиацион нуқсонларнинг ҳосил бўлиш тезлиги сезиларли камайиши аниқланди. Бунда киришма атомлари концентрацияси қанча юқори бўлса, ушбу эффект кучлироқ намоён бўлади.

8. Киришма тўпламларининг парчаланиш механизми уларнинг ўлчамлари ва шаклларига боғлиқлиги аниқланди. Si<Ni> намуналарида $P=4 \cdot 10^8$ Па даги ХТГБ таъсири остида кичик ўлчамли (~ 1 мкм гача), дисксимон ва игнасимон шаклдаги микробирикмалар парчаланиши содир бўлади. Сўнгра $P > 4 \cdot 10^8$ Па қийматларида каттароқ ўлчамли, линзасимон ва сферасимон микробирикмалар парчаланиши содир бўлади. Si<Co> намуналарида $P=4 \cdot 10^8$ Па даги ХТГБ таъсири остида ўлчамлари 500 нм гача бўлган игнасимон ва дисксимон нанобирикмалар парчаланиши ҳамда нисбатан каттароқ, линзасимон ва сферасимон шаклдаги нанобирикмаларнинг (>500 нм) сиртки қатлами емирилиши содир бўлади. Бу натижалар монокремний хусусий нуқсонларининг легирловчи киришма атомлари билан ўзаро таъсирлашиш механизмини аниқлашга имкон яратади.

9. Кремний монокристалини микробирикмалар ҳосил қилувчи киришмалар билан легирлаш Si монокристалини турли термик нуқсонлардан тозалаш технологиясида муҳим роль ўйнаши кўрсатилган. Бу эса ҳосил

бўлувчи киришма тўплamlари радиацион, термик ҳамда барик нуқсонларга нисбатан геттерлаш хусусиятини намоён қилиши билан боғлиқ.

10. Диссертация ишида олинган амалий натижалар ноанъанавий киришма атомлари билан легирланган кремний асосидаги диодлар ва МДЯ – структуралар функционал имкониятларини кенгайтиришга шароит яратиши кўрсатилди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.28.02.2018.FM.60.01
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ
АНДИЖАНСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

АНДИЖАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ТУРГУНОВ НОЗИМЖОН АБДУМАННОПОВИЧ

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБРАЗОВАНИЯ МИКРОВКЛЮЧЕНИЙ
ПРИМЕСНЫХ АТОМОВ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СВОЙСТВА
МОНОКРЕМНИЯ**

01.04.10 – физика полупроводников

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

Андижан – 2018

Тема диссертации доктора (DSc) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за B2018.1DSc/FM114.

Докторская диссертация выполнена в Андижанском государственном университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.adu.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyo.net).

Научный консультант: **Зайнабидинов Сирожиддин Зайнабидинович**
доктор физико-математических наук, профессор,
академик АН Республики Узбекистан

Официальные оппоненты: **Вайткус Юозас Юозович**
академик АН Литвы, доктор физико-математических наук, профессор

Гулямов Гофур
доктор физико-математических наук, профессор

Зикриллаев Нурилла Фатхуллаевич
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: **Национальный университет Узбекистана**

Защита диссертации состоится «___» _____ 2018 года в ___ часов на заседании Научного совета DSc.28.02.2018.FM.60.01 при Андижанском государственном университете. Адрес: 170100, г. Андижан, ул. Университет, дом 129. Зал конференций Андижанского государственного университета Тел./факс: 0(374) 223-88-30; e-mail: agsu_info@edu.uz

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Андижанского государственного университета (зарегистрирована за № ___). Адрес: 170100, г. Андижан, ул. Университет, дом 129. зал конференций Андижанского государственного университета. Тел./факс: 0(374) 223-88-30; e-mail: agsu_info@edu.uz.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2018 г.

(протокол рассылки № _____ от «___» _____ 2018 г.).

Р.У. Алиев

Заместитель председателя научного совета по присуждению ученой степени, д.т.н., профессор

А.О. Курбанов

Ученый секретарь научного совета по присуждению ученой степени, к.ф.-м.н.

И.А. Каримов

Председатель научного семинара при научном совете по присуждению ученой степени, д.ф.-м.н.

ВВЕДЕНИЕ (аннотация докторской (DSc) диссертации)

Актуальность и востребованность темы диссертации. Интенсивное развитие полупроводниковой электроники и микроэлектронных технологий в мировом уровне стимулируют исследования в области разработки новых или совершенствования наиболее массово применяемых в производстве полупроводниковых материалов для расширения функциональных возможностей электронных изделий на их основе. Интенсивные исследования по легированию полупроводников такими способами, как диффузионное, при выращивании, ионное и ядерное трансмутационное показали, что обычное диффузионное легирование на ближайшее десятилетие все еще остается основным способом формирования физико-химических свойств материалов с заранее заданными свойствами.

На сегодняшний день в ведущих научных заведениях многих стран мира уделяется большое внимание получению полупроводниковых монокристаллов кремния, с заданными свойствами. В данной сфере целевых научных исследований важнейшими задачами являются: разработка способов получения материалов с примесными микровключениями с помощью диффузионного легирования; определение структуры, размеров, формы и химического состава примесных микровключений никеля, кобальта и марганца в монокристаллах кремния; выявление механизмов образования и распада примесных микровключений под влиянием термического отжига (ТО), радиации и всестороннего гидростатического давления (ВГД); управления электрофизическими свойствами кремния с примесными микровключениями в зависимости от их физических параметров, а также от условий и величины значений внешних воздействий.

В стране получены заметные результаты в приоритетных направлениях науки, в том числе по развитию использования источников возобновляемой энергии, в исследованиях по методу диффузионного легирования примесными атомами с глубокими энергетическими уровнями и управления их электрическими, оптическими и другими свойствами с помощью внешних давлений, температуры, облучения быстрыми частицами. В стратегии развития Республики Узбекистан в 2017-2021 годах отмечены следующие задачи «стимулирование научно-исследовательской и инновационной деятельности, создание эффективных механизмов внедрения научных и инновационных достижений в практику, создание при высших образовательных учреждениях и научно-исследовательских институтах научно-экспериментальных специализированных лабораторий, центров высоких технологий, технопарков»¹. В связи с этим исследования природы примесных скоплений, находящихся в объеме монокристаллов кремния в виде микровключений, с точки зрения формирования новых функциональных возможностей и управления электрофизическими

¹ Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 года // Собрание законодательства Республики Узбекистан, 2017 г., № 6, ст. 70, № 20, ст. 354, № 23, ст. 448, № 29, ст. 683, ст. 685, № 34, ст. 874, № 37, ст. 982.

параметрами полупроводниковых материалов и приборов на их основе с помощью внешних воздействий имеют особое значение.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в ряде указов и постановлений Президента страны, в том числе в четвертом направлении из пяти приоритетных направлений, приведенных в Указе Президента № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 года, в Постановлениях Президента № ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года и № ПП-3876 «О мерах по дальнейшему повышению размеров оплаты труда работников сферы науки и высшего образования, а также государственной поддержке внедрения результатов научной и научно-технической деятельности» от 20 июля 2018 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере и изложенных в соответствующих законодательных актах.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Настоящая работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями науки и технологий: «III. Развитие использования источников возобновляемой энергии».

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации². Научные исследования в области управления электрофизическими свойствами полупроводниковых материалов с примесными дефектами ведутся в ведущих научных центрах мира и высших учебных заведениях, в том числе: Массачусетском технологическом институте, Калифорнийском университете (США), Токийском технологическом институте (Япония), Институте физики твердого тела Российской академии наук, в Санкт-Петербургском Физико-техническом институте (Россия), Физико-техническом институте, Институте ядерной физики (Узбекистан).

В результате проведенных научных исследований в мире по получению полупроводниковых материалов с примесными микровключениями и управления их электрофизическими свойствами под влиянием внешних воздействий получены следующие научные результаты, в частности: установлены механизмы образования и морфология многокомпонентных металлических частиц в кремнии, легированном кобальтом (Калифорнийский университет, США); выявлено, что на поверхности образцов кремния, легированные никелем, в объеме которых наблюдаются примесные осадения, состоящие из силицида никеля никакого значительного энергетического барьера для зарождения подобных осадений не наблюдается (Массачусетский технологический институт, США); выявлены

² Обзор международных научных исследований по теме диссертации проведен на основе: Heuer M, Buonassisi T, Marcus M., Istratov A., Pickett D., Shibata T., Weber R. Complex intermetallic phase in multicrystalline silicon doped with transition metals // Physical Review. 2006. В 73. 235204, Kveder V., Khorosheva M., Seibt M. Interplay of Ni and Au atoms with dislocations and vacancy defects generated by moving dislocations in Si. // Solid State Phenomena. 2016. Vol. 242. P. 147-154.

свойства и химический состав примесных скоплений в кремнии, легированном элементами 3d-группы, физика микро- и нановключений примесных атомов (Санкт-Петербургский Физико-технический институт, Россия); получены многослойные структуры на основе кремния с примесными включениями (Физико-технический институт, Узбекистан).

В мире ведутся исследования по следующим приоритетным направлениям развития технологий получения полупроводниковых материалов с особенностями электрофизических свойств, которые позволяют: получить материалы с примесными микровключениями для управления электрофизическими параметрами полупроводниковых монокристаллов; определить морфологию примесных микродефектов; повысить термическую, барическую и радиационную чувствительность полупроводниковых материалов на основе монокристаллического кремния с примесными микродефектами, выявить механизмы образования и распада примесных микровключений в объеме монокремния.

Степень изученности проблемы. В настоящее время достаточно интенсивно изучаются свойства примесных микро- и нановключений, образующихся атомами 3d-элементов в объеме монокристаллов кремния. В работах видных физиков Б.И. Болтакса, С.В. Булярского, В.И. Фистуля, Э.М. Омеляновского, а также ведущих узбекских ученых: академика С.З.Зайнабидинова, академика М.К. Бахадырханова, М.С. Юнусова и других исследовались механизмы образования примесных дефектов и их свойства, диффузионные параметры атомов элементов переходной группы, термодинамические состояния примесных дефектов, а также процессы их распада под влиянием внешних воздействий. Выявлены электрические, фотоэлектрические, оптические и механические свойства полупроводниковых материалов с примесными дефектами.

В работе О.В. Феклисова и Е.Б. Якимова выявлено образование примесных преципитатов железа в образцах $p\text{-Si}\langle\text{Fe}\rangle$, полученных путем диффузии при температуре 1273 К, в течении 0,5 часов с последовательной закалкой. Установлено, что местами образования примесных преципитатов являются дислокации кристаллической структуры и их размеры достигают нескольких сотен нанометров.

В работах таких авторов как А.А. Истратов, Е.Р. Вебер, В.В. Кведер и М.А. Хорошева, а также узбекских ученых: академика М.К. Бахадырханова, К.П. Абдурахманова, Т.С. Камилова исследованы процессы формирования кластеров примесных атомов, создаваемых элементами 3d-группы. Изучены электрофизические, фотоэлектрические и магнитные свойства кремния с примесными дефектами и влияние на них различных внешних воздействий. Показано, что среди металлов переходной 3d-группы медь, никель и кобальт в кремнии имеют самый высокий коэффициент диффузии и растворимость, обнаружено образование нанокластеров и комплексов этих примесей. Кроме этого выявлено образование примесных дефектов в виде квазимолекулы в кристаллической матрице, которое обладает своими индивидуальными физическими свойствами.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнялась в рамках фундаментальных проектов плана научно-исследовательских работ Андиганского государственного университета по темам: ОТМ-Ф2-28 «Поверхностные и объемные квантово-размерные эффекты в легированном кремнии и влияние их на процессы фотогенерации и рекомбинации носителей заряда в p-n структурах» (2012-2016 гг.); ОТМ-Ф2-68 «Механизмы образования примесно-дефектных микро – и нанообъединений в кристаллах и их роль в создании многослойных структур с широкими функциональными возможностями» (2017-2020 гг.).

Целью исследования является определение технологических условий образования преципитатов и микровключений примесных атомов никеля, марганца, кобальта в кремнии, их морфологического строения и свойств, кинетики распада под влиянием внешних воздействий.

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

определить оптимальные технологические условия легирования кремния Ni, Co или Mn, приводящие к образованию микровключений;

выявить на основе термодинамического анализа состояний атомов в твердых растворах кремний – примесный атом образование различных микровключений в кристаллических структурах;

исследовать химический состав, механизмы формирования структуры, размеры и формы микровключений в монокристаллах кремния;

исследовать технологические условия распада примесных скоплений и их физико-химические механизмы при термической обработке легированного кремния;

выявить закономерности и научно обосновать кинетику распада примесных скоплений различных размеров и составов, под воздействием всестороннего гидростатического давления;

определить механизмы взаимодействия примесных атомов с радиационными, барическими и собственными дефектами в кремнии;

научно обосновать и показать термодинамическую неизбежность образования примесных скоплений при диффузионном легировании монокремния быстродиффундирующими примесными атомами.

Объектом исследования являются монокристаллический кремний марки КДБ – 5, 10, 20 и марки КЭФ – 5, 10, 20, 40, а также металлические примеси Ni, Co и Mn особой чистоты, которые имеют электронные структуры $3d^8 4s^2$, $3d^7 4s^2$ и $3d^5 4s^2$ соответственно.

Предметом исследования является состояние микровключений, преципитатов или нановключений атомов никеля, кобальта и марганца в монокристаллическом кремнии, а также процесс их распада под влиянием ТО, радиации и ВГД.

Методы исследования. В процессе выполнения научной работы использованы современный метод электронно-зондового микроанализа,

метод радиоактивного анализа и стандартные методы, с помощью установки «Superprobe JXA-8800R», позволяющим с большой точностью определить структуру и состав примесных скоплений в кристаллах исследованы формы, химические составы и размеры примесных микровключений атомов никеля, кобальта и марганца в кремнии.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

выявлена термодинамическая неизбежность образования примесных микровключений и преципитатов в кремнии, легированном диффузионным методом атомами элементов 3d-группы;

экспериментально обнаружены и научно обоснованы структуры и химический состав микровключений примесных атомов Ni, Co и Mn в монокремнии;

определена зависимость структурного строения примесных скоплений от их размера и геометрической формы, т.е. крупные скопления ($>10^{-6}$ м) имеют многослойную структуру, а мелкие ($<5 \cdot 10^{-7}$ м), в основном, состоят из одного типа силицида Ni, Co или Mn и имеют монослойную структуру;

определен физический механизм образования микровключений и преципитатов примесных атомов различных форм и структур в монокристаллах кремния;

установлено существование в объеме примесных микровключений атомов технологических примесей (например: Fe, Cu и др.) и выявлена определенная закономерность в их распределении по объему микровключений;

определены механизмы наблюдаемых новых электрических и фотоэлектрических явлений в кремнии, диффузионно легированном Ni, Co или Mn;

установлены эффекты влияния термических отжигов, высоких гидростатических давлений, гамма- и нейтронных облучений в легированном кремнии и их сущности;

определены возможные механизмы распада примесных атомов и их микровключений в легированных кристаллах кремния при термообработках, всестороннем давлении и облучении;

определены образования глубоких энергетических уровней, включений второй фазы электрически неактивных атомов и их деградации под влиянием внешних воздействий.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработаны технологии получения монокремния с примесными микровключениями атомов переходных элементов методом диффузионного легирования;

разработаны технологические условия диффузионного легирования монокристаллов кремния атомами переходных элементов, обеспечивающие получение полупроводниковых материалов с заданными физическими свойствами;

определены режимы последиффузионных термических, барических и радиационных обработок для целенаправленного управления свойствами

легированных монокристаллов кремния;

выявлены возможности очистки объема монокристалла кремния от точечных дефектов за счет геттерирования их примесными микровключениями;

предложены механизмы повышения термической и радиационной устойчивости электрических свойств монокристаллического кремния, легированного атомами переходных элементов.

Достоверность результатов исследования обеспечена использованием общепринятых научных и технологических методов, стандартных и широко применяемых методов в исследованиях физических явлений кремния, легированного примесными атомами, а также сравнительным анализом полученных данных о параметрах примесных микровключений и процессах их образования и распада под влиянием внешних воздействий.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в объяснении физических механизмов образования примесных микровключений Ni, Co и Mn в монокристаллах кремния и последовательности их распада под влиянием внешних воздействий, закономерности в распределении атомов примеси по объему микровключений, согласно которой процентная доля атомов примеси уменьшается в направлении от центра к краю микровключений. Наиболее вероятными центрами для образования примесных микровключений или преципитатов являются вакансионные поры, образующиеся в процессе легирования монокристаллического кремния, при высоких температурах.

Практическая значимость результатов исследования заключается в установлении размеров, формы и химического состава примесных микровключений, влияния диффузионных параметров при легировании кремния примесями Ni, Co и Mn и значения скоростей охлаждения образцов после диффузионного отжига, а также в управлении электрофизическими свойствами Si, содержащего микровключения Ni, Co или Mn, с помощью внешних воздействий.

Внедрение результатов исследования. На основании полученных результатов по управлению электрофизическими свойствами монокристаллического кремния с примесными микровключениями в зависимости от их физических параметров при различных внешних воздействиях:

результаты по определению оптимальных технологических условий получения компенсированного кремния с заданной степенью компенсации, позволяющих повысить термическую и радиационную стабильность параметров полупроводников и приборов на их основе использованы в процессе производства полупроводниковых приборов с положительными характеристиками в акционерном обществе «FOTON» (Справка №02–1229 акционерной компании «Узэлтехсаноат» от 29 мая 2018 года). Использование научных результатов позволило расширить функциональные возможности диодов и МДП-структур, полученных на основе кремния, легированного

нетрадиционными примесными атомами;

результаты экспериментальных исследований по образованию микро- и нановключений примесных атомов в объеме кремния, при диффузионном легировании были использованы в управлении свойств образцов легированного кремния в заданном направлении в фундаментальном проекте Ф2-28 «Поверхностные и объемные квантово измерительные эффекты в легированном кремнии и их влияние на процессы выделения генерации-рекомбинации и носителей тока в p-, n-структурах» (Справка №89–03–2314 Министерства Высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан от 13 июня 2018 года). Использование научных результатов позволило выявить закономерности взаимодействия микро- и нановключений примесных атомов с дефектами кристаллической структуры легированного кремния.

Апробация результатов исследования. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 4 международных и 9 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследований. По материалам диссертации опубликовано 36 научная работа, из них, 12 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации 200 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

В первой главе «**Микродефекты в монокристаллах полупроводников**» проведен обзор литературы по теме диссертации. Представлены самые последние данные по исследованию состояния и взаимодействия примесных атомов с собственными дефектами в полупроводниковых кристаллах, представлены механизмы образования и распада, а также структуры и химического состава примесных микровключений, проанализировано влияние условий диффузионных процессов и внешних воздействий на процессы формирования и физико-химические параметры примесных скоплений.

Во второй главе «Технология получения и методы исследований монокристаллических полупроводников с примесными микровключениями» приводятся оптимальные способы получения монокристаллического кремния с примесными микро- и нановключениями за счет контролирования условий диффузионного легирования монокремния с примесями никеля, кобальта и марганца, значения скорости охлаждения образцов после диффузионного отжига, а также методика проведения экспериментов.

Как известно, диффузионное легирование является одним из основных методов введения примесей в полупроводниковые материалы. Важное значение имеет также диффузия некоторых элементов, помимо легирующих добавок, поскольку трудно полностью исключить попадание в кристалл многих металлов, например, железа, меди, хрома, алюминия и других, как в процессе роста кристаллов, так и в процессе технологической обработки пластин. Кроме металлических примесей в кремнии часто присутствуют кислород и углерод, они могут находиться уже в исходном материале, попасть случайно или вводиться намеренно. Так как влияние этих примесей на процессы дефектообразования в кремнии является хорошо изученным, основное внимание было уделено нами изучению роли других технологических примесей, таких как железо, медь и хром в процессах формирования примесных микровключений.

Одним из основных факторов в диффузионных процессах является состояние поверхности кремния. Атомы Ni наносились на поверхность кремния, предварительно очищенного: а) кипячением в дистиллированной воде; б) в плавиковой кислоте; в) в растворе HF:HNO₃ (1:2). После диффузионного отжига образцы закаливались с различной скоростью охлаждения (от $v_{\text{охл}} < 1$ град/с до $v_{\text{охл}} = 600$ град/с).

В проведенных исследованиях для определения полной концентрации примесных атомов Ni в Si использовался метод радиоактивного анализа. В качестве легирующего элемента был применен радиоактивный изотоп Ni⁶³ раствора NaCl, который электролитическим способом наносился на поверхность образцов. Далее, при температурах 1273-1623 К образцы отжигались в течении от 15 минут до 15 часов в эвакуированных и наполненных аргоном кварцевых ампулах с последующей закалкой. Методом снятия слоев образцов и их радиоактивного анализа определялась концентрация Ni в Si. Максимальное значение растворимости $7 \cdot 10^{17}$ см⁻³ для атомов Ni достигалось при температуре отжига 1573 К. А при температурах 1623 К она начинает заметно уменьшаться (рис. 1). Кроме этого на рис. 1 приведены данные о растворимости Co и Mn в Si. Выявлено, что растворимость Co в Si достигает свое максимальное значение при 1573 К и составляет $2 \cdot 10^{16}$ см⁻³, а для атомов Mn в Si максимальное значение растворимости достигалось при 1623 К и составляло $5 \cdot 10^{16}$ см⁻³.

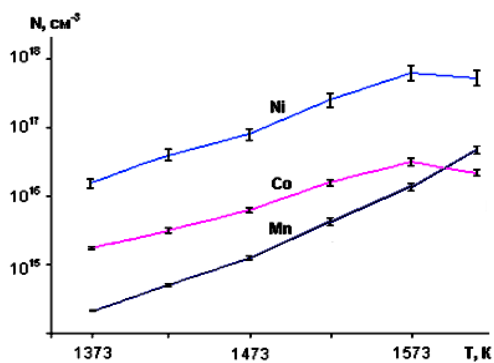


Рис. 1. Зависимость растворимости Ni, Co и Mn в Si от значения температуры диффузии.

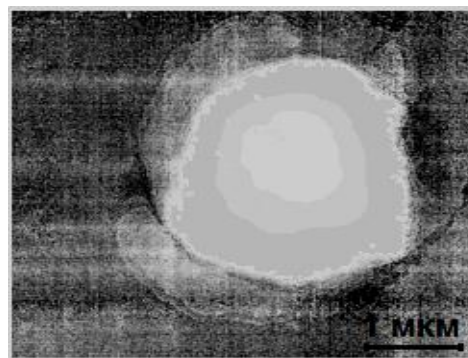


Рис. 2. Микровключения Ni в Si, полученные с помощью микро-анализатора Superprobe JXA-8800R.

Полученные нами результаты исследования электрофизических свойств образцов $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ показали, что атомы никеля в кремнии образуют два глубоких акцепторных уровня с энергиями ионизации $E_v+0,2$ эВ и $E_c-0,41$ эВ. Атомы Mn в Si имеют донорный характер с энергетическим уровнем $E_c-0,5$ эВ. Остальная часть примесных атомов Mn в Si является более склонной к образованию микроскоплений, а также кластеров из четырех атомов. Кобальт в кремнии создает два акцепторных уровня $E_v+0,2$ эВ и $E_c-0,52$ эВ, а также один донорный уровень $E_c-0,28$ эВ.

Исследования состояния примесных атомов никеля, кобальта и марганца в монокристаллах кремния проводили с помощью современной установки электронно-зондового микроанализатора «Superprobe JXA-8800R». Исследуемый образец крепится на латунной подложке с помощью токопроводящей краски, специально приготовленной на основе черного угля. Подложка помещается в вакуумную камеру установки. Получив нужный вакуум ($10^{-4}\div 10^{-5}$ бар), подключается источник электронов. Электронный пучок, создаваемый вольфрамовой нитью накаливания, с ускоряющим напряжением 20 кВ падает на исследуемый образец. В случае с кремнием глубина возбуждения составляет $\sim 15\div 20$ мкм. При этом ток зонда составляет 10 нА, а диаметр зонда 10^{-7} м. При взаимодействии с поверхностью образца электронный пучок вызывает вторичное рентгеновское излучение через диафрагму, падающее на анализируемый кристалл (LiF, PERJ, TAP), отражение от которого регистрируется на пропорциональном счетчике. Результаты обрабатываются электронной системой микроанализатора. Количество элемента на анализируемых линиях рассчитывается относительно эталонов, в качестве которых использованы чистые металлы, сплавы, синтетические и природные соединения элементов с кислородом, или с серой. Чувствительность прибора составляет 10^{-2} %.

Изучение структуры примесных микровключений Ni, Co и Mn в образцах с быстрым охлаждением ($v_{\text{охл}} > 200$ град/с) показали, что в объеме таких образцов существуют микровключения размером менее 10^{-6} м, $4\cdot 10^{-7}$ м и $2\cdot 10^{-7}$ м соответственно. Электронно-микроскопический анализ таких микровключений показывает, что они имеют монослойную или многослойную структуру, которые состоят из определенных типов

силицидов. Кроме того они имеют иглообразную, дискообразную, линзообразную, а также сложную многогранную форму. В образцах с медленным охлаждением ($v_{\text{охл}} < 10$ град/с), образующиеся примесные микровключения Ni, Co и Mn, в основном, имеют сферическую форму с многослойной структурой. На снимке, полученном с помощью микроанализатора Superprobe JXA-8800R, можно увидеть четкое выделение границ между слоями, а также микровключение-монокристалл (рис. 2).

В третьей главе «Некоторые особенности поведения примесных атомов в монокристаллах кремния» приводятся результаты исследования физических свойств Si, легированного примесями Ni, Co и Mn. Результаты экспериментальных исследований, полученные с помощью электронно-зондового микроанализатора показали, что в образцах n-Si<Ni>, полученных методом Чохральского, образуются примесные микровключения размерами до $\sim 5 \cdot 10^{-7}$ м (рис. 3). В образцах n-Si<Co>, полученных этим методом, также наблюдаются микровключения, размеры которых достигают $\sim 3 \cdot 10^{-7}$ м (рис. 4). Микровключения в образцах n-Si<Ni> и n-Si<Co> имеют монослойную структуру, т.е. состоят из одного типа силицида никеля или кобальта.



Рис. 3. Примесные микровключения в образцах n-Si<Ni>, полученных методом Чохральского.



Рис. 4. Примесные микровключения в образцах n-Si<Co>, полученных методом Чохральского.

Результаты исследований электропроводимости образцов Si<Ni> и Si<Co> показали, что легирование образцов n-Si с $\rho > 5$ Ом·см приводит к увеличению значения ρ образцов, а в p-Si с $\rho > 10$ Ом·см уменьшению значения удельного сопротивления, по сравнению с нелегированными образцами. Эти исследования показывают, что атомы Ni в Si находятся в виде акцепторных примесей, а атомы Co проявляют амфотерный характер, и их концентрации составляют $5 \cdot 10^{14}$ см⁻³ и $5 \cdot 10^{13}$ см⁻³ соответственно.

На рис. 5 приведены результаты исследований зависимости ρ_t/ρ_0 от времени НТО (в температурном интервале $T=573 \div 1273$ К) для образцов n-Si<Ni>. Полученные данные показывают, что под влиянием ТО при $T=573$ К в значении ρ_t/ρ_0 образцов существенных изменений не происходит (рис. 5 кривая 1). С увеличением температуры НТО в интервале $T=773 \div 1073$ К в течение 20 минут наблюдается рост значения ρ_t/ρ_0 образцов (рис. 5, кривые 2-3) и она может достигать до $\sim 10^2$ раза. При дальнейшем увеличении времени отжига кривые проходят через максимум, после чего наблюдается спад. Как видно, чем выше температура НТО, тем больше рост значения ρ образцов. Повышение температуры НТО до $T=1273$ К, приводит к заметному снижению значения ρ (рис. 5, кривая 4). При $t=15$ минут значения ρ образцов

n-Si<Ni> составляет $\sim 10^2$ Ом·см. Такой ход изменения значений ρ образцов в процессе НТО при $773 \div 1073$ К возможно связан с состоянием примесных атомов в кристаллической решетке кремния. Электроактивные примесные атомы в замещающих положениях акцепторного характера, при температурах НТО выше 1173 К, покидают узельные состояния и освобождают ранее захваченные электроны в n-Si что приводит к уменьшению значения ρ образцов, т.е. происходит распад примесных атомов пересыщенного твердого раствора примесь-кристалл.

На рис. 6. приведены результаты исследований зависимости ρ_t/ρ_0 от времени НТО для образцов n-Si<Co>. Как видно, в образцах n-Si<Co> данная зависимость по характеру схожа с образцами n-Si<Ni> с небольшими количественными изменениями. В отличие от n-Si<Ni>, в образцах n-Si<Co> заметное снижение значения ρ наблюдается под влиянием ТО при температуре $T=1173$ К (рис. 6, кривая 4) и в течение 15 минут она уменьшается почти на 1,5 порядка.

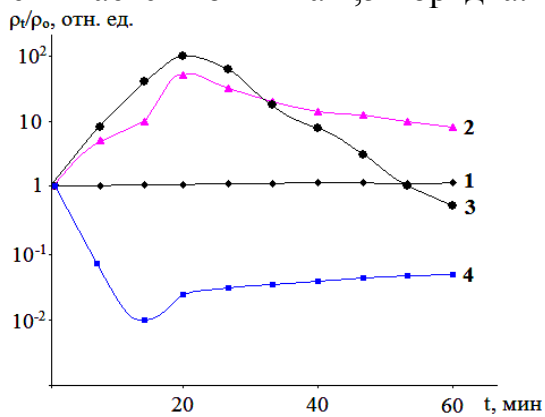


Рис. 5. Зависимость ρ_t/ρ_0 от времени отжига в образцах n-Si<Ni> при ТО: 1-573 К; 2-773 К; 3-1073 К; 4-1273 К.

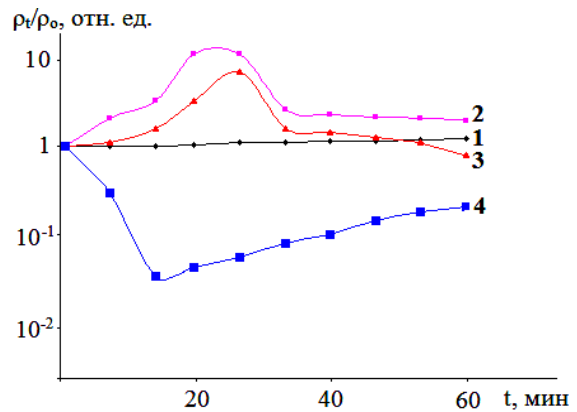


Рис. 6. Зависимость ρ_t/ρ_0 от времени отжига в образцах n-Si<Co> при ТО: 1-573 К; 2-773 К; 3-1073 К; 4-1173 К.

С целью выяснения природы поведения примесных атомов при диффузионном легировании нами проводились исследования структуры кремния при различных условиях диффузии. Исследования осуществлялись на модельных образцах n-Si<Ni> методом электронно-зондового микроанализа. Образцы получены на основе исходного материала – монокристаллического кремния, с электронной проводимостью, с удельными сопротивлениями $\rho=1 \div 10$ Ом·см, выращенные методом Чохральского. Легирование осуществлялось методом диффузии при $T=1373-1523$ К с последующей закалкой с различными скоростями.

Как показали исследования образцов n-Si<Ni>, в зависимости от значения скорости охлаждения - $v_{охл}$ после диффузионного отжига в объеме образцов наблюдаются преципитаты различных форм. При значениях $v_{охл} > 200$ град/с, образуются преципитаты размерами до $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ м, которые имеют, в основном, иглообразную и линзообразную форму. В образцах n-Si<Ni>, с быстрым охлаждением $v_{охл}=600$ град/с, существуют преципитаты с размерами до $\sim 10^{-6}$ м. Электронно-микроскопический анализ таких преципитатов показывает, что они состоят из нескольких слоёв силицидов

никеля и имеют иглообразную, дискообразную, линзообразную и сложную многогранную форму, подходящую к сфере (рис. 7). Плотность таких преципитатов по объему образцов в среднем составляет $\sim 2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$. При аналогичном значении скорости охлаждения, после диффузионного отжига, в образцах $p\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ образуются преципитаты размером до $\sim 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, имеющие разнообразные геометрические формы.

В объеме образцов $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ с $v_{\text{охл}} < 10$ град/с наблюдаются преципитаты с относительно большими размерами ($\geq 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$), которые имеют, в основном, сферическую форму (рис. 8). Микроструктурный анализ таких преципитатов показал, что они состоят из нескольких силицидных слоев. На полученных микроснимках преципитатов отчетливо видны границы между этими слоями.

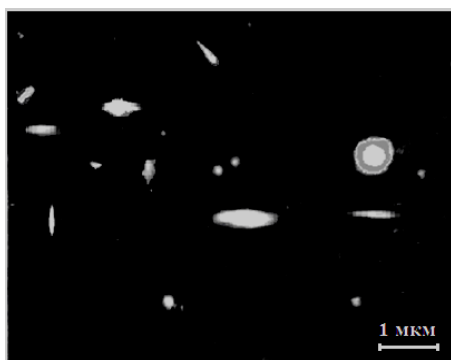


Рис. 7. Примесные преципитаты в образцах $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ с $v_{\text{охл}} = 600$ град/с.

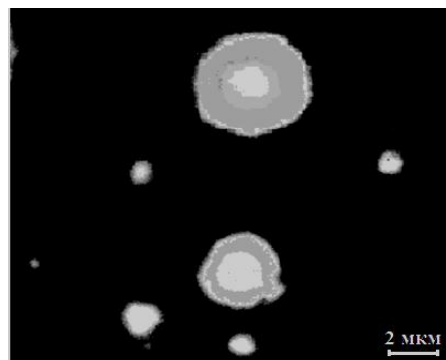


Рис. 8. Примесные преципитаты в образцах $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ с $v_{\text{охл}} = 1$ град/с.

Полученные экспериментальные результаты зависимости плотности примесных микровключений при расстоянии от поверхности в глубь образца $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ с $v_{\text{охл}} = 600$ град/с представлена на Рис. 9. Как видно, в поверхностной области (~ 50 мкм) плотность микровключений на один порядок больше, чем в остальных областях образца.

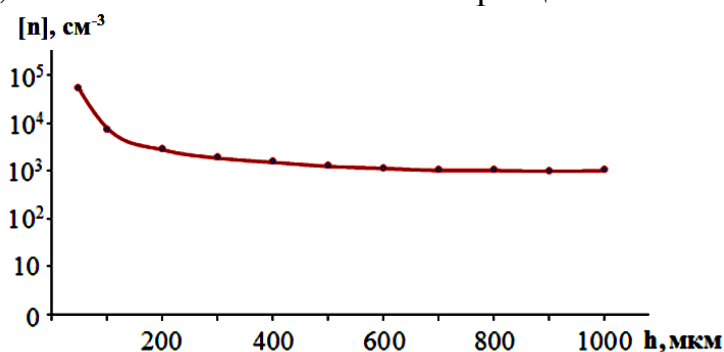


Рис. 9. Экспериментальная зависимость плотности микровключений от расстояния от поверхности в глубь образца $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ с $v_{\text{охл}} = 600$ град/с.

Структурные исследования образцов $p\text{-Si}\langle\text{Mn}\rangle$ со скоростью охлаждения $v_{\text{охл}} < 1$ град/с после диффузионного отжига показали, что в их объеме образуются микровключения размером до $\sim 10^{-6} \text{ м}$, с различными геометрическими формами (рис. 10) и плотностью $\sim 4 \cdot 10^2 \text{ см}^{-3}$. Изучение структуры образцов $n\text{-Si}\langle\text{Mn}\rangle$, со скоростью охлаждения $v_{\text{охл}} < 1$ град/с показали, что в их объеме так же наблюдаются примесные микровключения, размеры которых достигают $\sim 4 \cdot 10^{-7} \text{ м}$.

Результаты аналогичных исследований в образцах n-Si<Co>, с $v_{\text{охл}}=400$ град/с показали, что в их объеме образуются примесные микровключения, имеющие иглообразные, линзообразные, дискообразные и сферические формы, максимальные размеры которых достигают до $\sim 5 \cdot 10^{-7}$ м. Плотность таких микровключений составляет $\sim 10^3$ см $^{-3}$. В объеме образцов n-Si<Co>, с $v_{\text{охл}} \leq 1$ град/с, в основном, наблюдаются сферические микровключения и их размеры достигают до $\sim 8 \cdot 10^{-7}$ м. Исследование структуры образцов p-Si<Co>, с $v_{\text{охл}} \geq 400$ град/с показало, что образующиеся микровключения имеют монослойную структуру, а также различные формы и их размеры достигают до $\sim 5 \cdot 10^{-7}$ м. В образцах p-Si<Co> с $v_{\text{охл}} \leq 1$ град/с, в основном, наблюдаются микровключения, имеющие многослойную структуру, размеры которых достигают до $\sim 1,5 \cdot 10^{-6}$ м (рис. 11).

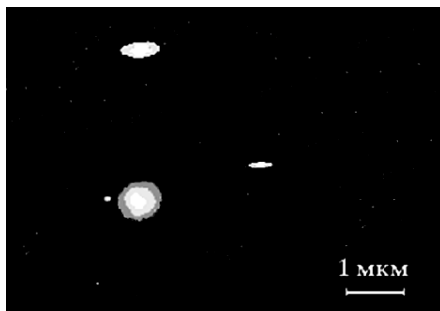


Рис. 10. Примесные микровключения в образцах p-Si<Mn>, с $v_{\text{охл}} < 0,1$ град/с.

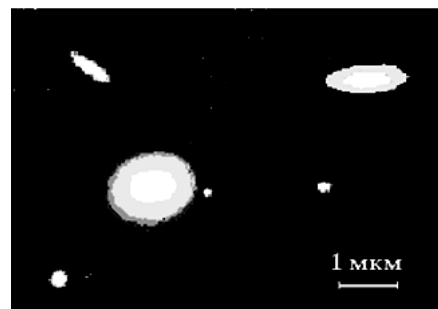


Рис. 11. Примесные микровключения в образцах p-Si<Co>, с $v_{\text{охл}} = 1$ град/с.

Выяснилось, что размеры, формы и структурные строения примесных преципитатов или микровключений в образцах Si<Ni>, Si<Co> и Si<Mn> n и p-типа, полученных методом диффузионного легирования, в основном, зависят от скорости охлаждения образцов после диффузионного отжига. Чем меньше значение $v_{\text{охл}}$ образцов, тем больше вероятность образования в них термодинамически равновесных преципитатов или микровключений с относительно крупными размерами, которые имеют многослойную структуру со сферической и линзообразной формой.

В четвертой главе «Исследование механизмов образования примесных микровключений в монокристаллах кремния» приводятся результаты исследований механизмов образования примесных микровключений в монокристаллах кремния. Существующие, в настоящее время методы теоретического обоснования механизмов образования примесных микровключений в Si не всегда удовлетворяют достоверности описания кинетики процессов, реально протекающих во время легирования или под влиянием внешних воздействий.

Полученные экспериментальные данные структуры образцов n-Si, выращенных методом Чохральского показали, что в них наблюдаются линейные дислокации, длина которых достигает до $\sim 1,5 \cdot 10^{-6}$ м (рис. 12). Плотность таких дислокаций составляет $\sim 10^4$ см $^{-2}$. Как видно из рисунка, они имеют иглообразную форму. В образцах n-Si<Ni> образуются примесные микровключения, повторяющие подобную форму.

Предлагается один из возможных механизмов образования вакансионных пор в объеме монокристаллов Si, при диффузионном легировании. Известно, что в процессе диффузии при высоких температурах, за счет ухода атомов от узлов кристаллической решетки увеличивается концентрация избыточных вакансий. Дислокации в кристалле, являются центрами накопления избыточных вакансий, впоследствии чего образуются вакансионные поры. При малой исходной концентрации избыточных вакансий ($c_v < 10^6$) рост таких пор имеет стадийный характер. Начальная стадия быстрого роста пор до размера $R < 0,5R_k$, где $R_k = 10^4 b/T$ (b -период решетки), соответствует малому среднему расстоянию l_p между порами вдоль дислокаций: $l_p = (R_k/2)4\pi\rho_d/3c_v$. На последующей стадии рост пор сильно замедляется, если нет подпитки вакансиями и в дальнейшем подобные микропоры могут стать зародышами макропор. С учетом того, что типичное значение энергии образования вакансий в кристаллах составляет около 1 эВ, при температурах $T > 1323$ К в монокристаллах Si концентрация вакансий составляет не менее 10^{16} см⁻³, и такое количество C_v является вполне достаточным для образования макропор. На рис. 13 приведен микроснимок вакансионных пор, образующихся в объеме образцов n-Si после ТО при $T = 1323$ К.

С целью выявления последовательности процессов образования примесных микровключений при диффузионном легировании мы проводили комплексные исследования структуры методом электронно-зондового микроанализа. В исследованиях использовались образцы Si<Ni>, Si<Co> и Si<Mn>, полученные с медленным охлаждением ($v_{охл} \leq 1$ град/с), в объеме которых образуются микровключения относительно большими размерами с многослойной структурой.

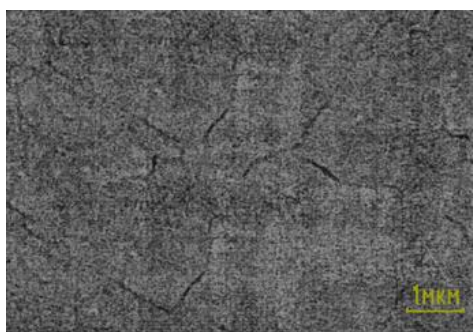


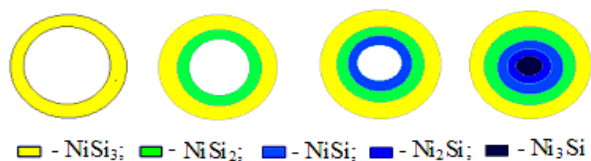
Рис. 12. Линейные дислокации, образующиеся в объеме образцов n-Si при выращивании.



Рис. 13. Микроснимок вакансионных пор, образующихся в объеме образцов n-Si после ТО при $T = 1323$ К.

Проведенный электронно-микроскопический анализ эволюционного развития фазовых превращений, образующихся преципитатов или микровключений, позволил сравнивать элементарные процессы силицидообразования, а также определить последовательность их протекания. Нужно отметить, что энергетическое значение образования силицидов различных типов и их соответственное расположение определенной последовательностью по объему преципитата позволяет выявлять кинетику их формирования. Предполагаемое нами схематическое

представления этапов формирования крупных преципитатов с многослойной структурой приведено на рис 14.



■ - NiSi₃; ■ - NiSi₂; ■ - NiSi; ■ - Ni₂Si; ■ - Ni₃Si

Рис. 14. Схематическое представление формирования крупных преципитатов.

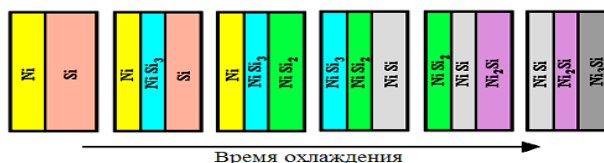


Рис. 15. Схематическое представление последовательности образования силицидных слоёв микровключений никеля в кремнии.

Рассмотрение отдельных элементарных стадий структурообразования микровключений и механизмы их роста, в процессе диффузионного легирования показали, что существование мощного потока атомов легирующей примеси в зону реакции, наличие атомов Ni в окружающей кристаллической структуре вокруг вакансионных пор, дислокаций и трещин в качестве самостоятельной фазы приводит к тому, что силицид NiSi₃ становится неустойчивым и превращается в силицид типа NiSi₂. В данном процессе диффузия не только обеспечивает транспортировку Ni в зону реакции, но и создает, помимо необходимого для образования силицида типа NiSi₃ количества атомов никеля, ее избыток. Таким образом, простая реакция образования силицида типа NiSi₃ усложняется, и в начальные ее стадии параллельно происходят два процесса: образование NiSi₃ в поверхностной зоне и последующая «силицидация» его во внутренней зоне с образованием NiSi₂. В зависимости от скорости охлаждения образцов после диффузии, процесс силицидации можно описать в порядке увеличения количества примесных атомов в микроструктуре. Последующие стадии уплотнения преципитата определяются протеканием процессов проскальзывания атомов примесей как по межатомным, так и межфазным границам. Ввиду этого, в процессе образования примесных преципитатов, в начальной стадии происходит образование силицидов типа NiSi₃, далее происходит образование силицидов в следующем порядке: NiSi₂, NiSi, Ni₂Si, Ni₃Si и т.д.

Данные по изучению роста силицидов показывают, что их рост по толщине происходит за счет металла. При более высоких температурах образование фаз, обогащенных кремнием (например NiSi₃), происходит за счет обогащения атомами основной матрицы. На рис. 15. показана последовательность фазообразования по длительности времени охлаждения образцов после диффузионного отжига. Как видно, первоначально образуются силициды никеля типа NiSi₃, после этого следующий тип силицида NiSi₂, и таким образом конечной фазой для примесей никеля является центр микровключений. В центральной части крупных микровключений образуются силициды, более обогащенные металлом типа Ni₃Si.

Изучение стадий формирования микровключений Co в Si, а также механизмов их роста показало, что формирование многослойных

микровключений Co также начинается с крайних слоев. В начальной стадии процесса формирования микровключений происходит образование силицида типа CoSi_3 , далее с увеличением концентрации примесных атомов в поверхностной зоне усиливается процесс проскальзывания атомов примесей по границе микровключение-матричный кристалл и между фазами, которое приводит к образованию силицидов в следующем порядке: CoSi_2 , CoSi , Co_2Si и др.

Исследование кинетики роста микровключений Mn в Si показало, что и в этом случае образование многослойных микровключений начинается от поверхностных слоев. Формирование крупных микровключений с многослойной структурой начинается с образования поверхностного слоя, который состоит из силицида типа MnSi_2 , далее происходит образование силицидов в следующем порядке: MnSi , Mn_5Si_3 , Mn_3Si .

Следовательно, выясняется, что образование и формирование многослойных примесных микровключений Ni, Co и Mn при диффузионном легировании, происходит по следующей последовательности: первоначально образуется силицид с наименьшей концентрацией атомов примеси, т.е. образуется поверхностный слой микровключения. Далее происходит образование силицидов в порядке увеличения в них доли атомов примеси, которое образуют внутренние слои микровключений.

Результаты исследований влияния температуры диффузии при одинаковых значениях остальных факторов на концентрацию электрически активных атомов Ni в Si, при температурах 1373 К и 1523 К приведены на рис. 16. Как видно из рисунка, диффузия Ni при температуре 1523 К в течение 2 часов (рис. 16, кривая 2) приводит к росту концентрации электрически активных атомов Ni от 10^{13} до 10^{14} см⁻³. Дальнейшее увеличение времени отжига приводит к уменьшению этого значения и при $t=10$ час она составляет ~5 раз. Результаты аналогичных исследований с примесью кобальта показали, что в отличие от никеля в подобной зависимости наблюдается линейный рост во всем исследуемом интервале температур и при $t=10$ час она составляет ~6 раз.

Изучение влияния значения $\nu_{\text{охл}}$, после диффузионного отжига на концентрацию электроактивных атомов примесей Ni, Co и Mn в монокристаллах Si при 1523 К показали (рис. 17), что малые значения $\nu_{\text{охл}}=1\div 10$ град/с к заметным изменениям электрических свойств Si не приводят. В интервале $\nu_{\text{охл}}=100\div 400$ град/с с увеличением $\nu_{\text{охл}}$ концентрация электрически активных атомов Ni и Co заметно возрастает. Для атомов Ni этот рост составляет почти в два порядка, а для атомов Co в ~12 раз. В данном интервале значения $\nu_{\text{охл}}$ концентрация электрически активных атомов Mn увеличивается ~6 раз. Дальнейшее увеличение значения $\nu_{\text{охл}}$ до 600 град/с и более к заметному изменению концентрации электроактивных атомов примесей уже не приводит.

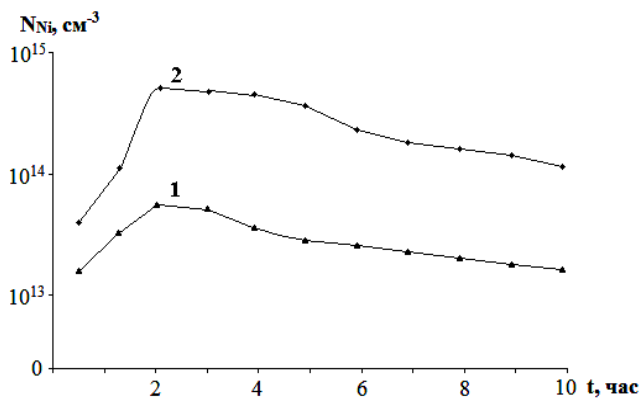


Рис. 16. Зависимость концентрации электроактивных атомов никеля от длительности диффузионного отжига при температурах: 1-1373 К и 2-1523 К.

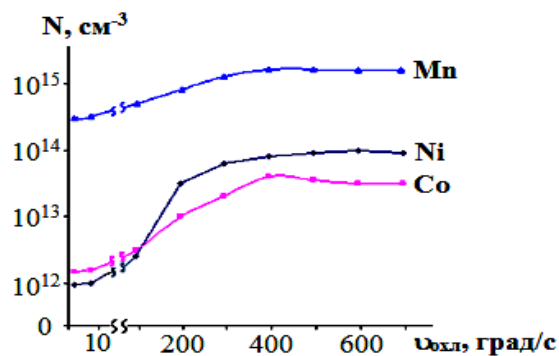


Рис. 17. Зависимость концентрации электроактивных атомов Ni, Co и Mn в Si от $v_{\text{охл}}$ после диффузионного отжига при 1523 К в течении 2 часов.

Таким образом, экспериментально доказано, что максимальная концентрация электроактивных атомов Ni в Si достигается при двухчасовом отжиге. Энергетические уровни примесных центров, определенные в образцах Si, отожженных при условиях максимальной концентрации электроактивных атомов ($5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) составляют для Ni: $E_c - (0,4 \pm 0,01)$ и $E_v + (0,2 \pm 0,02)$ эВ. Эти значения энергетических уровней и их концентрации наиболее стабильны для множества образцов и при повторном отжиге. Стабильные параметры для примесных состояний Co в Si получаются при условиях, идентичных условиям диффузии Ni в Si.

При диффузионном легировании монокристаллов Si примесями Ni, Co и Mn максимальные концентрации электрически активных атомов составляют для $N_{\text{Ni}} \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $N_{\text{Co}} \approx 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $N_{\text{Mn}} \approx 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Атомы Ni в Si проявляют акцепторные, Mn - донорные свойства, а Co является амфотерной примесью.

В пятой главе «**Структура и химический состав микровключений примесных атомов в монокристаллах Si**» приводятся результаты исследования структурного строения и химического состава примесных преципитатов, микро- и нановключений никеля, кобальта и марганца в монокристаллах кремния, полученные с помощью метода электронно-зондового микроанализа. Исследования морфологии, т.е. размеров, формы, структурных строений примесных микровключений, образующихся в объеме монокристаллов кремния, легированных атомами Ni, Co и Mn показали, что эти параметры микровключений, в основном, зависят от скорости охлаждения образцов после диффузионного отжига.

Результаты исследований геометрических форм примесных микровключений в образцах Si<Ni>, Si<Mn> и Si<Co> с быстрым охлаждением ($v_{\text{охл}} > 200$ град/с, после диффузионного отжига показали, что в объеме образцов формируются микровключения с иглообразной, дискообразной и линзообразной формой. В образцах с медленным охлаждением ($v_{\text{охл}} < 1$ град/с) наблюдаются микровключения имеющие, в основном, линзообразную и сферическую форму. Из полученных экспериментальных результатов выяснилось, что геометрические формы

примесных микровключений, образующихся в объеме образцов Si<Ni>, Si<Co> и Si<Mn> существенно зависят от их размеров и тем самым от скорости охлаждения образцов после диффузионного отжига.

Существующие данные о химическом составе микровключений элементов 3d-группы в монокристаллическом кремнии показывают, что до настоящего времени данный аспект является недостаточно изученным. Поэтому, в целях выяснения химического состава примесных микровключений нами проводились электронно-зондовые анализы. Структурный анализ химического состава силицидных слоев по объему преципитатов, в образцах Si<Ni> показывает, что в зависимости от размеров и формы преципитата, процентная доля атомов примеси имеет разные значения. В центре крупных преципитатов с диаметром $d > 2 \cdot 10^{-6}$ м, в образцах n-Si<Ni>, это значение составляет ~80%, а в мелких ($d \leq 10^{-6}$ м) оно составляет ~25%. Результаты исследований зависимости концентрации атомов никеля от диаметра преципитата, в данных образцах показали, что процентная доля атомов никеля по объему преципитата увеличивается по направлению к центру преципитата.

Комплексные исследования химического состава силицидов, находящихся в объеме преципитата, позволили выяснить соотношение атомов основной примеси и технологических примесей, таких, как железо, хром, медь и другие в каждой силицидной оболочке. В таблице 1 приведены данные о распределении атомов Si, Ni, Fe и Cr по диаметру преципитата размером $d = 5 \cdot 10^{-6}$ м, которые имеют четырехслойную структуру со сферической формой. Как видно, максимальная доля атомов основной и технологических примесей находится в центре преципитата.

Таблица 1

Элементы	Расстояние от центра преципитата			
	В центре	(1/4)R	(1/2)R	(3/4)R
Si	24,50	34,75	65,30	76,45
Ni	73,95	64,15	33,85	22,75
Fe	0,4	0,32	0,2	0,1
Cr	0,3	0,2	0,15	0,05

На рис. 18 приведены графики зависимости концентрации атомов основной и технологических примесей от диаметра преципитата сферической формы, размером $d = 1,5 \cdot 10^{-6}$ м, в образцах n-Si<Ni>. Как видно, процентная доля атомов никеля по объему преципитата увеличивается по направлению к центру преципитата и там составляет ~30%. Кроме этого в распределении атомов технологических примесей также наблюдается определенная закономерность. В центральной части преципитата процентная доля атомов Fe составляет ~0,3 %, а для атомов Cr она составляет ~0,27 %. В центральной части более крупного микровключения никеля ($d = 8 \cdot 10^{-6}$ м) процентная доля атомов Ni, Fe и Cr достигают ~75%, ~0,8% и ~0,6% соответственно.

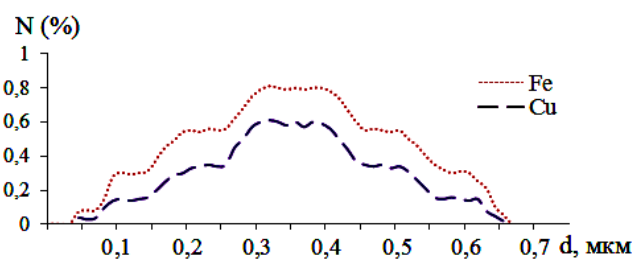
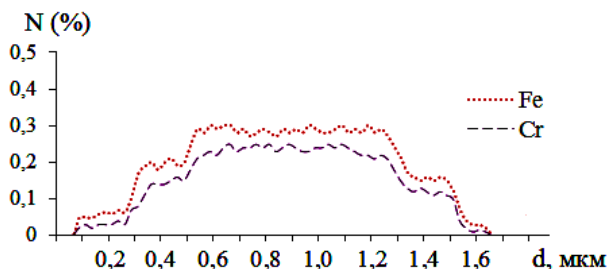
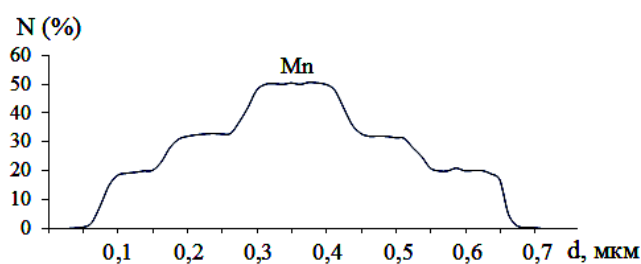
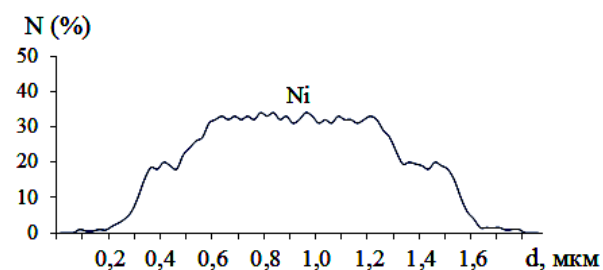


Рис. 18. Распределение атомов Ni, Fe и Cr по диаметру precipитата размером $d=1,5 \cdot 10^{-6}$ м в образцах n-Si<Ni>.

Рис. 19. Распределение атомов Mn, Fe и Cu по диаметру precipитата размером $d=0,7 \cdot 10^{-6}$ м в образцах p-Si<Mn>.

Результаты аналогичных исследований, проведенных с образцами p-Si<Mn>, для precipитата размером $d=0,7 \cdot 10^{-6}$ м приведены на рис. 19. Как видно из рисунка, в распределении атомов технологических примесей Fe и Cu по объему precipитата, наблюдается определенное сходство с распределением атомов основной примеси Mn, т.е. их максимальная доля находится в центральной части precipитата, а по направлению к краю она уменьшается. В центральной части precipитатов с размерами $\sim(0,7 \div 1) \cdot 10^{-6}$ м процентная доля атомов Mn достигает до $\sim 60\%$, а для атомов Fe и Cu это значение достигает $\sim 0,3\%$ и $\sim 0,25\%$ соответственно.

Микроструктурные анализы химического состава иглообразных и дискообразных микровключений в образцах p-Si<Co> показали, что по объему подобных микровключений процентная доля примесных атомов кобальта составляет $\sim 30\%$. Такое соотношение атомов примеси и основной матрицы показывает, что они состоят из силицида кобальта CoSi_2 . Результаты исследований распределения атомов технологических примесей железа и меди по объему линзообразного микровключения размером $d=6 \cdot 10^{-7}$ м, в образцах p-Si<Co> показали, что максимальная процентная доля атомов Fe и Cu по объему микровключения составляет $\sim 0,2\%$ и $\sim 0,15\%$ соответственно.

Таким образом, на основе полученных данных можно предположить, что рост примесных микровключений начинается с крайней оболочки, т.е. образование соединений типа Si_xNi_y , Si_xCo_y или Si_xMn_y происходит по следующему порядку: первоначально образуются силициды с наименьшей концентрацией атомов примеси, далее образуются силициды в порядке увеличения в них доли атомов примеси. Максимальное количество атомов примеси независимо от размера precipитата находится в его центре. В образцах Si<Ni> максимальное значение процентной доли атомов основной примеси по объему крупных precipитатов ($d > 2 \cdot 10^{-6}$ м) составляет $\sim 75\%$. В

объеме мелких преципитатов ($d < 10^{-6}$ м) никеля это значение составляет ~25%. В образцах Si<Co> по объему крупных преципитатов ($d \geq 8 \cdot 10^{-7}$ м) максимальное количество атомов кобальта составляет ~70%, а в мелких ($d < 8 \cdot 10^{-7}$ м) оно достигает до ~30-33%. Максимальное количество примесных атомов марганца в образцах Si<Mn>, по объему относительно крупных микровключений ($d \geq 6 \cdot 10^{-7}$ м) составляет ~60%. В объеме мелких преципитатов $d < 6 \cdot 10^{-7}$ м процентная доля атомов марганца имеет значение ~25-30%.

Установлено, что в объеме примесных преципитатов и микровключений существуют атомы технологических примесей, таких, как Fe, Cr, Cu и др. Максимальное количество атомов этих примесей находится в центральной части микровключений и с увеличением расстояния от центра к поверхности оно уменьшается. По объему микровключений атомы технологических примесей распределяются в той же закономерности, по которой распределены атомы основной примеси. Следовательно, выясняется, что атомы неконтролируемых примесей (Fe, Cr, Сг и др.), при диффузионном легировании кремния, в определенной степени влияют на процесс образования силицидов. Они воздействуют как на кинетику, так и на зарождение и рост различных силицидных слоев. Не исключается, что атомы этих примесей могут играть роль своеобразного катализатора в процессе образования примесных преципитатов и микровключений.

Выявлено, что примесные микровключения существенно воздействуют на кристаллическую структуру кремния. Плотность и размеры образующихся дислокаций вокруг микровключений зависят от размера и формы микровключений, а также их расположения относительно поверхности. Микроструктурные анализы кристаллической структуры вокруг примесных микровключений, относительно мелких размеров до $\sim 10^{-6}$ м, которые находятся в термодинамически неравновесном состоянии показали, что в их окружающей кристаллической структуре, вне зависимости от формы микровключений, наблюдаются дислокационные линии, длина которых достигает нескольких мкм, а иногда образуются микротрещины.

В шестой главе **«Влияние внешних воздействий на свойства кремния, с примесными микровключениями»** приводятся результаты исследования влияния внешних воздействий на физико-химические свойства монокристаллов кремния, содержащих примесные микровключения.

Для исследования влияния термических отжигов на электрические свойства монокристаллов кремния с примесными микровключениями Ni, Co или Mn, изготовленные образцы подвергались изотермической обработке при температурах 373-1273 К в интервале времени 5÷60 минут с последующей резкой закалкой. После каждого этапа отжига исследовались электрические свойства образцов.

Результаты исследования зависимости удельного сопротивления (ρ) от времени отжига в образцах n-Si<Ni>, с $\rho_0 = 7 \cdot 10^4$ Ом·см показали, что при НТО в интервале температуры 373-673 К существенных изменений не

наблюдается (рис. 20, кривая 1). В последующих значениях НТО при 723-1023 К в течение 20÷30 минут в образцах n-Si<Ni> наблюдается увеличение значения ρ (рис. 20, кривые 2-4). При дальнейшем увеличении времени отжига кривые $\rho(t)$ проходят через максимум, после чего наблюдается спад. Как видно из рисунка, в начальных стадиях отжига, в течение 5 минут с ростом температуры ТО, кривая $\rho(t)$ резко увеличивается. При дальнейшем увеличении температуры отжига наблюдается другой эффект, т.е. при температуре $T=1273$ К в течение 5÷10 минут происходит резкое уменьшение значения ρ и образцы n-Si<Ni> приобретают значение удельного сопротивления приблизительно исходного образца (рис. 20, кривая 5).

В образцах p-Si<Ni>, с удельным сопротивлением $\rho=2 \cdot 10^4$ Ом·см, в процессе ТО при $T=1273$ К в течение 25 минут наблюдается резкое увеличение значения ρ образцов до ~ 12 раз. При дальнейшем увеличении времени ТО в течение 20 минут происходит резкое уменьшение значения ρ , что соответствует обычному распаду твердого раствора полупроводник-примесь в перекомпенсированном полупроводнике.

Результаты аналогичных исследований зависимости ρ от времени отжига в образцах n-Si<Co> с удельным сопротивлением $\rho=9 \cdot 10^3$ Ом·см показали, что при НТО в интервале температуры 373-573 К существенных изменений не происходит (рис. 21, кривая 1). В последующих значениях ТО при 623-823 К в течение 20 минут в образцах n-Si<Co> наблюдается увеличение значения ρ (рис. 21, кривые 2,3). В дальнейших значениях времени отжига оно практически стабилизируется. Под влиянием термического отжига при температуре 1073 К в начальных стадиях до 10 минут наблюдается резкое увеличение значения ρ до $\sim 4,5$ раза. В дальнейшем кривое $\rho(t)$ проходит через максимум, после чего в течение 15 минут происходит резкое уменьшение значения ρ образцов (рис. 21, кривая 4). ТО при $T=1173$ К в течение 10 минут приводит к резкому уменьшению значения ρ , и она приближается к исходным образцам, т.е. происходит распад примесных микровключений кобальта в кремнии (рис. 21, кривая 5).

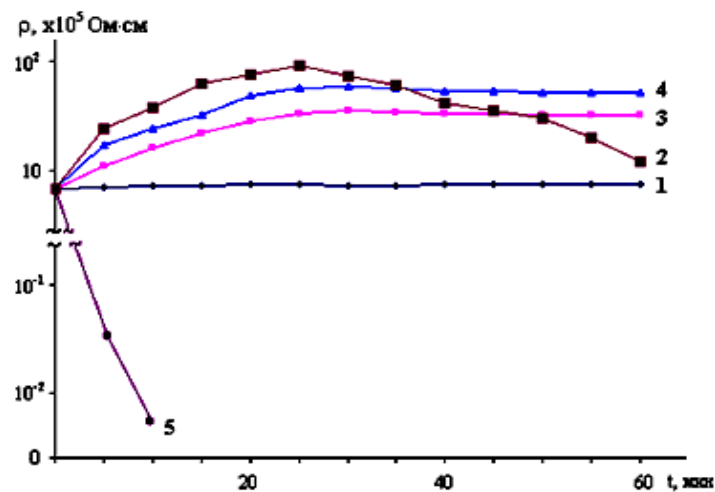


Рис. 20. Зависимость значения ρ от времени отжига в образцах n-Si<Ni> при ТО: 1- 473 К; 2- 723 К; 3-823 К; 4-1023 К; 5-1273 К.

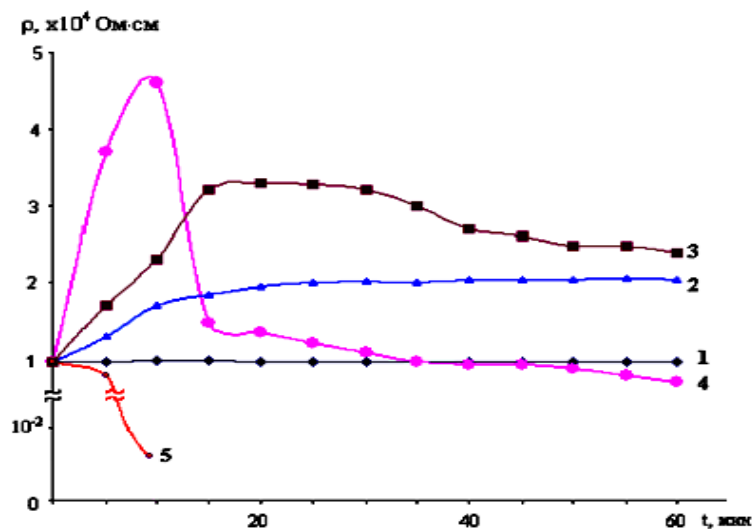


Рис. 21. Зависимость значения ρ от времени отжига в образцах $n\text{-Si}\langle\text{Co}\rangle$ при ТО: 1- 373 К; 2- 623 К; 3-873 К; 4-1073 К; 5-1173 К.

Исследование влияния НТО на удельное сопротивление образцов $p\text{-Si}\langle\text{Mn}\rangle$ в интервале температуры 373-773 К в течение от 5 до 60 минут показали, что в зависимости $\rho(t)$ образцов существенных изменений не происходит (рис. 22, кривая 1). Это объясняется тем, что растворимость атомов марганца в кремнии в междоузлиях наибольшая из ряда Mn, Co и Ni, а способность образования микровключений – наименьшая. Действительно, полученные нами экспериментальные данные показывают, что в $p\text{-Si}\langle\text{Mn}\rangle$ при НТО в температурном интервале 373-773 К протекает обычный распад полупроводник-примесь, что хорошо согласуется с литературными данными. Однако, в процессе НТО при $T=973$ К в течение 30 минут наблюдается рост значения ρ образцов (рис. 22, кривая 2). При дальнейшем увеличении времени отжига, в течение последующих 20 минут наблюдается резкое уменьшение значения ρ , приблизительно до её начального значения. Предполагается, что такое изменение $\rho(t)$ связано с распадом примесных микровключений марганца в кремнии.

Таким образом, на основании полученных экспериментальных результатов влияния НТО можно выделить две стадии в кинетике изменений электрических свойств кремния с примесными микровключениями. На первой стадии отжига образцов $\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle$, $\text{Si}\langle\text{Co}\rangle$ и $\text{Si}\langle\text{Mn}\rangle$ происходит распад примесных скоплений, находящихся в термодинамически неравновесных состояниях, возникших во время закалки образцов после диффузионного отжига. Выделение отдельных примесных атомов в этом процессе приводит к увеличению их концентрации в электрически активных состояниях. Этому благоприятствует образование дополнительных вакансий, при распаде микровключений примесных атомов Ni и Co в Si. Следовательно, при определенных температурах ТО в зависимостях $\rho(t)$ этих образцов наблюдаем резкие увеличения или уменьшения (в зависимости от типа проводимости легированного Si) значения ρ образцов. С увеличением времени отжига будет происходить классический распад примесных атомов в твердом растворе полупроводник-примесный атом, т.е. уход неравновесных

примесных атомов из узловых положений, где они электрически активны (Ni^- , Co^-) в различные стоки (дислокации, нейтральные скопления, поверхности). Это подтверждается результатами микроскопических исследований, т.е. наблюдаются расщепление микровключений или уменьшение их размеров и переход части атомов из них на дислокации.

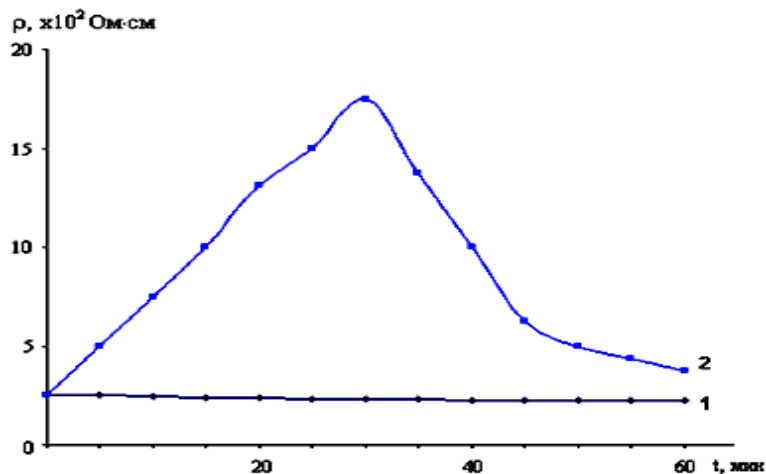


Рис. 22. Зависимость значения ρ от времени отжига в образцах $p-Si<Mn>$ при ТО: 1- 373 К; 2- 973 К.

Исследования влияния нейтронного облучения на удельные сопротивления легированных и исходных образцов показали, что они существенно отличаются друг от друга. В исходных образцах при дозах облучения нейтронами $\Phi = 10^{13} \div 5 \cdot 10^{17}$ н/см² значение ρ увеличивается почти на ~ 4 порядка (рис. 23, кривая 1).

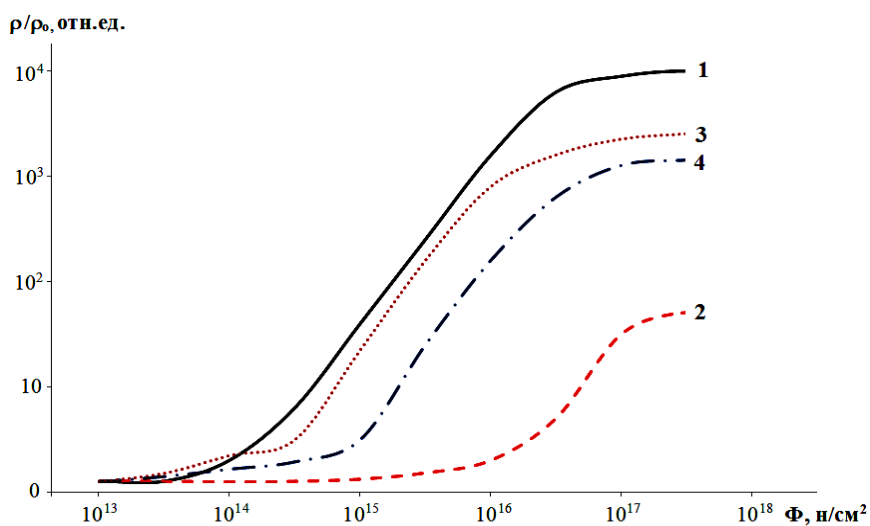


Рис. 23. Зависимость ρ/ρ_0 от интегральной дозы облучения в образцах: 1– $n-Si_{исх.}$; 2– $Si<Ni>$; 3– $Si<Mn>$; 4– $Si<Co>$.

В образцах $Si<Ni>$, с $\rho = 5 \cdot 10^3$ Ом·см, характер зависимости относительного изменения ρ от интегральной дозы облучения, значительно отличается от исходных образцов. Изменение значения ρ/ρ_0 образцов $Si<Ni>$, в зависимости от дозы облучения в интервале $\Phi = 5 \cdot 10^{16} \div 2 \cdot 10^{17}$ н/см² имеет особый характер, т.е. в этом промежутке наблюдается рост удельного сопротивления образцов почти на один порядок (рис. 23, кривая 2). При дозе

облучения $\Phi=5 \cdot 10^{17}$ н/см² рост значения ρ образцов достигает своего максимального значения и будет составлять $4,2 \cdot 10^5$ Ом·см.

В образцах Si<Mn> n-типа с исходным $\rho=3,1 \cdot 10^2$ Ом·см существенное изменение в значении ρ образцов происходит при дозах облучения $\Phi > 10^{14}$ н/см² (рис. 23, кривая 3). Как видно из рисунка, при дальнейшем увеличении дозы облучения в интервале $\Phi=5 \cdot 10^{14} \div 10^{16}$ н/см² наблюдается резкое увеличение значения ρ/ρ_0 более чем на ~ 2 порядка. В образцах Si<Co>, с $\rho=3 \cdot 10^3$ Ом·см, характерный рост значения ρ/ρ_0 наблюдается при дозах облучения в интервале $\Phi=2 \cdot 10^{15} \div 5 \cdot 10^{16}$ н/см², где удельное сопротивление образцов увеличивается на ~ 2 порядка (рис. 23, кривая 4).

Таким образом, на основе полученных экспериментальных данных установлено, что радиационная стойкость монокремния с примесными микровключениями значительно увеличивается. Такой исход радиационных воздействий на свойства Si можно объяснить тем, что примесные микровключения в образцах Si<Ni>, Si<Co> и Si<Mn> имеют гетерирующий характер. В процессе облучения образующиеся радиационные дефекты притягиваются к примесным микровключениям и переходят в электрически нейтральные состояния. Следовательно, наблюдаются сравнительно небольшие изменения в электрических параметрах образцов.

Для изучения влияния ВГД на свойства Si с примесными микровключениями образцы n-Si<Ni> с $\rho=10^3$ Ом·см, полученные с быстрым охлаждением ($v_{\text{охл}} > 200$ град/с), подвергались к ВГД в интервале $P=0 \div 20 \cdot 10^8$ Па, после чего были проведены повторные измерения ρ каждого образца. В начальных стадиях ВГД до $P < 4 \cdot 10^8$ Па наблюдаются незначительное уменьшение в значениях ρ образцов, которое составляет ~ 25 % (рис. 24, кривая 1). В последующих значениях ВГД ρ образцов начинает увеличиваться скачкообразным характером. Такое изменение значения ρ образцов подтверждает, что при определенных значениях ВГД (при $4 \cdot 10^8$ Па; $12 \cdot 10^8$ Па и $20 \cdot 10^8$ Па) происходит распад примесных микровключений. Наблюдаемый необратимый характер в зависимости $\rho=f(P)$ образцов, при значениях $P \geq 4 \cdot 10^8$ Па, так же подтверждает, что под влиянием ВГД происходит распад примесных микровключений.

Результаты аналогичных исследований в образцах n-Si<Co>, с $\rho=3 \cdot 10^3$ Ом·см показали, что при $P < 2 \cdot 10^8$ Па значение ρ образцов уменьшается на $10 \div 15$ % (рис. 24, кривая 2). Под воздействием ВГД при $P=4 \cdot 10^8$ Па и $P=8 \cdot 10^8$ Па, наблюдаются резкие увеличения в значении удельного сопротивления образцов и они достигают своего максимального значения $\rho=7 \cdot 10^4$ Ом·см.

В целях выяснения природы подобных изменений удельных сопротивлений легированных образцов под влиянием ВГД, нами проводились комплексные микроструктурные анализы состояний примесных микровключений в образцах n-Si<Ni> и n-Si<Co>, с помощью электронно-зондового микроанализатора, до и после ВГД. Микроструктурный анализ примесных микровключений в образцах n-Si<Co> подтверждает, что под

влиянием ВГД при $P=4 \cdot 10^8$ Па происходит распад микровключений размерами до $8 \cdot 10^{-7}$ м. На рис. 25 приведены микроснимки образца n-Si<Co> до и после ВГД при $P=4 \cdot 10^8$ Па. Существующие в объеме образцов микровключения кобальта, размерами до $\sim 8 \cdot 10^{-7}$ м, имеющие иглообразные и дискообразные формы после воздействия ВГД исчезают, т.е. подобные микровключения распадаются.

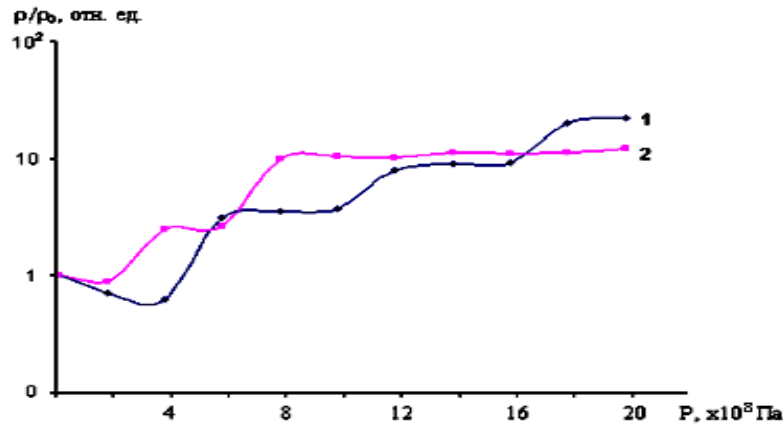


Рис. 24. Зависимость ρ_t/ρ_0 от ВГД в образцах: 1–n-Si<Ni>, 2–n-Si<Co>.

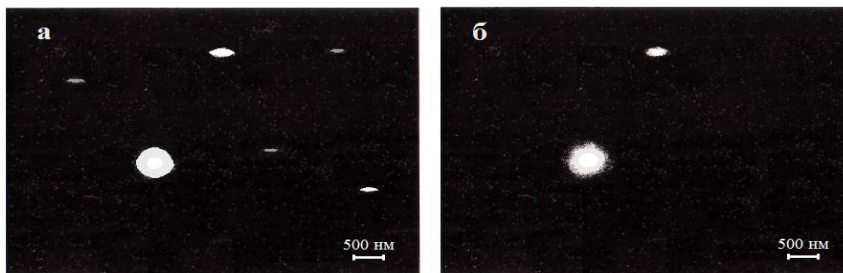


Рис. 25. Снимки образца n-Si<Co> до (а) и после (б) ВГД при $P=4 \cdot 10^8$ Па.

Выявлено, что в объеме образцов n-Si<Ni>, после ВГД при $P=4 \cdot 10^8$ Па, количество примесных микровключений размерами $\sim 10^{-6}$ м, имеющих иглообразные и дискообразные формы резко уменьшается. Сравнительные анализы образцов n-Si<Ni> до и после ВГД также показали, что при данном значении ВГД происходит распад мелких микровключений.

Для изучения механизма распада примесных микровключений с более крупными размерами, нами проводилось комплексное исследование по влиянию ВГД на морфологические строения микровключений в образцах Si<Ni>. На рис. 26. приведены результаты микроструктурных анализов структурного состава многослойного микровключения со сферической формой. До воздействия ВГД график распределения атомов никеля по диаметру данного микровключения имел вид, который представлен на рис. 26 (кривая 1). Анализы показали, что под воздействием давления равной $P=4 \cdot 10^8$ Па наблюдается изменение в распределении примесных атомов по диаметру микровключения, т.е. поверхностная оболочка, состоящая из силицида типа Si_3Ni распадается (рис. 26, кривая 2). Дальнейший рост значения ВГД не приводит к изменениям структуры микровключения. Под влиянием ВГД при $P=1,2 \cdot 10^9$ Па происходит распад следующей силицидной оболочки типа Si_2Ni (рис. 26, кривая 3). В последующем значении ВГД при

$P=2 \cdot 10^9$ Па наблюдается распад следующей силицидной оболочки типа SiNi (рис. 26, кривая 4). Такая последовательность распада характерна и для остальных микровключений с относительно большими размерами, которые имеют сферическую форму.

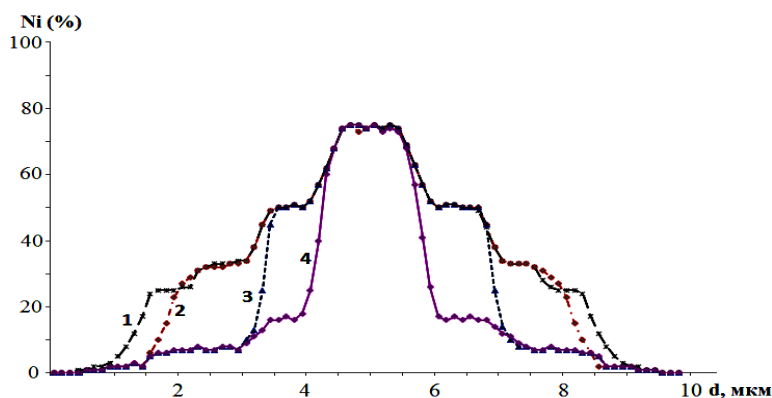


Рис. 26. График последовательности распада микровключения Ni, под влиянием ВГД при: 1– 0 Па; 2– $4 \cdot 10^8$ Па; 3– $1,2 \cdot 10^9$ Па; 4– $2 \cdot 10^9$ Па.

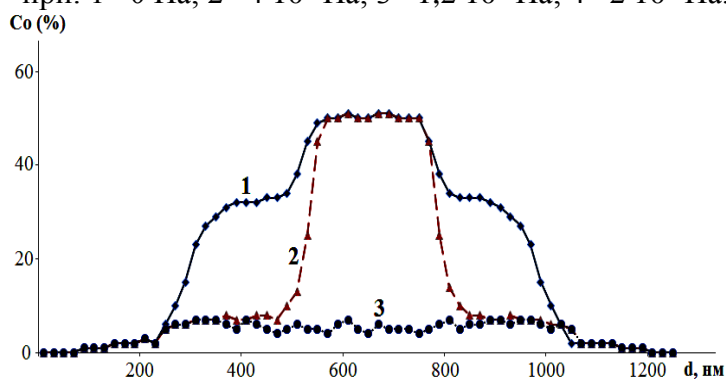


Рис. 27. График последовательности распада нановключения Co под влиянием ВГД при: 1– $2 \cdot 10^8$ Па; 2– $4 \cdot 10^8$ Па; 3– $8 \cdot 10^8$ Па.

На рис. 27 приведен график последовательности распада примесного нановключения кобальта в кремнии, состоящий из двух слоев силицида кобальта со сферической формой и размером $d=800$ нм под влиянием ВГД. Как видно, под воздействием ВГД при $P < 2 \cdot 10^8$ Па (рис. 27, кривая 1), в распределении примесных атомов кобальта по диаметру нановключения существенных изменений не наблюдается, т.е. морфология двухслойного нановключения остается неизменной. Дальнейшее увеличение значения ВГД приводит к заметным изменениям морфологии нановключений и при достижении $P=4 \cdot 10^8$ Па наблюдается распад поверхностного слоя нановключения (рис. 27, кривая 2). Под влиянием ВГД при $P=8 \cdot 10^8$ Па происходит полный распад нановключений кобальта (рис. 27, кривая 3).

Таким образом, на основании полученных экспериментальных результатов выявлено, что последовательность распада микро- и нановключений Ni, Mn и Co в Si под влиянием ВГД зависит от их размеров и формы, т.е. первоначально распаду подвергаются нановключения с иглообразными и дискообразными формами, имеющие относительно мелкие размеры, а также поверхностные слои более крупных нановключений (>500 нм), которые имеют линзообразные и сферические формы. Выявлено, что процесс распада микровключений сферической формы под влиянием ВГД

происходит по следующему порядку: первоначально, распаду подвергается поверхностный слой, который имеет наименьшее значение поверхностного напряжения. С увеличением значения ВГД, при определенных его значениях, происходит распад последующих слоев по направлению к центру микровключения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных экспериментальных исследований и анализа литературных данных, а также сравнивая их с существующими теоретическими представлениями физических основ образования микровключений примесных атомов и их влияние на свойства монокремния можно сделать следующие выводы:

1. На основе термодинамического анализа состояний примесных атомов в твердых растворах Si-Ni, Si-Co и Si-Mn установлена неизбежность образования примесных микровключений, преципитатов или кластеров.

2. Выявлено, что размеры и формы примесных преципитатов или микровключений в образцах Si<Ni>, Si<Co> и Si<Mn> n и p-типа, полученных методом диффузионного легирования, в основном, зависят от скорости охлаждения ($v_{\text{охл}}$) образцов после диффузионного отжига. Уменьшение значения $v_{\text{охл}}$ образцов приводит к увеличению размеров микровключений, которые имеют многослойную структуру со сферической и линзообразной формой.

3. Установлено, что примесные микровключения Ni, Co и Mn в Si в зависимости от их размеров и формы имеют различные структуры. Относительно крупные микровключения никеля (>2 мкм), кобальта ($>0,5$ мкм) и марганца ($>0,4$ мкм) состоят из двух или более слоев силицидов типа Ni_xSi_y , Co_xSi_y и Mn_xSi_y соответственно. А мелкие микровключения никеля (до ~ 1 мкм), кобальта (до $\sim 0,5$ мкм) и марганца (до $\sim 0,3$ мкм), в основном, состоят из одного типа силицида.

4. Обнаружено, что в объеме микровключений с многослойной структурой процентная доля примесных атомов увеличивается по направлению от поверхности к центру микровключений.

5. Установлено, что в объемах примесных скоплений помимо атомов основной примеси Ni, Co или Mn, а также матричного материала Si, существуют атомы и технологических примесей (таких, как Fe, Cu, Cr) и по объему они распределены подобно основным примесным атомам. Наличие этих атомов может играть роль катализатора в реакциях образования различных силицидов никеля, кобальта и марганца в кремнии.

6. Установлено, что под влиянием ТО при $T=1273$ К в образцах Si<Ni> n-типа в течение 5-10 минут, и p-типа в течение 25 минут наблюдается распад примесных микровключений. В образцах n-Si<Co> распад примесных микровключений под влиянием ТО наблюдается при $T=1173$ К в течение 10 минут. Распад примесных микровключений в образцах p-Si<Mn> под влиянием ТО происходит при $T=973$ К в течение 20-40 минут.

7. Выявлено, что в образцах легированных Ni, Co и Mn заметно уменьшается скорость образования радиационных дефектов. При этом, чем больше концентрация примесных атомов, тем сильнее проявляется этот эффект.

8. Установлено, что механизм распада примесных скоплений зависит от их размеров и формы. В образцах Si<Ni> под влиянием ВГД при $P=4 \cdot 10^8$ Па происходит распад мелких микровключений (до ~ 1 мкм) с дискообразными и иглообразными формами. Далее при $P > 4 \cdot 10^8$ Па происходит распад линзообразных и сферических микровключений более крупных размеров. В образцах Si<Co> под влиянием ВГД при $P=4 \cdot 10^8$ Па происходит распад нановключений с размерами до 500 нм, имеющих иглообразные и дискообразные формы, а также расщепление поверхностного слоя более крупных нановключений (> 500 нм), которые имеют линзообразные и сферические формы. Эти результаты способствуют определению механизмов взаимодействия собственных дефектов монокремния с атомами легирующих примесей.

9. Показано, что легирование монокристаллов кремния примесями образующими микровключения, играет значительную роль в очищении его объема от различных дефектов. Это связано с тем, что образующиеся примесные скопления проявляют геттерирующие свойства по отношению как к радиационным, так и термическим и барическим дефектам.

10. Показано, что полученные в диссертационной работе экспериментальные результаты позволяют расширить функциональные возможности диодов и МДП – структур, полученных на основе кремния легированного нетрадиционными примесными атомами.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.28.02.2018.FM.60.01
ON THE ADOPTION OF SCIENTIFIC DEGREES
BY ANDIJAN STATE UNIVERSITY**

ANDIJAN STATE UNIVERSITY

TURGUNOV NOZIMJON ABDUMANNOPOVICH

**PHYSICAL FOUNDATIONS OF THE FORMATION OF MICROVALUES
OF APPARATUS ATOMS AND THEIR INFLUENCE ON THE
PROPERTIES OF MONOSILICON**

01.04.10 – physics of semiconductors

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

Andijan - 2018

The subject of the thesis of the doctor (DSc) in physics and mathematics was registered in the Higher Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan for B2018.1DSc/FM114.

The Doctoral dissertation was performed at the Andijan State University.

The abstract of the thesis in three languages (Uzbek, Russian, English (summary)) is posted on the web page at (www.adu.uz) and on the Information and Educational Portal «ZiyoNet» at www.ziynet.uz.

Scientific consultant: **Zaynabidinov Sirojiddin Zainabidinovich**
doctor of physical and mathematical sciences, professor,
academician of the Academy of Sciences of the Republic of
Uzbekistan

Official opponents: **Vaitkus Yuosas Yuozovich**
doctor of physical and mathematical sciences,
professor academician of the Lithuanian Academy of Sciences

Gulyamov Gofur
doctor of physical and mathematical sciences, professor

Zikrillayev Nurilla Fathullaevich
doctor of physical and mathematical sciences, professor

Leading organization: **National University of Uzbekistan**

Defense will take place «___» _____ 2018 at ___ at the meeting of Scientific Council number DSc.28.02.2018.FM.60.01 at Andijan state university. Address: 170100, Uzbekistan, Andijan, 129 Universitet street. Phone/fax: 0(374) 223-88-30, e-mail: agsu_info@edu.uz.

Dissertation is possible to review in Information-resource centre at Andijan state university (is registered under №___) Address: 170100, Uzbekistan, Andijan, 129 Universitet street. Phone/fax: 0(374) 223-88-30, e-mail: agsu_info@edu.uz.

Abstract of dissertation sent out on «___» _____ 2018.

(Registry record №_____ on «___» _____ 2018).

R.U. Aliev

Vice-chairman of scientific council on
award of scientific degree, DSc in
technical sciences, professor

A.O. Kurbanov

Scientific secretary of scientific council on
award of scientific degree, PhD in physics
and mathematics

I.N. Karimov

Executive chairman of scientific Seminar
under Scientific Council on award of
scientific degree, DSc in physics and
mathematics

INTRODUCTION (abstract doctor's dissertation (DSc) dissertation)

The subject of the study is the process of formation of microinclusions, precipitates or nanoclustering of nickel, cobalt and manganese atoms in single-crystal silicon, as well as their decay under the influence of TA, radiation and THP.

The objects of the study of investigation are monocrystalline silicon of KDB-5, 10, 20 and KEF-5, 10, 20, and 40. Metallic Ni, Co and Mn of special purity, which possess the electronic structures $3d^84s^2$, $3d^74s^2$ and $3d^54s^2$ respectively, were used as a diffusant.

The scientific novelty of the study is as follows:

the thermodynamic inevitability of the formation of impurity microvoid and precipitates in silicon doped with atoms of 3d-group elements was revealed;

the structures and chemical composition of microinclusions of Ni, Co, or Mn impurity atoms in monosilicon have been experimentally discovered and scientifically substantiated;

the dependence of the structural structure of impurity clusters on their size and geometric shape is determined. large clusters ($>10^{-6}$ m) have a multilayer structure, and small ($<5 \cdot 10^{-7}$ m.), mainly consist of one type of silicide Ni, Co, Mn and have a monolayer structure.

physical mechanisms for the formation of microinclusions and precipitates of impurity atoms of various forms and structures in silicon single crystals have been determined;

experimentally established the existence in the volume of impurity microinclusions of the atoms of technological impurities (for example: Fe, Cu, etc.) and revealed a certain pattern in their distribution by the volume of microinclusions;

the mechanisms of the observed new electrical and photoelectric phenomena in silicon diffusion-doped with Ni, Co, or Mn are determined.

the effects of thermal annealing, high hydrostatic pressures, gamma and neutron irradiation in doped silicon and their essence have been established;

possible mechanisms for the decay of dissolved impurity atoms and their microinclusions in doped silicon crystals during heat treatment, all-round pressure and irradiation are determined;

generalized ideas on the formation of deep energy levels, inclusions of the second phase of electrically inactive atoms and their degradation under the influence of external influences are proposed.

Implementation of research results. Based on the results of a study of the management of the electrophysical properties of single-crystal silicon with impurity microinclusions, depending on their physical parameters under various external influences:

the results of determining optimal technological conditions for obtaining compensated silicon with a given degree of compensation, allowing to increase the thermal and radiation stability of the parameters of semiconductors and devices based on them used in the production of semiconductor devices with positive characteristics in the joint-stock company FOTON (Reference No. 02-1229 the

company «Uzeltehsanoat» dated May 29, 2018). The use of scientific results have made it possible to expand the functional capabilities of diodes and MDS structures obtained on the basis of silicon doped with unconventional impurity atoms;

the results of experimental studies on the formation of micro- and nanoinclusions of impurity atoms in the silicon volume, with diffusion doping, were used to control the properties of doped silicon samples in a given direction during the fundamental project F2-28 "Surface and volume quantum-measuring effects in doped silicon and their influence on the separation processes of generation-recombination and current carriers in p- and n-structures «(Reference No. 89–03–2314 of the Ministry of Higher and Secondary Special Education of the Republic of Uzbekistan dated June 13, 2018). The use of scientific results allowed us to identify patterns of interaction of micro- and nanoinclusions of impurity atoms with defects in the crystal structure of doped silicon.

Publication of research results. According to the materials of the thesis 36 scientific works were published, including 12 articles in journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publication of the main scientific results of dissertations.

Structure and scope of the dissertation. The thesis consists of an introduction, six chapters, a conclusion and a list of literature. The volume of the dissertation is 200 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I-часть; part I)

1. Zainabidinov S.Z., Musaev K.N., Turgunov N.A., Turaev A.R. Dopant microassociation mechanisms in Si<Mn> and Si<Ni> // Inorganic Materials. 2012. Vol. 48. Issue 11. pp. 1065-1069. Doi: 10.1134/S0020168512110192 (№3 Scopus, Impact Factor 0,69).

2. Тургунов Н.А. Исследование структуры и химического состава примесных преципитатов никеля и марганца в монокристаллах кремния // Доклады Академии Наук Высшей школы России. Новосибирск. 2007. №2(9). С. 70-75. (РИНЦ, Impact Factor 0,237).

3. Zainabidinov S.Z. and Turgunov N.A. Formation and kinetics of decomposition of impurity nickel precipitates in silicon // Russian Physics Journal. 2004. Vol. 47. №12. pp. 1307-1309. (№11 Springer, Impact Factor 0,64).

4. Turgunov N.A. Investigation of impurity nanoinclusions of cobalt in monocrystals of silicon // Science and World. 2018. №5(57), pp. 21-24. (№5 GIF, IF: 0,365).

5. Turgunov N. Decay of Impurity Nano-inclusions of Cobalt in Silicon under the Influence of Thermal Annealing // Journal of Material Sciences & Engineering. 2018. Vol. 7. Issue 3. Doi: 10.4172/2169-0022.1000458 (№12 Index Copernicus, Impact Factor 5,447)

6. Зайнабидинов С.З., Тургунов Н.А. Влияния радиационного облучения на электрофизические свойства образцов Si<Ni> и Si<Co> // Научный вестник Андижанского государственного университета. 2018. №2. С. 11-14 (01.00.00., №13).

7. Зайнабидинов С.З., Тургунов Н.А. Исследование примесных нановключений кобальта в монокристаллах кремнии под влиянием давления // Доклады АН РУз. Ташкент. 2018. №2. С. 72-76 (01.00.00., №7).

8. Зайнабидинов С.З., Тургунов Н.А. Некоторые закономерности распределения атомов основных и технологических примесей по объему преципитата в монокристаллах Si легированного Ni // Узбекский физический журнал. 2003. №5-6. С. 371-375. (01.00.00., №5).

9. Тургунов Н.А. Некоторые особенности диффузионной пористости монокристаллов кремния при высоких температурах // Узбекский физический журнал. 2005. Vol. 7. №4. С. 264-266. (01.00.00., №5).

10. Тургунов Н.А. Структурообразование и кинетика распада примесных микровключений никеля в кремнии // Узбекский физический журнал. 2014. Том 16. №1. С. 51-54. (01.00.00., №5).

11. Тургунов Н.А. Электронно-зондовые исследования формирования микровключений примеси кобальта в монокристаллах кремния // Узбекский физический журнал. 2016. Vol. 18. №4. С. 259-263. (01.00.00., №5).

12. Тургунов Н.А. Исследование структуры и химического состава микровключений примеси кобальта в монокристаллах кремния // Узбекский физический журнал. 2016. Vol. 18. №5. С. 316-321. (01.00.00., №5).

II бўлим (II-часть; part II)

13. Тургунов Н.А. Исследование примесных преципитатов кобальта в кремнии // Научный вестник Андижанского государственного университета. №2. 2012. С. 21-25.

14. Тургунов Н.А. Моделирование роста микровключений примесных атомов никеля в монокристаллах кремния // Научный вестник Андижанского государственного университета. №4. 2011. С. 11-13.

15. Мусаев К., Тургунов Н.А., Зайнабидинов С.З. Преципитация примесных микровключений никеля в кремнии // Научный вестник Андижанского государственного университета. Специальный выпуск. 2009. С. 29-32.

16. Зайнабидинов С.З, Тургунов Н.А., Мамажонова Д.Х. Исследование кинетики распада примесных нановключений в образцах n-Si<Co> // «Физика фанининг ривожиди истеъдодли ёшларнинг ўрни» Республика илмий анжумани материаллари тўплами. Тошкент. 2018 й. 11-12 май. С. 4-5.

17. Тургунов Н.А., Мамажонова Д.Х. Исследование электрофизических свойств кремния, с примесными микровключениями никеля // «Физика фанининг ривожиди истеъдодли ёшларнинг ўрни» Республика илмий анжумани материаллари тўплами. Тошкент. 2018 й. 11-12 май. С. 12-14.

18. Зайнабидинов С.З, Тургунов Н.А. Влияние давления на электрические свойства кремния легированного никелем и кобальтом // «Яримўтказгичлар физикасининг ва қайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантиришнинг замонавий муаммолари» Республика илмий амалий анжумани тўплами. Андижон. 2018 й. 20-21 апрель. С. 56-57.

19. Тургунов Н.А., Мамажонова Д.Х. Образование микропор в монокристаллах кремния при высоких температурах диффузии // «Яримўтказгичлар физикасининг ва қайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантиришнинг замонавий муаммолари» Республика илмий амалий анжумани тўплами. Андижон. 2018 й. 20-21 апрель. С. 63-65.

20. Тургунов Н.А. Исследование примесных микровключений никеля и кобальта в кремнии // Научный форум: Технические и физико-математические науки: Материалы XIX международной научно-практической конференции. № 9(19). –М., Изд. «МЦНО», 2018 г. С. 4-9.

21. Зайнабидинов С.З, Тургунов Н.А. Влияние всестороннего гидростатического давления на электрофизические свойства образцов n-Si<Ni> и n-Si<Co> // Материалы республиканской научно-практической конференции «Неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах» Ташкент. 1-2 февраля 2017 г. С. 33-34.

22. Тургунов Н.А. Влияние примесных микровключений кобальта на электрофизические свойства образцов n-Si<Co> // Материалы

республиканской научно–практической конференции «Неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах». Ташкент. 1-2 февраля 2017 г. С. 51-52.

23. Тургунов Н.А. Рост вакансионных пор при высоких температурах в монокристаллах кремния // «Микроэлектроника, нанозарралар физикаси ва технологиялари» Республика илмий-амалий конференцияси материаллари тўплами. Андижон. 2015 й. 4-5 декабрь. С. 57-58.

24. Тургунов Н.А. Изучение процессов распада примесных микровключений кобальта в образцах p-Si<Co> // «Микроэлектроника, нанозарралар физикаси ва технологиялари» Республика илмий-амалий конференцияси материаллари тўплами. Андижон. 2015 й. 4-5 декабрь. С. 58-60.

25. Зайнабидинов С., Мусаев К., Тургунов Н., Каххоров Ш. О механизмах образования примесных микровключений в монокремнии // Сборник научных материалов «II Международная конференция по оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах». Часть 2. 8-9 сентября 2011 г. Фергана. С. 284-286.

26. Мусаев К., Тургунов Н.А., Зайнабидинов С. Особенности преципитации Ni в Si // Материалы 2-Международной конференции «Неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах». Ташкент. Октябрь. 2009 г. С. 65-68.

27. Тургунов Н.А. Влияние примесных преципитатов на кристаллическую структуру кремния // Материалы научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики». Ташкент. 30-31 мая 2008 г. С. 177.

28. Тургунов Н.А. Вакансионная пористость в монокристаллах кремния при высоких температурах // Материалы научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики». Ташкент. 30-31 мая 2008 г. С. 178.

29. Комилова Д., Зайнабидинов С.З, Тургунов Н.А. Темир киришмаларининг кремнийдаги холатлари // Материалы IV-ой Республиканской научной конференции «Рост, свойства и применение кристаллов». Андижан. 11-12 апреля 2008 г. С. 92-93.

30. Зайнабидинов С.З, Тургунов Н.А. Процесс распада преципитатов никеля в кремнии при радиационном облучении // «Замонавий физиканинг фундаментал ва амалий муаммолари» Республика илмий амалий конференция материаллари тўплами. Ташкент. 2007. С. 122-123.

31. Тургунов Н.А. Распад примесных преципитатов Ni в Si при термической обработки // «Замонавий физиканинг фундаментал ва амалий муаммолари» Республика илмий амалий конференция материаллари тўплами. Ташкент. 2007. С. 124-126.

32. Тургунов Н.А. Исследование механизма роста и образования примесных преципитатов никеля в кремнии // «Яримўтказгичлар физикасининг фундаментал ва амалий муаммолари» Халқаро илмий-услубий конференция материаллари. Андижон. 2005 й. 20-21 декабрь. С. 28.

33. Тургунов Н.А. Исследование свойств примесных преципитатов Ni и Mn в монокристаллах кремния // «Яримўтказгичлар физикасининг фундаментал ва амалий муаммолари» Халқаро илмий-услубий конференция материаллари. Андижон. 2005 й. 20-21 декабрь. С. 77.

34. Зайнабидинов С.З, Тургунов Н.А. Влияние атомов неконтролируемых примесей в процесс образования примесных преципитатов в монокристаллах кремния // «Илмий ва услубий тадқиқотдан амалиётга» илмий анжуман материаллари. Андижон. 2005 й. 2-3 сентябрь. С. 90.

35. Тургунов Н.А. Диффузионная пористость в монокристаллах кремния // «Илмий ва услубий тадқиқотдан амалиётга» илмий анжуман материаллари. Андижон. 2005 й. 2-3 сентябрь. С. 98.

36. Зайнабидинов С.З, Тургунов Н.А., Акбаров Ш.К. Исследование примесных преципитатов никеля в монокристаллах кремния // Физикавий электроника бўйича III Республика анжумани. Тошкент, Шахрисабз. 2002 й. 6-8 ноябрь. С. 152.

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари
Андижон давлат университетининг «Илмий хабарнома» журнали
таҳририясида таҳрирдан ўтказилди (14.09.2018 йил).

Босишга рухсат этилди: 12.10.2018 йил
Бичими 60x45 ¹/₈, «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табағи 4,6. Адади: 100. Буюртма: № 305.

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.