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

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

БЕКПУЛАТОВ ИЛХОМ РУСТАМОВИЧ

НАНОЎЛЧАМЛИ МЕТАЛЛ СИЛИЦИД ПЛЁНКАЛАР ОЛИШ ВА УЛАРНИНГ ФИЗИК ХОССАЛАРИ

01.04.04 – Физик электроника

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

Тошкент – 2018

УДК:537.533.7.8

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

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

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

Бекпулатов Илхом Рустамович
Наноўлчамли металл силицид плёнкалар олиш ва уларнинг физик хоссалари …….. 3

Бекпулатов Илхом Рустамович
Получение наноразмерных плёнок силицидов металлов и их физические свойства ..……. 21

Bekpulatov Ilkhom Rustamovich
Obtaining nanodimensional metal silicide films and their physical properties ...…… 41

Эълон қилинган ишлар рўйхати
Список опубликованных работ
List of published works ...…….. 45

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

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

БЕКПУЛАТОВ ИЛХОМ РУСТАМОВИЧ

НАНОЎЛЧАМЛИ МЕТАЛЛ СИЛИЦИД ПЛЁНКАЛАР ОЛИШ ВА УЛАРНИНГ ФИЗИК ХОССАЛАРИ

01.04.04 – Физик электроника

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

Тошкент – 2018

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2017.2.PhD/FM98 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Тошкент давлат техника университетида бажарилган.

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

Илмий раҳбар:	**Рисбаев Абдурашит Сарбаевич** физика-математика фанлари доктори
Расмий оппонентлар:	**Ашуров Хотам Бахранович** техника фанлари доктори, катта илмий ходим
	Эгамбердиев Бахром Эгамбердиевич физика-математика фанлари доктори, профессор
Етакчи ташкилот:	**Ўзбекистон Миллий университети**

Диссертация ҳимояси Физика-техника институти, Ион-плазма ва лазер технологиялари институти ва Самарқанд давлат университети ҳузуридаги DSc.27.06.2017. FM./T.34.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2018 йил «__» _____ куни соат ____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100084, Тошкент шаҳри Бодомзор йўли кўчаси 2-б уй. Тел./факс: (99871) 235-42-91; E-mail: ftikans@uzsci.net, Физика-техника институти мажлислар зали).

Диссертация билан Физика-техника институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин. (___ рақам билан рўйхатга олинган.). Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Бодомзор йўли кўчаси, 2 б-уй. Физика-техника институти. Тел./факс: (99871) 235-42-91.

Диссертация автореферати 2018 йил «____»_____ куни тарқатилди.
(2018 йил «____» _____ даги ____ рақамли реестр баённомаси.)

Н.Р.Авезова
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш
раиси т.ф.д., катта илмий ходим

О.А.Абдулхаев
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш
илмий котиби, ф.-м.ф.н. (PhD)

А.Абдурахмонов
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш
қошидаги илмий семинар раиси, т.ф.д.,
профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Бугунги кунда жаҳонда жадал ривожланаётган нанотехнологиялар сохасида истиқболли йўналишлардан бири наноўлчамли металл силицид плёнкалар ҳосил қилиш ва уларнинг физик хоссаларини ўрганиш бўйича олиб борилаётган изланишлар ҳисобланади. Бу соҳада олиб борилаётган тадқиқот ишлари натижалари янги наноматериаллар, наностузилмалар яратилиши ва улар асосида янги авлод қурилмалари ва асбоблари ишлаб чиқарилишининг асосий омили ҳисобланади.

Яримўтказгичли силицидлар дунёнинг энг йирик илмий марказлари тадқиқот объектига айланган ва юқори термик стабиллик, кимёвий чидамлилик ҳамда кремний билан технологик мосликка эга бўлганлиги учун улардан термоэлектрик материаллар сифатида фойдаланиш мумкинлиги кўрсатилган. Силицидлар асосидаги қурилмаларнинг ишлаши юпқа наноўлчамли плёнкаларда электронлар, фотонлар ва ток ўтиши таъсирида кузатиладиган электрон жараёнларга боғланган, шунинг учун наноўлчамли Ва ва ишқор элементлари силицид плёнкаларини ҳосил қилиш технологиясини яратиш, тузилиши, хоссаларини аниқлаш, улар асосида термоэлектрик ўзгартиргичлар ва бошқа функционал электроника асбобларини яратиш, физик электрониканинг **долзарб** муаммоларидан ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикасида металл силицид плёнкаларни ҳосил қилиш ва хоссаларини ўрганиш соҳасида муайян натижаларга эришилган, жумладан: ТДТУ университетида $CaSi_2$, Mg_2Si_3 наноплёнкалари ва нанокристаллари олинган, уларнинг электрон тузилиши, оптик хусусиятлари ўрганилган; Ион-плазма ва лазер технологиялари институтида кремнийнинг нанокукунлари олинган, уларнинг ўлчамлари ва тузилиши ўрганилган. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантиришнинг Ҳаракатлар стратегиясига мувофиқ замонавий илм-фан ютуқларини амалиётга тадбиқ этиш ва шу аснода миллий маҳсулотларимизнинг ички ва ташқи бозорлардаги рақобатбардошлилигини таъминлашга алоҳида аҳамият қаратилмоқда. Бу борада металл силицид плёнкаларнинг электрофизик хоссаларини ўрганиш асбобсозлик сохасида, асбоблар учун янги материаллар яратилишига олиб келади. Жумладан, функционал электроника элементларини яратиш, импорт ўрнини босиш масаласи муҳим вазифалардан бири ҳисобланади.

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

фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланиши устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялари ривожланишининг III. «Энергетика, энергоресурс тежамкорлиги, транспорт, машина ва асбобсозлик, замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника ва электрон асбобсозлиги ривожланиши» ва II. «Физика, астрономия, энергетика ва машинасозлик» устувор йўналишларига мувофиқ бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Ўтган асрнинг ўрталарида яримўтказгичли электроника яралиши билан ионли легирлашнинг яримўтказгичлар электрофизик хоссаларига таъсирини ўрганиш, *p-n-* ўтишлар ҳосил қилиш, диод, транзистор структураларга бағишланган илмий изланишлар сони кескин ошиб борди. Бу йўналишда хорижлик олимлар Ж.Майер, Лю Эриксон, Ж.Дэвис, Х.Рассел, И.Руге изланишлар олиб боришди. Россиялик олимлар Е.И.Зорин, П.В.Павлов, Д.И.Тетельбаум, А.Ф.Хохлов ҳамда мамлакатимиз олимларидан В.П.Чирва, Б.М.Абдураҳмонов ва бошқалар аҳамиятли натижаларни қўлга киритди.

Хозирги вақтда кремний юзасида юпқа плёнка структурали асбобларни яратиш йўналиши кескин ривожланмоқда. Айтиш мумкинки, «плёнка–таглик» системаси учун материалларни танлашда кристалл панжара параметрлари ва температуравий кенгайиш коэффицентлари яқин бўлган материаллардан фойдаланишга катта аҳамият қаратилмоқда. Бунда, биринчидан, Si, $CoSi_2$, CaF_2 структуралар мослиги сабабли улар асосида кўп қатламли системалар яратиб, асбобли структуралар ҳосил қилиш мумкин; иккинчидан, ишқорли металлар фторидлари ва кобальт силицидларнинг физик хоссалари улар асосида ажойиб техник характерга эга асбоблар яратиш имконини беради. Адабиётларда Ca_3Si_4, CaSi, MnSi, Mn_3Si_4, $CrSi_2$, $ReSi_{1,75}$, Ru_2Si_3, CoSi, $CoSi_2$ силицидларни олиш ва уларнинг хоссалари тўғрисида маълумотлар келтирилган. Бундай монокристалл силицид плёнкаларни ҳосил қилишга бўлган қизиқиш уларнинг яхши транспорт хоссалари билан юқори термоэлектрик самарадорлигига боғлиқ. Si(111), Si(100) юзаларидаги CoSi ва $CoSi_2$ силицид плёнкалари кристаллографик ва иссиқлик характери мослиги сабабли дунё олимлари эътиборини тортмоқда, лекин Ва ва ишқор элементлар силицидларини ўрганишга бағишланган илмий изланишлар адабиётларда кам ёритилган. М.Нормуродов, А.Қосимов, А.Рисбаев, Б.Умирзаков, А.Ташатовлар томонидан Ва ҳамда ишқор элементлари ионли имплантациясининг Si, GaAs каби яримўтказгичлар эмиссион ва бошқа хоссаларига таъсири ўрганилган, лекин Ва ҳамда ишқор элементларини юпқа силицид плёнкаларда ҳосил қилиш технологияси деярли ўрганилмаган.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Тошкент давлат техника университетининг Ф–2–31-сон «Наноўлчамли металлар силицид плёнкалари структураси ва физик

хоссаларини ўрганиш ҳамда термосезгир структуралар ҳосил қилиш (2012–2016)» ва ОТ–А3–56-сон «Олий марганец силициди пардаси асосида инфрақизил нурни термоэлектрик ўзгартириш ва иссиқлик нурини ўтаэффектив ҳолда совитилмай қайд этувчи приёмниклар яратиш (2017–2018)» лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади Si монокристаллига кичик энергияда ва катта дозаларда ионлар имплантацияси ва кейинги термик ишлов бериш орқали юпқа наноўлчамли силицид металл плёнкаларни ҳосил қилиш, уларнинг таркиби, электрофизик хусусиятларини комплекс аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

кремний кристалларига вакуумдан ташқари, юқори вакуум шароитида ишлов бериш ва яримўтказгичли кристаллар юзасини тозалаш учун янги усул ишлаб чиқиш;

Li^+, K^+, Na^+, Rb^+, Cs^+, Ba^+ ионларини 0,5÷5 кэВ энергия билан имплантациясини Si юза қатламларининг элементли ва кимёвий таркибига, кристалл ва электрон тузилишига таъсирини ўрганиш;

юқори сезгир расторли электрон микроскопия (РЭМ) ва кичик энергияли электронлар дифракцияси (КЭЭД) усуллари билан Ва ва ишқор элементлар имплантацияси ҳамда кейинги термик қиздириш таъсирида Si(111) ва Si(100) юза ҳолатлари ўзгаришини ўрганиш;

Li, K, Na, Rb, Cs, Ва юпқа монокристалл силицид плёнкаларни ҳосил қилишда ионли имплантация ва кейинги термик қиздиришларнинг оптимал технологик шартларини аниқлаш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида солиштирма қаршилиги ρ=100÷3000 Ом·см бўлган Ва ва ишқор элементлари ионлари имплантация қилинган *p*- ва *n*- типли Si(111), Si(100) монокристалларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг предмети Si(111) ва Si(100) монокристаллари юзасида Ва ва ишқор элементларини ионли имплантация қилиш орқали наноўлчамли силицид пленкаларнинг шаклланиш механизмлари ва физик хоссаларини аниқлаш ҳисобланади.

Тадқиқотнинг усуллари. Диссертацияда кичик энергияли электронлар дифракцияси (КЭЭД), оже-электрон спектроскопия (ОЭС), характерли энергиясини йўқотган электронлар спектроскопия (ҲЭЙЭС), фотоэлектрон спектроскопия (ФЭС), расторли электрон микроскопия (РЭМ) каби тадқиқот усуллари қўлланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

кремний монокристалларининг юза қатламларига кичик энергияли (E_0=0,5÷5 кэВ) актив металл ионлари катта доза ($\geq 10^{16}$ $см^{-2}$) билан имплантация қилиш ва кейинги қисқа муддатли (1÷2 минут) T=1550 K температурада қиздиришга асосланган кремний юзасини юқори даражада тозалаш имконини берувчи усул ишлаб чиқилган;

кремний юза қатламларининг таркибига ва кристалл тузилишига кичик энергияли (0,5÷5 кэВ) Li^+, K^+, Na^+, Rb^+, Cs^+, Ba^+ ионлари имплантациясининг таъсири аниқланган;

Li, K, Na, Rb, Cs, Ba юпқа монокристалл силицид плёнкаларни ионли имплантация қилиш ва кейинги қиздириб тоблаш усули билан ҳосил қилишнинг оптимал технологик режимлари аниқланган;

силицид плёнкалар хусусиятларининг айниган яримўтказгичларга ўхшашлиги ҳамда электр ўтказувчанлигининг ҳароратга чизиқли боғлиқлиги кўрсатилган;

p- типли Si(111) монокристаллига 1,5 кэВ энергияда 10^{16}см$^{-2}$ доза билан B^+ ионларининг киритилиши Na атомларининг максимал кириш чуқурлигини 30% га камайтириши ва чегаравий ўтиш қатлами кенглигининг легирланишдан кейин ҳам, кейинги қиздирганда ҳам камайиши аниқланган;

юқори сезгирликка эга растрли электрон микроскопия усули билан кремнийда 10^{15} см$^{-2}$ доза билан Rb^+ ионларини имплантация қилиб, кейинги 600 К да қиздиргандан сўнг 10÷30 нм ўлчамли RbSi оролчаларга айланиши кўрсатилган, доза ошиши билан бу оролчалар йирик монокристалл оролчаларга айланиши ва дозани $6\cdot10^{16}$ см$^{-2}$ га ошириб ҳамда T=900 К гача қиздирилганда оролчалар чегараларининг бир-бирига қўшилиб яхлит рубидий силициди плёнкасининг ҳосил бўлиши аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

яратилган яримўтказгичлар юзаларини тозалаш янги усули Si, GaAs ва бошқа яримўтказгич монокристалларининг тоза юзаларини олишда ҳам илмий тадқиқотларда ҳам ишлаб чиқариш технологик цикларда қўлланилиши мумкин;

RbSi–Si, LiSi–Si, NaSi–Si гетероструктурали ўтишларни диодли структураларда *p-n*- ўтишлар сифатида, BaSi–Si гетероструктурали ўтишни яримўтказгичларга контакт сифатида қўллаш мумкинлиги кўрсатилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги ишда қўлланилган ёндашув ва усуллар, назарий маълумотларнинг олинган тажриба натижалари билан мос келиши, замонавий юқори сезгирликка эга диагностик усуллардан фойдаланилганлиги, тадқиқот жараёнида ишлаб чиқилган кремний юзасини тозалашнинг янги усули қўлланилиши, тажрибаларнинг ўта юқори вакуум шароитида ўтказилганлиги, таклиф ва тавсияларнинг амалиётга жорий этилганлиги, олинган маълумотларнинг статистик таҳлил қилинганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти олиб борилган тадқиқотлар юпқа наноўлчамли силицид плёнкалар ҳосил қилиш механизмлари ва физик хоссалари тўғрисидаги тушунчаларнинг кенгайишига имкон беради.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти тадқиқот жараёнида ишлаб чиқилган яримўтказгичлар юзаларини вакуумда тозалашнинг янги усули тоза Si монокристаллини олишда ва улар асосида таёрланган электрон асбобларнинг сифатини оширишда қўлланилиши мумкинлиги билан изоҳланади. Олинган силицид плёнкалари кичик қаршиликга эга контакт, самарали термоэлектрик хоссаларга эга материал сифатида термогенератор, термобатареялар, иссиқлик нурланишини қабул қилгичлар, турли датчиклар

ва катта тезликда ишлайдиган микро- ва наноэлектрон асбобларнинг функционал элементлари сифатида ишлатилиши мумкин.

Тадқиқот натижаларининг амалиётга жорий қилиниши. Наноўлчамли металл силицид плёнкалар олиш ва уларнинг физик хоссаларини ўрганиш асосида:

кремний монокристалли юзасини тозалаш усули Россия Фанлар Академияси «Кристаллография ва фотоника» Федерал илмий-тадқиқот марказининг электронография лабораториясида Si(111) ва Si(100) монокристалларнинг атомли тоза ва юқори сифатли кристаллографик структурага эга юзасини олишда фойдаланилган (2018 йил 15 январдаги Россия Фанлар академияси №11205-4201-БВ сонли маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш термоэлектрик материалларнинг параметрларини яхшилаш имконини берган;

кремний монокристаллининг юзасига ион имплантация қилиш ва кейинчалик термик қиздиришдан иборат янги тозалаш усули ва наноўлчамли металл силицид плёнкалар ҳосил қилиш технологияси Ф2–41 рақамли «Турли табиатли материаллар (металлар, яримўтказгичлар ва диэлектриклар)да ионлар имплантациясидаги кучланган қатламлар ва наноўлчамли тузилишлар ҳосил бўлиши, атомларни киритиш, сочилиш жараёларини назарий ва экспериментал тадқиқ қилиш» фундаментал лойиҳасида электрон оже спектроскопия усули билан юзани қатлам ва қатлам Ar^+ ионлар билан чанглатиш ёрдамида атомларнинг чуқурлик бўйича концентрацион тақсимотини олишда қўлланилган (Ўзбекистон Республикаси Фан ва технологиялар агентлигининг 04.12.2017 йилдаги ФТА–02–11/1246-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш атомларнинг чуқурлик бўйича тақсимотларини олиш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари 14 та халқаро ва 4 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича 25 та илмий иш, 1 та монография, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 6 та мақола нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, адабиётлар рўйхати, 40 та расм ва 5 та жадвалдан иборат. Диссертация матни 112 бетда келтирилган.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурияти асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, объект ва предметлари тавсифланган, Республика фан ва технологиялар ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, диссертация мавзуси бўйича амалга оширилган ишлар баҳоланган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация ҳажми ва тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг **«Металл силицид плёнкаларнинг структураси ва хоссалари тадқиқ этиш бўйича адабиётлар шарҳи»** деб номланган биринчи бобида кремний монокристалли юзасини вакуумда тозалаш усуллари, энг тоза кремний юзасига тегишли янги структуралар, монокристалл кремнийнинг структура ва электр хоссаларига ишқорий металл ионлари имплантациясининг таъсири, силицид плёнка ҳосил қилиш усуллари, уларнинг транспорт, термоэлектрик хоссаларини ўрганиш ва яримўтказгич силицидларни термоэлектрик ҳодисаларда амалий қўллаш бўйича адабиётлар маълумотлари берилган. Адабиётларда Ca_3Si_4, CaSi, MnSi, Mn_3Si_4, $CrSi_2$, $ReSi_{1,75}$, Ru_2Si_3, CoSi, $CoSi_2$ силицидларини олиш усуллари ва электрик хоссалари тўғрисида кўплаб экспериментал маълумотлар келтирилган бўлсада, Ва ҳамда ишқор элементлари силицидларини олиш ва уларни ўрганиш ҳақида адабиётларда деярли маълумот келтирилмаган. Боб якунида адабиётлар таҳлилидан келиб чиқадиган хулосалар келтирилган.

Диссертациянинг «**Эксперимент техникаси ва методикаси**» деб номланган иккинчи бобида шиша ва металл экспериментал қурилмалар, қаттиқ жисм юзасига ишлов бериш методикаси ва диагностикаси ёритилган. Экспериментал қурилмаларда қуйидаги диагностик усуллар асосида тадқиқот ишлари олиб борилган: кичик энергияли электронлар дифракцияси (КЭЭД), оже-электрон спектроскопияси (ОЭС), эластик қайтган электронлар спектроскопияси (ЭҚЭС), характерли энергиясини йўқотган электронлар спектроскопияси (ХЭЙЭС), фотоэлектрон спектроскопия (ФЭС), растрли электрон микроскопия (РЭМ). Тажрибалар 10^{-7} Па вакуумда сферик геометрияга эга секинлаштирувчи майдонли анализаторли қурилмада, Франциянинг Riber фирмасида таёрланган LASS–2200 қурилмаси ва Голландиянинг FEI фирмасида ишлаб чиқарилган Titan 80–300 TEM/STEM юқори сезувчан растрли электрон микроскопида бажарилди. Кремний монокристалли юзаси ионли чанглатиш ва термик қиздириш йўли билан тозаланди. Термик қиздириш 2 босқичда: узоқ вақт давомида (1 соат) 1000 К, кейин қисқа вақт давомида (1 минут) 1500 К ҳароратда, тадқиқот жараёнида ишлаб чиқилган янги тозалаш усули ёрдамида амалга оширилди. Янги тозалаш усули кремнийнинг юза қисмида Ва ёки ишқор элементлари ионларини кичик энергия (0,5÷1 кэВ гача) ва катта дозаларда (10^{16}÷10^{17}см$^{-2}$) имплантация йўли билан гетерли қатлам ҳосил қилиш, кейинги 1550 К да қиздириш йўли билан Si монокристалли юзасини O_2, C, S, Na ва бошқа

аралашма атомлардан тозалашдан иборат. Аралашма атомлари ва кремний атомлари киритилган ишқорий металл атомлари билан кимёвий боғланиш ҳосил қилиб, юқори температура таъсирида буғланиб кетади. Имплантация қилинаётган ионлар энергияси 0,5 дан 5 кэВ гача, дозаси 10^{13} дан $2\cdot10^{17}$см$^{-2}$ гача ўзгартирилди. Ион токининг зичлиги10^{-7}дан 10^{-5}А·см$^{-2}$ гача оралиқда ўзгартирилди.

Намуналар юзасининг кристалл тузилиши кичик энергияли электронлар дифракцияси (КЭЭД) ва юқори сезувчан растрли электрон микроскопия (РЭМ) усули билан ўрганилди. Ушбу бобда КЭЭД усулининг физик асослари, ҳосил бўлишининг электр схемаси ҳамда олинган дифракцион расмлар таҳлили бўйича маълумотлар келтирилган.

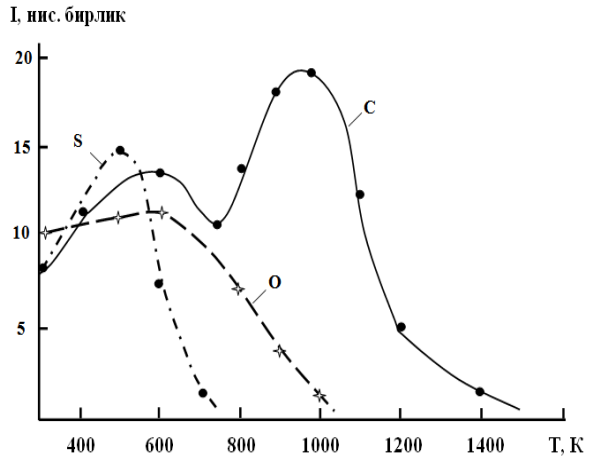
Намуналарнинг юза қатламлари элемент ва кимёвий таркиби ОЭС усулида аниқланди. Кремний юзасининг чиқиш иши контакт потенциаллар фарқи усули билан аниқланди. ОЭС усулининг сезувчанлиги 10^{11}ат.·см$^{-2}$, бирламчи электронлар энергиясининг сочилиши 0,1 эВ га тенг. Мазкур ишда қўлланилган диагностик усулларнинг хатоликлари таҳлил қилинган.

Диссертациянинг «**Яримўтказгичли кристалл юзаларни тозалашнинг янги усулини ишлаб чиқиш**» деб номланган учинчи бобида Si ва GaAs монокристалларининг вакуумли тозалаш давомида элемент таркиби, кристаллик тузилиши экспериментал таҳлил қилинган. Замонавий технологиялар асосида электрон асбоблар ишлаб чиқарилганда кремний юзасининг юқори даражада тоза бўлиши талаб этилади, чунки «силицид – кремний» ўтиш қатламининг ҳолати ва қалинлиги улар асосида ҳосил қилинган асбобларнинг характеристикасига кучли таъсир кўрсатади. Шунинг учун кремний юзасини тозалашнинг янги усули ишлаб чиқилди. Айтиш мумкинки, кристалларни тозалаш усуллари ичида энг соддаси ўта юқори вакуум шароитида юқори температурали қиздириш ҳисобланади. Кристалл юзаларининг ифлосланишига қуйидаги омиллар сабаб бўлади: атроф-муҳит ёки кристаллга дастлабки ишлов бериш жараёнидаги муҳит ва кристаллнинг ўзи, чунки унинг ҳажмидан аралашма атомларнинг диффузия йўли билан юза қисмларида жойлашиши мумкин.

1-расмда Si(111) юзасидаги (C, O, S, Na) аралашма атомларининг оже-пик интенсивлиги, кремнийнинг юқори вакуумда қиздириш температурасига боғланиши кўрсатилган. Кўриниб турибдики, килород (O) ва углерод (C) атомлари асосий аралашма атомлари ҳисобланади. Кремнийни O дан тозалаш учун 1030 К, углероддан тозалаш учун 1420 К температура талаб этилади.

Яримўтказгичли кристалларнинг юзаларини тозалашда кузатилган юзавий атом структуралар 1-жадвалда келтирилган.

Ўтказилган тажрибалар натижасига кўра кристалл юзасини эриш температурасидан паст температураларда қиздириб тозалаш аралашма атомларининг намуна ҳажмида қайта тақсимланишига олиб келади, улар намуна юзасига чиқиб мустаҳкам боғланишлар ҳосил қилиши мумкин.



S (150 эВ), C (272 эВ), O (508 эВ)

1-расм. Si(111) юзасидаги (C, O, S) аралашма атомларининг оже-пик интенсивлиги, кремнийнинг юқори вакуумда қиздириш температурасига боғланиши: S (150 эВ), C (272 эВ)ва O (508 эВ)

1-жадвал

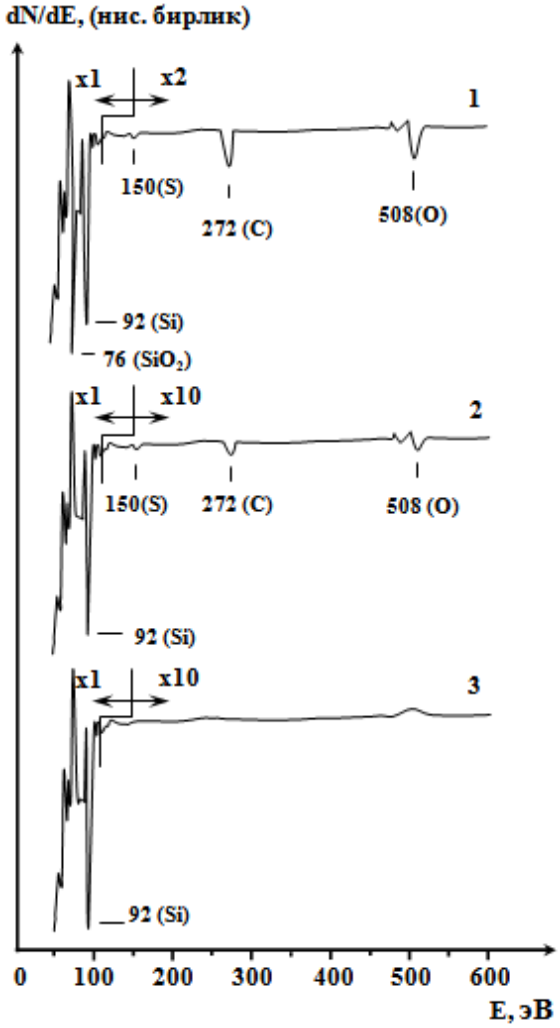
Яримўтказгичли кристалларнинг юзаларини тозалашда кузатилган юзавий атом структуралар

Si(100)	(1x1)	900 K да термик тозалаш	InP (100)	(1x1)	Вакуумда 800 K да қиздириш
	(2x2)	Вакуумда икки босқичли юқори температурали тозалаш: узоқ вақт 1000 K ва қисқа вақт 1500 K			Ионли чанглатиш, 700 K да қиздириш
Si(100)	(2x1)	Вакуумда скол		(1x4)	Ионли чанглатиш, 700 K да қиздириш ва тез совитиш
Si(111)	(2x1)	Вакуумда скол	GaAs (110)	(1x1)	Вакуумда раскол
Si(111)	(7x7)	Юқори вакуум шароитида икки босқичда қиздириш: узоқ муддат 1000 K ва қисқа вақт 1500 K	GaAs (111)	(1x1)	Вакуумда 600 K да қиздириш
GaAs(100) ва $Ga_{1-x}In_xAs$	(1x1)	600 K да паст температурали қиздириш			Ионли чанглатиш, 500 K да қиздириш
	(8x2)	Вакуумда 900 K да қиздириш		(2x2)	Вакуумда 800 K да қиздириш

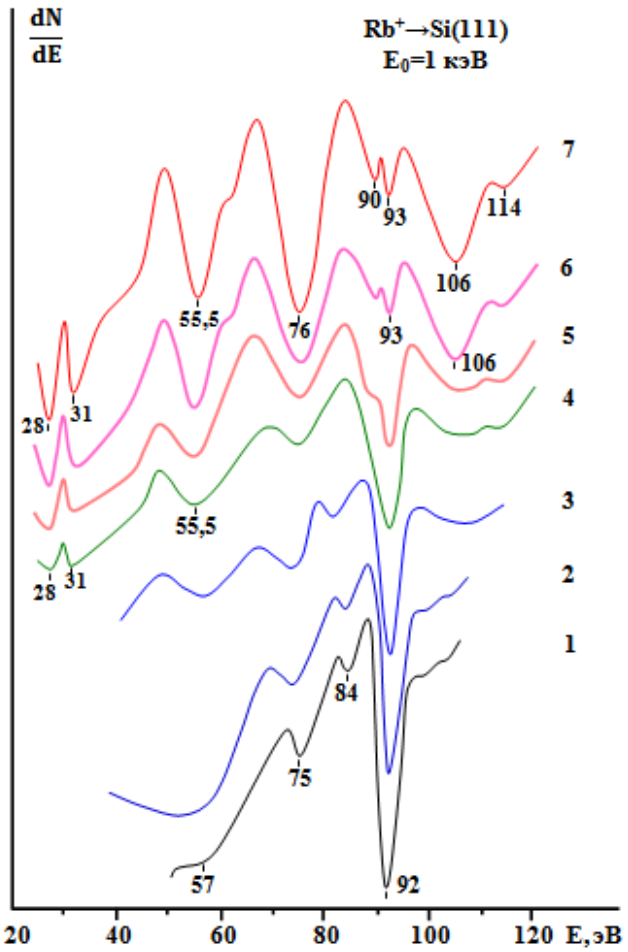
Ионли чанглатиш самарали тозалаш усули ҳисобланади, аммо кристалл юзасининг бузилишига олиб келади, шунинг учун яримўтказгич кристаллар юзасини тозалашнинг янги усули ишлаб чиқиш ушбу тадқиқотнинг асосий мақсади ҳисобланади.

Қўйилган мақсад қуйидагича ечилади, дастлабки икки босқичли термик қиздириш йўли билан тозаланган Si(111) ва Si(100) юза қатламларида Ва ва ишқор элементлари ионлари билан, энергияси 0,5÷1 кэВ ва $D \approx 10^{16} \div 10^{17}$ см$^{-2}$ дозада имплантация қилиниб гетерли қатлам ҳосил қилинади. Гетерли

қатламдаги юқори концентрацияли Ва ва ишқор элементлари кремний ҳамда бошқа аралашма атомлари (O, Na, S, C) билан кимёвий боғланиб, 1550 К температурада 1÷2 дақиқа қиздирилганда кремнийнинг юза қатламларида буғланиб кетади.



2-расм. Si(111) юзаси учун оже-спектрлар берилган. (1-спектр)да термик ишлов берилмаган Si(111) юзаси учун оже-спектр берилган; (2-спектр)да икки босқичда, узоқ вақт (1 соат) 1000 К ва қисқа (0,5÷1 дақиқа) вақт давомида 1500 К да қиздирилган кремний юзаси учун ва (3-спектр)да Ba^+ ионлари билан E_0=1 кэВ энергия билан D=10^{17} $см^{-2}$ дозада имплантация қилинган ва 1550 К да қиздирилган кремний юзаси учун оже-спектрлар берилган



D, $см^{-2}$: 0-спектр 1; $5\cdot10^{13}$ -2; $5\cdot10^{14}$ -3; $5\cdot10^{15}$ -4; 10^{16} -5; $8\cdot10^{16}$ -6; $2\cdot10^{17}$ -7

3-расм. Кремнийга Rb^+ ионлари E_0=1 кэВ энергияда ва турли дозаларда киритилганда оже-спектрларнинг ўзгариши келтирилган

2-расмда термик ишлов берилмаган Si(111) юзаси учун оже-спектр (1-спектр) берилган; (2-спектрда) 10^{-7} Па вакуум шароитида икки босқичда, узоқ (1 соат) 1000 К ва қисқа (0,5÷1 дақиқа) вақт давомида 1500 К да қиздирилган кремний юзаси учун ва (3-спектрда) биз таклиф қилган усул билан тозаланган кремний юзаси учун оже-спектрлар берилган.

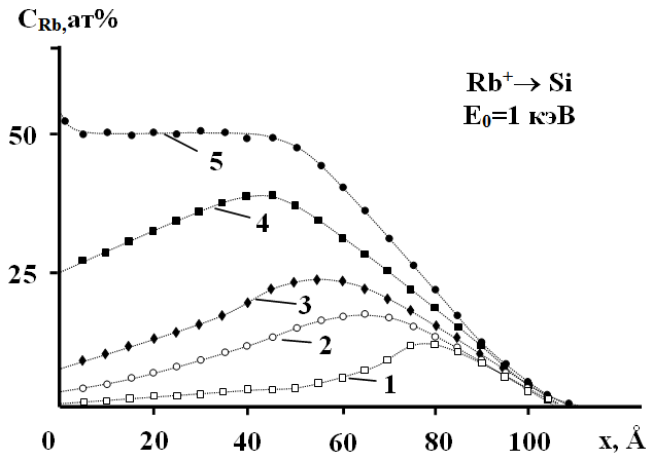
Тадқиқот жараёнида таклиф этилган тозалаш усули дастлабки икки босқичда термик тозаланган кремнийга Ва ёки ишқор элементлари ионлари E_0=1 кэВ энергияда ва $10^{16}\div10^{17}$ $см^{-2}$ дозада имплантация қилиниб, кейинчалик 1550 К да 1÷2 дақиқа давомида қиздиришдан иборат. 3-спектрдан кўриш мумкинки, таклиф қилинган тозалаш усули кремний юзасидаги барча аралашма атомлари йўқолишига олиб келади. Ва ва ишқор элементларини 0,5÷5 кэВ энергия билан имплантация қилиш давомида Si(111) ва Si(100) намуналарнинг юза кристалл тузилиши ўрганилганда қуйидаги фактлар аниқланди: ионлар дозаси оширилиб борилганда маълум бир дозадан бошлаб кремний юзаси тўлиқ аморфлашади, бундан ташқари кремнийнинг аморфлашиш дозаси ионларнинг энергияси ошиши билан камаяди. 3-расмда (1-спектр) тоза кремний учун (2–7-спектр)ларда кремнийга турли дозада Rb^+ ионлари билан имплантация қилинган оже-спектрлар келтирилган. Расмдан кўриниш мумкинки, Rb^+ ионлари $D\leq5\cdot10^{13}$ $см^{-2}$ дозадан кичик дозада имплантация қилиниши $Si_{L_{2,3}VV}$ 92 эВ даги оже-пик интенсивлиги камайишига олиб келади, лекин имплантация қилинган ионларнинг оже-пиклари кўринмайди. Бу эса ионлар кичик доза билан имплантация қилинганда намунанинг чуқур қатламларига кириб кичик энергияли оже-электронлар чиқиш зонасидан анча катта чуқурликда жойлашишини билдиради. Кейинчалик ионлар дозаси оширилганда E=55,5 эВ $M_5N_1N_{2,3}$ оже-ўтиш билан боғланган Rb пики ҳосил бўлиши кузатилади, $Si_{L_{2,3}VV}$ кремнийнинг пики кескин кичраяди. Ионлар дозаси $4\cdot10^{15}$ $см^{-2}$ дан бошлаб $Si_{L_{2,3}VV}$ пик шакли ўзгаради, E=93 эВ да кичкина пик ажрала бошлайди. Rb^+ ионларнинг дозаси яна ҳам оширилганда $Si_{L_{2,3}VV}$ пик синглент шаклдан дуплет шаклига ўтади. $Si_{L_{2,3}VV}$ оже-пик шаклининг бундай ўзгариши кремнийнинг sp^3-электронлари билан рубидийнинг s ва d электронлари ўзаро таъсирлашиб, кимёвий боғланиш ҳосил қилишини билдиради. Намунада ҳосил бўлган кимёвий боғланиш тури ва миқдорий, кимёвий таркибини аниқлаш учун намуналарнинг ионли емирилиш давомида ОЭС усули билан ўрганилди.

Ион имплантация қилинган кремнийда атомларнинг концентрацияси қуйидаги формула орқали ҳисобланади:

$$C_X = \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{N_i^0 \cdot I_i \cdot S_X \cdot \lambda_i^0 \cdot (1+r_i^0)}{N_X^0 \cdot I_X \cdot S_i \cdot \lambda_X^0 \cdot (1+r_X^0)} \right)^{-1} \qquad (1)$$

бу ерда S_x ва S_i – номаълум ва маълум концентрацияга эга бўлган элементларнинг оже сезгирлик коэффициентлари. N – атом зичлиги, r – қайтиш коэффициенти, λ – оже-электронларнинг чиқиш чуқурлиги.

Элементли оже сезгирлилик коэффициентларини ҳисоблаш мавжуд бўлган формулалар ёрдамида ва Si юзасига металл плёнкаларни ўстириш давомида экспериментал даражалаш, графиклар чизиш орқали аниқланади.
4-расмда ион имплантация қилинган кремнийдаги Rb атомларининг чуқурлик бўйича концентрацион профиллари келтирилган. Шунга ўхшаш



D, см$^{-2}$: $1\cdot10^{13}$ (1-эгри чизиқ); $1\cdot10^{14}$ (2); $1\cdot10^{15}$ (3); $5\cdot10^{15}$ (4), $1\cdot10^{16}$ (5) ва $6\cdot10^{16}$ (6)

4-расм. E_0=1 кэВ энергия билан турли дозада имплантация қилинган Rb, атомларнинг Si(111)да чуқурлик бўйича тақсимланиши

натижалар кремнийга ишқор элементлар ионлари киритилганда ҳам олинган. Бунда оже-спектрларда катта дозали ионлар киритилганда 90÷97 эВ чегарасида дуплет оже пики ҳосил бўлиши аниқланди. Шундай қилиб, олинган экспериментал ОЭС натижалари ва КЭЭД расмларида ҳосил бўлган янги структуралар қуйидагича хулоса қилишга асос бўлди: Ва ва ишқор элементларини катта дозада >10^{16} см$^{-2}$ ва кейинги қисқа вақт ичида термик қиздириш кремнийнинг юза қатламларида юпқа наноўлчамли силицид плёнкалар ҳосил бўлишига олиб келади.

Si(111) ва Si(100) энергияси E_0=0,5÷5 кэВ Ba^+ ва ишқор элементлар ионларини киритиш вақтида, юзани кристаллик структурасини КЭЭД усули билан кузатиш давомида маълум бир дозадан D_a бошлаб кремний юзаси тўла аморфланиши аниқланди. Берилган ионлар тури учун D_a критик дозанинг қиймати ионлар энергияси ошиши билан камайиши кузатилди. 2-жадвалда турли энергия билан Li^+, Na^+, K^+, Rb^+, Cs^+ ва Ba^+ ионлари имплантация қилинган Si(111) юзасининг аморфлашиш дозаси келтирилган.

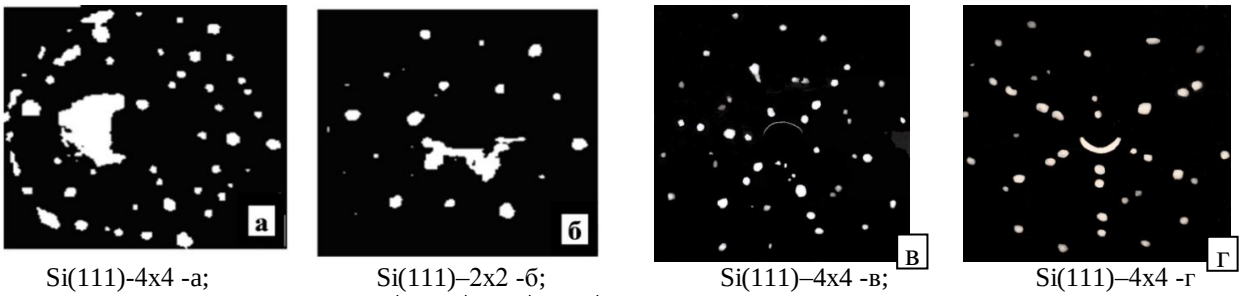
2-жадвал.

Si(111) ва Si(100) юзалари аморфлашиш дозасининг минимал қийматлари

Ионлар энергияси E_0, эВ	Si(111) ва Si(100) кристалларининг аморфлашиш дозалари, D_a, x10^{15} см$^{-2}$					
	Li^+	Na^+	K^+	Rb^+	Cs^+	Ba^+
500	10/ 12	7 / 9	6 / 8	6 / 8	4 / 6	4 / 5
1000	7 / 8	5 / 7	5 / 7	5 / 7	2 / 4	1 / 3
2000	5 / 7	3 / 5	3 / 4	4 / 3	1 / 2	0,7 / 1
3000	3 / 5	1 / 3	0,8 / 2	0,7 / 1	0,6 / 1	0,6 / 0,9
4000	1 / 1,5	0,8 / 1,2	0,9 / 1,2	0,5 / 0,8	0,4 / 0,5	0,3 / 0,6
5000	0,5 / 1	0,3 / 0,6	0,2 / 0,4	0,1 / 0,2	0,09/0,1	0,08/0,1

2-жадвалдан кўриниб турибдики, енгил ионлар учун минимал аморфлашиш дозаси D_a оғир ионларга нисбатан каттароқ қийматларга эга ҳамда барча ионлар учун Si(100) нинг аморфлашиш дозаси Si(111) дан каттароқ бўлади. Бунда, биринчидан, Si юзаси оғир ионлар билан имплантация қилинганда нуқсонлар ҳосил бўлиш самарадорлиги ошади, чунки ионларнинг Si атомлари билан тўқнашиши жараёнида атомларга каттароқ энергия берилади; иккинчидан, кремнийнинг (100) йўналишида (111) йўналишига нисбатан атомларнинг жойлашиш зичлиги анча кичик бўлади.

Диссертациянинг «**Кичик энергияли ионлар имплантацияси усули билан Si(111) ва Si(100) юзасида наноўлчамли силицид плёнкаларни ҳосил қилиш**» деб номланган тўртинчи бобида кичик энергияли ва катта дозали Ва ҳамда ишқор элементлар Si(111) ва Si(100) намуналарига имплантация қилиб наноўлчамли металл силицид плёнкаларни ҳосил бўлиш жараёнини ўрганишда олинган натижалар келтирилган. Ишқор элементлари (Li, Na, K, Rb ва Cs) билан имплантация қилинган Si юзасини қиздириш таъсирида турли юзавий структуралар ҳосил бўлиши аниқланди. 5-а-г расмларда ионли имплантация қилиниб, кейинчалик 600, 800, 500, 900 К да қиздирилгандан кейин ҳосил бўлган қуйидаги структуралар кўрсатилган: Si(111)-4x4Li -а, Si(111)-2x2Rb -б, Si(111)-4x4Cs -в, Si(111)-4x4Na -г;



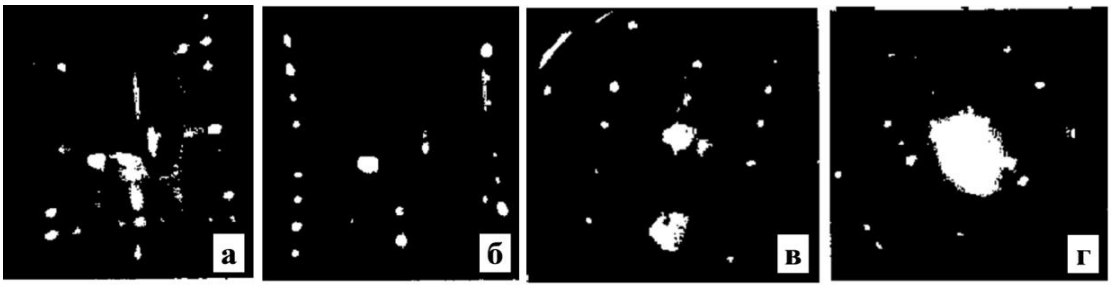
Si(111)-4x4 -а; Si(111)–2x2 -б; Si(111)–4x4 -в; Si(111)–4x4 -г

5-расм. Si(111) юзасига Li^+, Rb^+, Cs^+, Na^+ ионлари имплантациясидан ҳосил бўлган плёнкаларнинг (КЭЭД) расмлари

Si(111)-4x4Li дифракцион расмда асосий рефлекслардан ташқари иккиламчи рефлекслар, дублетлар ҳам кузатилади. Дублетларнинг пайдо бўлиши кремний юзасида Li плёнкаси домен характерга эга эканлигини билдиради. Иккиламчи ва касрли рефлекслар Si(111)-4x4Cs (КЭЭД) расмида ҳам кузатилади. Бунда қўшимча рефлексларнинг 3 тури кузатилади, улар ҳосил бўлган фаседкаларнинг 3 та юза билан чегараланганлигини билдиради. Бирламчи электронлар энергияси E_p оширилганда (00) ёки икки ўлчамли рефлексдан ҳосил бўлган қўшимча рефлекслар (10) йўналишига силжиши фаседкалар (110) типли юзаларда ҳосил бўлишини билдиради. 6-а-г расмларда 1 кэВ энергияли Na^+, Rb^+, K^+ ва Cs^+ ионлар билан имплантация қилинган Si(100) намуналарни қиздирганда қуйидаги юзавий структуралар ҳосил бўлиши аниқланди: Si(100)-4x4Na -а; Si(100)-2x4Rb -б; Si(100)-2x1K -в; Si(100)-2x8Cs -г. Бундан ташқари Si(100)-2x2Ba; Si(100)-1x1Ba; Si(100)-2x2Li структуралар ҳам ҳосил бўлиши кузатилди.

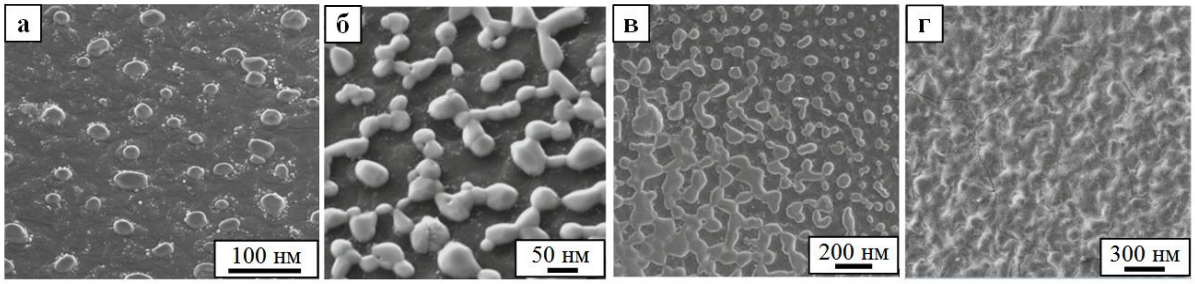
Si юза қатламлари электрон ҳолати таҳлил қилинганда Rb ва ишқор элементлар имплантация қилинганда аморфлашиш дозасидан ошгандан кейин Si ва киритилган аралашма атомлар орасида ионли даста ҳисобидан кимёвий боғланиш ҳосил бўлади, яъни ионлар билан стимуллаштирилган кимёвий синтез жараёни кузатилади, Rb ва ишқор элементлар имплантация давомида кремний юзаси морфологиясини Titan80-300 TEM/STEM микроскопида растор электрон микроскопия усули билан ўрганилди.

7-расмда Rb силицид плёнкани турли даражада ҳосил бўлиш жараёнининг электрон микроскопик тасвирлари кўрсатилган. Rb^+ ионларини 10^{15}см$^{-2}$ доза билан имплантация қилиб кейинги 600 К да қиздирганда кичик алоҳида жойлашган, ўлчами 10÷30 нм гача бўлган силицид рубидий оролчалари ҳосил бўлади (7-а расм).



Na–Si(100)-4x4 -а; Rb–Si(100)-2x4 -б; K–Si(100)-2x1 -в; Cs–Si(100)-2x8 -г.

6-расм. Si(100) юзасида Na^+, Rb^+, K^+, Cs^+ ионлари имплантациясидан ҳосил бўлган плёнкаларнинг (КЭЭД) расмлари



(а, б) – рубидий силицид структураларнинг шаклланиши, (г) – оролчаларнинг қўшилиб силицид плёнкаларнинг ҳосил бўлиши

7-расм. Рубидий силицид плёнкани хар-хил даражада ҳосил бўлиш жараёнининг электрон микроскопик тасвирлари

Ионларнинг дозаси ошиши билан бу оролчалар катталашиб, 30÷100 нм гача ўлчамли овал шаклидаги оролчаларга айланади. Оролчаларнинг аниқ чегарага эга эканлиги уларнинг монокристалл структуралигини билдиради, лекин катта оролчалар орасида чегараланмаган аморф структурага эга бўлган кичик оролчалар ҳам кузатилади. $6\cdot10^{16}$см$^{-2}$ доза билан имплантация қилиниб, 900 К да қиздирилгач, оролчалар бирлашиб, кремний юзасида яхлит силицид Rb плёнкаси шаклланишига олиб келади.

Шунга ўхшаш натижалар кремнийга ишқор элементлар киритилганда ҳам кузатилади. Кремнийга киритилган ионларнинг кимёвий ҳолатини ўрганиш учун ион имплантация қилинган кремний юзаси ОЭС усули билан ўрганилди.

3-жадвалда наноўлчамли силицид плёнкаларни ҳосил қилишда аниқланган оптимал технологик режимлар келтирилган.

3-жадвал

Наноўлчамли Ва ва ишқор элементлар силицид плёнкаларни ҳосил қилишнинг оптимал режимлари

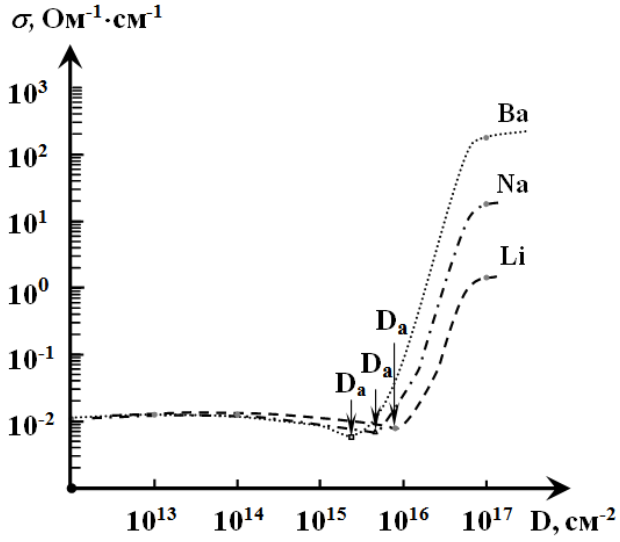
Силицид турлари / Параметрлари	LiSi	NaSi	KSi	RbSi	CsSi	BaSi
Si	111	100 111	100	100 111	100 111	100 111
Ионлар энергияси, кэВ	0,5-5	0,5-5	0,5-5	0,5-5	0,5-5	0,5-5
Температура, К	900-1000	600-700	800-850	800-850	500-600	800-900
Силицид қалинлиги, Å	50-110	45-100	35-95	30-90	40-90	35-85
Юзавий структураси	4x4	4x4 1x1	2x1	2x4 2x2	2x8 2x2	2x2 1x1
Электрон энергияси, E_P, эВ	42	35 43	49	35 42	39 30	38 43
Структуравий қайта тикланиш температураси, К	1400	1100	1200	1200	1000	1300

Эслатма*: ионларнинг дозаси $D>10^{16}$см$^{-2}$ дан катта бўлган.

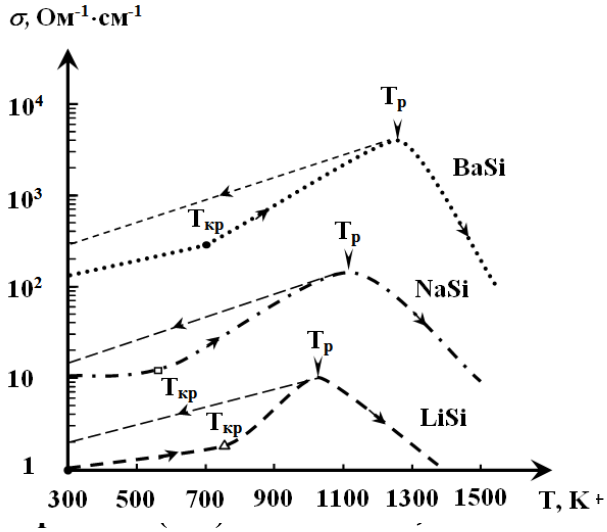
Ион имплантация қилиб кейинчалик қиздириш натижасида Si юза қатламларида қуйидаги силицид плёнкалар LiSi, KSi, RbSi, CsSi, NaSi и BaSi ҳосил бўлади. Ҳосил бўлган силицид плёнкалар қалинлиги экспериментал ўлчанганда қуйидагилар маълум бўлди: силицид плёнкалар қалинлиги ионлар энергияси ошиши билан ошади ва ионлар энергияси ўзгармаган ҳолда, қалинлиги доза ошиши билан $D^{1/2}$ боғланиш бўйича ошади. Шундай қилиб, бу ишда Ва ва ишқор элементлар силицидлари ҳосил бўлиш кинетикаси ўрганилди. Силицид плёнкаларнинг ҳосил бўлиш оптимал шароитлари ва уларнинг параметрларига таъсир қиладиган асосий факторлар аниқланди. *n*-тип Si(111) юзасининг солиштирма электр ўтказувчанлигига E_0=1 кэВ энергия ва турли доза билан Ва, Na ва Li ионлари имплантацияси таъсири ҳам ўрганилди. Ионлар турига фарқсиз $8\cdot10^{14}$ см$^{-2}$ дозагача имплантацияси кремнийнинг σ солиштирма электр ўтказувчанлигига деярли таъсир қилмайди (8-расм). Бизни фикримизча имплантация бошланганида ионлар катта чуқурликка каналлаш эффекти ёрдамида кириб, юзавий электр ўтказувчанликка ўзининг улушини қўшмайди. Лекин каттароқ дозаларда Si(111) юза қатламлари кучли тартибсизланади ва натижада юзавий электр ўтказувчанликнинг камайишига олиб келади, σ нинг камайиши эса донорли сатҳлар концентрациясини ошириш орқали σ нинг ўсишини компенсациялайди. Бу механизмнинг тўғрилигини 8-расмдаги дозавий боғланишлардан ҳосил бўлган минимумлар исботлайди. Кейинчалик ионлар дозасининг ошиши σ нинг $D=10^{17}$см$^{-2}$ дозагача кескин ошишига олиб келади.

9-расмда Li^+, Na^+ ва Ba^+ 1 кэВ энергия ва $2\cdot10^{17}$ см$^{-2}$ доза билан имплантация қилинган Si(111) юзаси солиштирма электр ўтказувчанлигининг қиздириш температурасига боғлиқлиги келтирилган.

Графикдан ҳам кўриш мумкинки, кристалланиш бошланиш температурасидан $T_{кр}$ солиштирма электр ўтказувчанлиги σ кескин ошиб бошлайди.



8-расм. Si(111) юзасининг солиштирма электр ўтказувчанлиги σ, E_0=1 кэВ энергия билан (Li^+, Na^+ ва Ba^+) ионлари имплантация қилинганда дозасига боғлиқлиги



ионлари билан имплантация қилинган намуналар солиштирма электр ўтказувчанлигининг қиздириш температурасига боғланиш графиги

Натижаларга асосланиб айтиш мумкинки, $T=T_{кр}$ бўлганда LiSi, NaSi, BaSi наноўлчамли плёнкалар ҳосил бўлади.

Температура T_p дан катта бўлганда ($T>T_p$) силицид плёнкалар бузилади ва σ камаяди. Қатлам ва қатлам ости оже-таҳлилларга кўра ионлар энергияси E_0=1 кэВ бўлганда силицид плёнкалар қалинлиги 5÷6 нм (ёки 50÷60 Å) бўлади. Силицид плёнкалар $T_{кр}$ температурадан 300 К хона температурасигача совитилганда уларнинг солиштирма электр ўтказувчанлиги чизиқли камаяди ва бундай ҳодиса айниган яримўтказгичларда кузатилади.

ХУЛОСА

1. Яримўтказгичли кристалл юзаларни тозалаш учун янги усул ишлаб чиқилди. Кремний юза қатламларига Ва ва ишқор элементлар кичик энергия ҳамда катта дозада имплантация қилиниб, гетерли қатлам ҳосил қилинади, Ва ва ишқор элементлар кремний ҳамда аралашма O, C, S атомлари билан кимёвий боғланиб, 1550 К да 1÷2 дақиқа қиздирилганда гетерли қатлам парланиб кетади ва тоза кремний юзасини ҳосил қилади.

2. Тоза кремний юзаси силлиқ микрорельефга эгалиги аниқланди. Ионлар имплантация қилинганда нуқсонлар ҳосил бўлганлиги учун юза рельефи ўзгаради. Кичик дозаларда $D\leq5\cdot10^{14}$ $см^{-2}$ алоҳида молекуляр кластер-комплекслар ҳосил бўлади, доза ошиши билан кластерлар сони ошиб, $D\geq5\cdot10^{15}$ $см^{-2}$ да бирлашиб кремний юзаси тўла аморфлашади. Li^+, Na^+, K^+, Rb^+, Cs^+ ва Ba^+ ионлари хар-хил энергия билан имплантация қилинганда Si(111) ва Si(100) юзалари аморфланишининг критик дозалари аниқланди.

3. Ва ва ишқор элементлар катта доза ($10^{16}\div10^{17}$см$^{-2}$) билан имплантация қилинганда қисман металл силицид боғланишнинг ҳосил бўлишига олиб келиши ва кейинчалик қиздирилганда Li, Na, K, Rb,Cs ва Ва моносилицид плёнкалар ҳосил бўлиши кўрсатилди.

4. $5\cdot10^{15}$ см$^{-2}$ доза билан имплантация қилинганда атомларнинг чуқурлик бўйича тақсимланиши Гаусс тақсимотига яқин бўлиши ва доза ошиши билан тақсимот максимуми юзага силжиши биринчи марта аниқланди. Юқори дозаларда ~ $2\cdot10^{17}$ см$^{-2}$ тақсимот максимуми айнан юзадан бошланади.

5. *p*- типли Si(111) монокристаллига дастлабки B^+ ионларининг киритилиши Na атомларининг максимал кириш чуқурлиги 30% га камайиши ва чегаравий ўтиш қатлам кенглигини лигерланишдан кейин ҳам, кейинчалик қиздирганда ҳам камайиши кўрсатилди.

6. Na^+, Rb^+, Cs^+, Li^+, K^+ ионлари E_0=1 кэВ катта доза билан Si(111)га имплантация қилиниб, кейинчалик қисқа муддатда 600, 800, 500, 900 К қиздирилганда юза қисмда қуйидаги тузилишга эга бўлган: Si(111)-4x4Na, Si(111)-2x2Rb, Si(111)-4x4Cs, Si(111)-4x4Li ва шу ионлар Si(100)га имплантация қилиниб, кейинчалик қисқа вақтга қиздирилганда қуйидаги юза тузилишга эга бўлган: Si(100)-4x4Na, Si(100)-2x4Rb, Si(100)-2x1K, Si(100)-2x8Cs силицид плёнкалар ҳосил бўлиши кўрсатилди.

7. Юқори сезувчан РЭМ усули билан 10^{15} см$^{-2}$ доза билан Rb^+ ионлари имплантация қилинганда кремний юза қатламларида алоҳида кичик рубидий-силицид 10÷30 нм ўлчамли оролчалар ҳосил бўлади. Доза ошиши билан улар ўзаро қўшилиб, ўлчами 30÷100 нм доиравий шаклли монокристалл структурага эга оролчаларга айланиши биринчи марта аниқланди. Доза $6\cdot10^{16}$ см$^{-2}$ ва қиздириш температураси T=900 К бўлганда оролчалар бирлашиб, яхлит рубидий-силицид плёнкасининг ҳосил бўлишига олиб келади.

8. Ва ва ишқор элементлар наноўлчамли силицид плёнкалар ҳосил бўлиши учун оптимал режимлар илк бор аниқланди. Металл-силицид плёнкаларнинг қалинлиги ионлар энергияси ошиши билан чизиқли ортиши ва ўзгармас энергияда доза ошиши билан $D^{1/2}$ қонуният бўйича ортиши кўрсатилди.

9. Ba^+, Na^+ ва Li^+ ионлари E_0=1 кэВ энергия билан D=$8\cdot10^{14}$ см$^{-2}$ дозагача имплантация қилиниши *n*- тип Si(111) юзаси солиштирма электр ўтказувчанлигининг ўзгаришига олиб келмаслиги, ионлар дозасининг яна ҳам ортиши σ нинг кескин ошишига олиб келиши ва (D=10^{17}см$^{-2}$) бўлганда σ нинг қиймати тўйиниши аниқланди.

10. Ион имплантация қилинган намуналарнинг электр ўтказувчанлиги температурага боғланишида σ(T) кескин эгилиши кристаллаш температурасида $T_{кр}$ кузатилиб, BaSi, LiSi, NaSi наноўлчамли силицидлар ҳосил бўлишига мос келади. Силицид плёнкаларнинг электр ўтказувчанлиги температурага уйғонган яримўтказгичларга ўхшаб силицид плёнканинг бузилиш температура T_p=1050÷1250 К гача чизиқли эканлиги аниқланди.

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

ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

БЕКПУЛАТОВ ИЛХОМ РУСТАМОВИЧ

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЁНОК СИЛИЦИДОВ МЕТАЛЛОВ И ИХ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

01.04.04 – Физическая электроника

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

Ташкент – 2018

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за №B2017.2.PhD/FM98.

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете.

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

Научный руководитель:	**Рисбаев Абдурашит Сарбаевич** доктор физико-математических наук
Официальные оппоненты:	**Ашуров Хотам Бахронович** доктор технических наук, с.н.с.
	Эгамбердиев Бахром Эгамбердиевич доктор физико-математических наук, профессор
Ведущая организация:	**Национальный университет Узбекистана**

Защита диссертации состоится «_ _» _____ 2018 года в __ __ часов на заседании Научного совета DSc.27.06.2017. FM./T.34.01 при Физико-техническом институте АН РУз. Адрес: 100084, г. Ташкент, ул. Бодомзор йули, дом 2 б. Административное здание Физико-технического института, зал конференций. Тел./Факс: (+99871) 235-42-91; E-mail: ftikans@uzsci.net.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Физико-технического института (зарегистрирована за № ___). Адрес: 100084, г. Ташкент, ул. Бодомзор йули, дом 2 б. Тел./Факс: (+99871) 235-42-91.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2018 г.
(реестр протокола рассылки № _____ от «_ _» _____ 2018 г.)

Н.Р. Авезова
председатель Научного совета по присуждению
ученых степеней, д.т.н., старший научный сотрудник

О.А. Абдулхаев
ученый секретарь Научного совета по присуждению
ученых степеней, д.ф.(PhD) ф.-м.н.

А.Абдурахмонов
председатель научного семинара при Научном
совете по присуждению ученых степеней,
д.т.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. На сегодняшний день в мире интенсивно развивается область нанотехнологий, одним из перспективных направлений которого является получение наноразмерных пленок силицидов металлов и проведение исследований по изучению их физических свойств. Результаты исследований, проведенных в этой области, являются одним из главных основ в создании наноматериалов, наноструктур и нового поколения электронных приборов и устройств.

Полупроводниковые силициды являются объектом исследования крупнейших мировых исследовательских центров. Благодаря высокой термической стабильности и стойкости к химическим обработкам, технологической совместимости с кремнием, практическое использование транспортных свойств полупроводниковых силицидов лежит в области термоэлектричества. В работе приборных структур на основе силицидов лежат электронные процессы, происходящие в тонких наноразмерных слоях при воздействии электронов, фотонов и прохождении тока. Поэтому разработка технологии формирования наноразмерных пленок силицидов бария и щелочных элементов на поверхности монокристаллов кремния, исследование их структуры и свойств, а также создание на их основе элементной базы для термоэлектрических преобразователей и других приборов функциональной электроники является **актуальной** проблемой физической электроники.

В Республики Узбекистан в области получения пленок силицидов и изучения их свойств достигнуты определенные успехи, в частности, в ТашГТУ получены нанопленки и нанокристаллы $CaSi_2$, Mg_2Si_3 и изучены их электронная структура и оптические свойства, в институте Ионно-плазменных и лазерных технологий получены нанопорошки кремния и исследованы их размеры и структура. В соответствии со Стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан важно обратить особое внимание на разработку эффективных механизмов внедрения достижений научных исследований и на этой основе обеспечить конкурентоспособность национальных товаров на внутреннем и внешнем рынке. В этом плане, изучение электрофизических свойств пленок силицидов металлов позволяет создать новые материалы необходимые для приборостроения. В частности, создание функциональных элементов на основе силицидов способствует решению вопроса импортозамещения в данной области.

Данное диссертационное исследование в определенной степени соответствует задачам указанных в Указе Президента Республики Узбекистан № УП–4947 «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 года, Постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП–2772 «О приоритетных направлениях развития электронной промышленности 2017-2021 годах» от

13 февраля 2017 года и № ПП–2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приорететным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертация выполнена в рамках приоритетных направлений развития науки и технологий Республики Узбекистан: III. «Энергетика, энерго- ресурсосбережение, транспорт, машино- и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения» и ПФИ-2 «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение».

Степень изученности проблемы. В середине прошлого века с возникновением полупроводниковой электроники, начали бурно развиваться работы по исследованию влияния ионного легирования на электрофизические свойства полупроводников, создание *p-n*–переходов, диодных и транзисторных структур и т.д. Больших успехов в этом направлении достигли зарубежные ученые: Дж.Мейер, Лю Эриксон, Дж.Дэвис, Х.Рассел, И.Руге; российские ученые: Е.И.Зорин, П.В.Павлов, Д.И.Тетельбаум, А.Ф.Хохлов и ученые Узбекистана: В.П.Чирва, Б.М.Абдурахманов и др.

В настоящее время бурно развивается направление по созданию тонкопленочных структур на поверхности кремния. Причем преимущество отдается системам «пленка–подложка», имеющим близкие значения параметров кристаллической решетки и температурного коэффициента расширения. Например, хорошее структурное согласование Si, $CoSi_2$, CaF_2 и, следовательно, возможность эпитаксиального выращивания многослойных систем на основе различных комбинаций слоев данных материалов являются первой предпосылкой для создания приборных структур. Второй предпосылкой являются физические свойства фторидов щелочно-земельных металлов и дисилицида кобальта, позволяющих получать уникальные технические характеристики приборов. Существуют результаты по получению и исследованию свойств силицидов Ca_3Si_4, CaSi, MnSi, Mn_3Si_4, $CrSi_2$, $ReSi_{1,75}$, Ru_2Si_3, CoSi, $CoSi_2$. Такой интерес к получению тонких монокристаллических пленок указанных силицидов обусловлен отличными транспортными свойствами и высокой термоэлектрической эффективностью. Монокристаллические пленки CoSi, $CoSi_2$ выращенные на поверхности Si(111) и Si(100) в последние годы стали объектом внимания ученых всего мира, что связано с хорошей совместимостью их кристаллографических и тепловых характеристик. Однако нет аналогичных полных данных по силицидам 1 группы и бария, имеются лишь работы группы М.Нормурадова, А.Касымова, А.Рысбаева, Б.Умирзакова, А.Ташатова по исследованию влияния имплантации Ba^+ и щелочных элементов на эмиссионные и другие свойства поверхности Si, GaAs и других полупроводников. Однако

целенаправленных исследований по формированию тонких пленок силицидов Ba и щелочных элементов к настоящему времени практически не проводилось.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного или научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Работа выполнена в Ташкентском государственном техническом университете им. Ислама Каримова в рамках проектов научных-исследований ТГТУ: Ф-2-31 «Исследование структуры и физических свойств наноразмерных пленок силицидов металлов и разработка термочувствительных структур» (2012–2016); ОТ-А3-56 «Разработка неохлаждаемых высокоэффективных приемников теплового излучения и термоэлектрических преобразователей инфракрасного излучения на основе пленок высшего силицида марганца» (2017–2018).

Целью диссертационной работы является разработка технологии формирования тонких наноразмерных пленок силицидов Ba и щелочных элементов, исследование их структуры и электрофизических свойств.

Задачи исследования:

провести обработку кристаллов кремния вне вакуума (*exsiti*) и в сверхвысоком вакууме (*insiti*) и разработать новый способ очистки поверхности полупроводниковых кристаллов;

исследовать влияние имплантации ионов Li^+, K^+, Na^+, Rb^+, Cs^+, Ba^+ с энергией 0,5÷5 кэВ на элементный и химический состав, кристаллическую и электронную структуры приповерхностной области кремния;

методами растровой электронной микроскопии высокого разрешения (РЭМ) и дифракцией медленных электронов (ДМЭ) исследовать изменения состояния поверхности Si(111) и Si(100) при имплантации ионов Ba^+ и щелочных элементов и проведении последующего термического отжига;

определить оптимальные технологические условия ионной имплантации и последующего термического отжига для формирования тонких монокристаллических пленок силицидов Li, K, Na, Rb, Cs, Ba.

Объектами исследования были имплантированные ионами Ba^+ и щелочных элементов монокристаллы Si(111), Si(100) *p*-и *n*-типа с удельным сопротивлением ρ=100 ÷ 3000 Ом·см.

Предметом исследования являются процессы формирования тонких наноразмерных монокристаллических пленок силицидов Ba и щелочных элементов на поверхности Si(111) и Si(100), их структура и физические свойства.

Методы исследований. Дифракция медленных электронов (ДМЭ), электронная оже-спектрометрия (ЭОС), спектроскопия характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ), фотоэлектронная спектроскопия (ФЭС), растровая электронная микроскопия высокого разрешения (РЭМ).

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработан новый способ очистки поверхности монокристаллов кремния путем имплантации низкоэнергетических (E_0=0,5÷5 кэВ) ионов активных металлов с большой дозой ($\geq 10^{16}$ см$^{-2}$) и последующем кратковременным (1÷2 минут) при температуре T=1550 К;

впервые исследовано влияние имплантации ионов Li^+, K^+, Na^+, Rb^+, Cs^+, Ba^+ с энергий 0,5÷5 кэВ на элементный и химический состав, кристаллическую и электронную структуры приповерхностной области монокристаллов кремния;

впервые определены оптимальные технологические режимы ионной имплантации и последующего термического отжига для формирования тонких монокристаллических силицидных пленок Li, K, Na, Rb, Cs, Ba;

исследованы электрофизические свойства пленок силицидов и гетероструктур «силицид-кремний». Показано, что пленки силицидов имеют линейную зависимость электропроводности от температуры, характерную для вырожденных полупроводников;

исследованиями влияния предварительной имплантации ионов B^+ в *p*–Si(111) с энергией E_0=1,5 кэВ и дозой D=10^{16} см$^{-2}$ на профили распределения атомов Na в кремнии показано, что проведение имплантации ионов Na^+ в *p*–Si(111), предварительно легированный B с большой дозой приводит к уменьшению максимального пробега атомов примерно на 30% и к резкому уменьшению ширины переходного слоя как после имплантации, так и после проведения последующего термического прогрева;

впервые с использованием растровой электронной микроскопии высокого разрешения установлено, что при имплантации ионов Rb^+ с дозой 10^{15}см$^{-2}$ и прогреве при 600 К наблюдается формирование отдельных мелких островков силицида рубидия с размерами 10÷30 нм. С увеличением дозы имплантации они сливаются в более крупные монокристаллические островки округлой формы. Показано, что при дозе имплантации $6\cdot10^{16}$см$^{-2}$ и прогреве при T=900 К происходит полное слияние островков и формирование сплошной пленки силицида рубидия.

Практические результаты исследований заключаются в следующем:

новый способ очистки поверхности полупроводников может быть использован для получения чистых поверхностей монокристаллов Si, GaAs и других полупроводников как для проведения научных исследований, так в их технологическом цикле производства;

гетероструктурные переходы BaSi-Si, созданные ионной имплантацией и последующим термическим прогревом рекомендованы в качестве контакта, а RbSi-Si, LiSi-Si, NaSi-Si– в качестве *p-n*-перехода в диодных структурах.

Достоверность результатов исследований обеспечивается использованием современных методов диагностики поверхности высокого разрешения, применением разработанного автором нового способа очистки поверхности кремния, проведением экспериментов в условиях

сверхвысокого вакуума, хорошим соответствием результатов для чистого кремния с данными других авторов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость исследований заключается в выяснении закономерностей и механизмов формирования силицидных пленок при имплантации ионов низких энергий и больших доз в кремний и проведения последующего термического прогрева.

Практическая значимость заключается в том, что разработанный автором новый способ очистки поверхности полупроводников может быть использован для получения чистых поверхностей монокристаллов Si и других полупроводников как для проведения научных исследований, так в их технологическом цикле производства. Полученнке силицидние пленки могут быть использованы в качестве низкоомных контактов, термоэлектрических материалов для термогенераторов, термоэлектрических батарей, приемников теплового излучения, различных датчиков, элементов функциональных интегральных схем для быстродействующих приборов микро- и наноэлектроники.

Внедрение результатов исследования. На основе результатов по получению наноразмерных плёнок силицидов металлов и исследованию их физические свойств:

способ очистки поверхности монокристаллов кремния использован в лаборатории электронографии ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН для получения атомно-чистой поверхности монокристаллов Si(111) и Si(100) с совершенной кристаллографической структурой (Справка ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, №11205-4201-БВ от 15.01.2018 г.). Использование данного способа очистки позволило улучшить параметры термоэлектрических материалов;

результаты по очистке поверхности Si имплантацией ионов щелочных элементов и последующим прогревом, а также по формированию тонких наноразмерных пленок силицидов металлов использованы при выполнении фундаментального проекта Ф2-41 «Теоретические и экспериментальные исследования процессов распыления, внедрения атомов, образования наноразмерных структур и напряженных слоев при имплантации ионов в материалы различной природы (металлы, полупроводники и диэлектрики)» при получении концентрационных профилей распределения атомов с использованием послойного травления ионами Ar^+ (Справка ФТА-02-11/1246 Агентства Науки и технологий Республики Узбекистан от 4.12.2017 г.). Использование научных результатов дало возможность получить распределения атомов по глубине кристалла.

Апробация результатов исследования. Результаты исследования были обсуждены на 14 международных и 4 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследования. По материалам диссертации опубликованы 25 научных трудов, в том числе 1 монография, 6 статей в

журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы включая 40 рисунков и 5 таблиц. Текст диссертации изложен на 112 страницах текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснован выбор тематики исследований, показана ее актуальность, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, приводится связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике, оценена степень изученности проблемы в мире на сегодняшний день, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе **«Обзор литературы по исследованию структуры и свойств пленок силицидов металлов»** приводится краткий обзор литературы: по способам вакуумной очистки поверхности монокристаллов кремния и оценке сверхструктур, характерных для наиболее чистых поверхностей Si; по исследованию влияния имплантации ионов щелочных металлов на структуру и электрические свойства монокристаллов кремния; о способах формирования силицидных пленок, исследованию их транспорных и термоэлектрических свойств, а также по практическому использованию полупроводниковых силицидов в термоэлектричестве. Отмечается, что в литературе имеется достаточно большой экспериментальный материал о способах создания и электрических свойствах термоэлектрических материалов Ca_3Si_4, CaSi, MnSi, Mn_3Si_4, $CrSi_2$, $ReSi_{1,75}$, Ru_2Si_3, CoSi, $CoSi_2$. Однако следует констатировать, что подобные данные по пленкам силицидов бария и щелочных элементов в литературе практически отсутствуют. В конце главы приводятся выводы из обзора литературы.

Вторая глава **«Прибор и методика проведения экспериментов»** посвящена описанию двух экспериментальных установок (в стеклянном и металлическом исполнении), методике обработки и исследованию поверхности твердых тел. Установки позволяют исследовать поверхность следующими методами: дифракции медленных электронов (ДМЭ), электронной оже-спектрометрией (ЭОС), спектроскопией характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ), спектроскопией упруго-рассеянных электронов (СУРЭ), фотоэлектронной спектроскопией (ФЭС). Эксперименты проводились в вакууме 10^{-7} Па в приборе с анализатором сферической геометрии с тормозящим полем, а также в стандартных приборах: LASS-2200 фирмы Riber (Франция), просвечивающем РЭМ высокого разрешения Titan80-300 TEM/STEM (Голландия). Очистка

поверхности монокристаллов Si осуществлялась ионным травлением и термическим прогревом в два этапа: длительно (1 час) при T=1000 K и кратковременно (0,5÷1 мин) при T=1500 K, а также разработанным автором новым способом очистки, заключающимся в создании в поверхностной области Si геттерирующего слоя имплантацией ионов Ba^+ или щелочных металлов с низкой энергией (0,5÷5 кэВ) и большой дозой (10^{16}÷10^{17}см$^{-2}$) и проведением прогрева при T=1550 K, который позволяет дополнительно очистить поверхность монокристаллов Si от таких примесей как O_2, C, S, Na и др., которые удаляются из приповерхностных слоев, образуя соединения с внедренными атомами. Энергия имплантируемых ионов варьировалась от 0,5 до 5 кэВ, а доза ионов изменялась от 10^{13} до $2\cdot10^{17}$см$^{-2}$. Плотность ионного тока варьировалась от 10^{-7} до 10^{-5} А·см$^{-2}$.

Кристаллическая структура поверхности образцов исследовалась методами ДМЭ и РЭМ высокого разрешения. В главе описаны физические основы метода ДМЭ, приведена электрическая схема для формирования картин ДМЭ и обсуждаются способы анализа дифракционных картин.

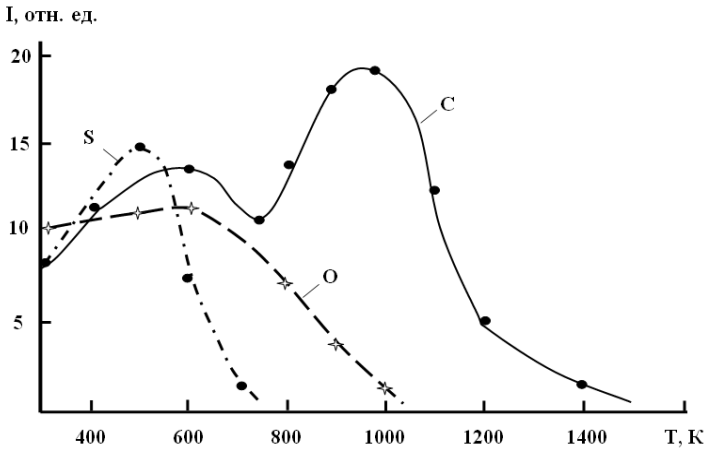
Элементный и химический состав приповерхностного слоя образцов изучался методом ЭОС. Изменение работы выхода поверхности Si, происходящее в процессе различных технологических обработок определялось с помощью метода контактной разности потенциалов (КРП). Чувствительность метода ЭОС составляла 10^{11} ат.·см$^{-2}$, разброс энергии первичных электронов составляет 0,1 эВ. Обсуждаются основные источники погрешностей, характерные для каждого из методов исследования, использованных в настоящей работе.

В третьей главе **«Разработка нового способа очистки поверхности полупроводниковых кристаллов»** приведены результаты экспериментального исследования изменения элементного состава и кристаллической структуры монокристаллов кремния и арсенида галлия в процессе вакуумной очистки поверхности. Современные технологии изготовления приборов требуют получения чистой поверхности кремния. Это связано с тем, что состояние и толщина переходного слоя «силицид-кремний» существенно влияют на характеристики приборов, созданных на их основе. Поэтому нами были проведены исследования по разработке нового способа очистки поверхности кремния. Из существующих методов очистки, по нашему мнению, наиболее привлекательным своей простотой является высокотемпературный прогрев в сверхвысоком вакууме. Источниками загрязнения поверхности могут быть: окружающая среда либо среда, используемая для предварительной обработки и сам кристалл, примесные атомы которого из объема могут диффундировать в приповерхностную область.

На рис.1 приведены зависимости интенсивности линий оже-электронов ряда примесных атомов (C, O, S) присутствующих на поверхности Si(111) от температуры нагревания в высоком вакууме. Основными примесями

являются кислород и углерод. Нами установлено, что для очистки Si от кислорода нужен прогрев при 1030 К, а углерода 1420 К.

В таблице 1 приведены атомные поверхностные структуры, которые наблюдались нами при исследовании процессов очистки поверхностей полупроводниковых кристаллов.



S (150 эВ), C (272 эВ), O (508 эВ)

Рис. 1. Зависимости интенсивности линий оже-электронов ряда примесей атомов присутствующих на поверхности Si(111) от температуры нагревания в вакууме

Таблица 1

Атомные поверхностные структуры, которые наблюдались нами при исследовании процессов очистки поверхностей полупроводниковых кристаллов

Si(100)	(1x1)	Термическая очистка при 900 K	InP (100)	(1x1)	Отжиг в вакууме при 800 K
	(2x2)	Высокотемпературная очистка в вакууме в два этапа: длительно при 1000 K и кратковременно при 1500 K			Ионная бомбардировка, отжиг при 700 K
Si(100)	(2x1)	Скол в вакууме		(1x4)	Ионная бомбардировка, отжиг при 700 K и быстрое охлаждение
Si(111)	(2x1)	Скол в вакууме	GaAs (110)	(1x1)	Раскол в вакууме
Si(111)	(7x7)	Высокотемпературная очистка в вакууме в два этапа: длительно при 1000 K и кратковременно при 1500 K	GaAs (111)	(1x1)	Отжиг в вакууме при 600 K
GaAs (100) и $Ga_{1-x}In_xAs$	(1x1)	Низкотемпературный отжиг при 600 K			Ионная бомбардировка, отжиг при 500 K
	(8x2)	Отжиг в вакууме при 900 K		(2x2)	Отжиг в вакууме при 800 K

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что очистка поверхности кристаллов прогревом при температуре ниже температуры плавления образца приводит к перераспределению примесей в

объеме образца или даже к их сегрегации на поверхность с последующим образованием очень прочных соединений, а ионное распыление, являясь эффективным методом очистки, разрушает структуру поверхности. Поэтому нами была поставлена задача: разработать новый способ дополнительной очистки (*insitu*) поверхности полупроводниковых кристаллов, в частности кремния Si(111).

Поставленная задача нами была решена созданием на поверхности предварительно очищенных термическим прогревом в два этапа Si(111) и Si(100) геттерирующего слоя путем имплантации ионов Ba^+ (или щелочных элементов) с энергией E_0=0,5÷1 кэВ и с высокой дозой облучения $D \approx 10^{16} \div 10^{17}$ см$^{-2}$ в сверхвысоком вакууме. В результате, в приповерхностной области кремния создается геттерирующий слой с высокой концентрацией атомов Ba или щелочных элементов, которые, являясь химически активными, образуют соединения с атомами кремния и неконтролируемых примесей (O, Na, S, C и др.) и после прогрева при температуре 1550 K в течение 1÷2 минут испаряются из приповерхностной области Si(111).

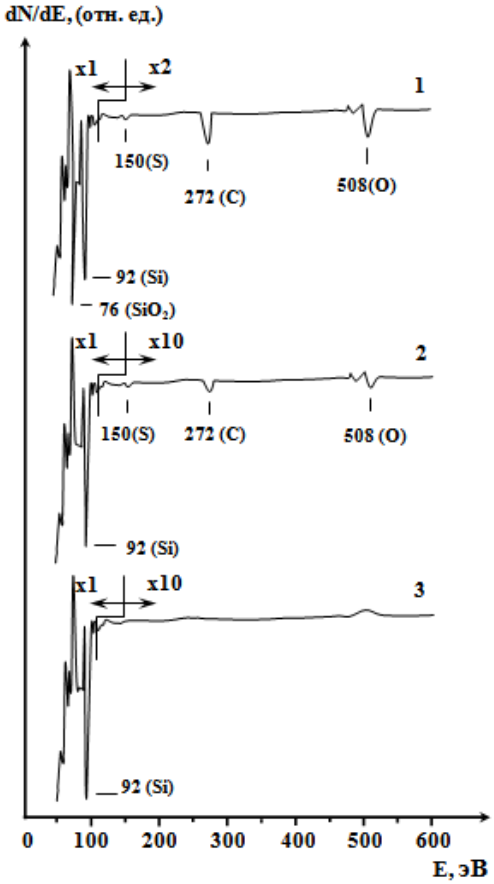
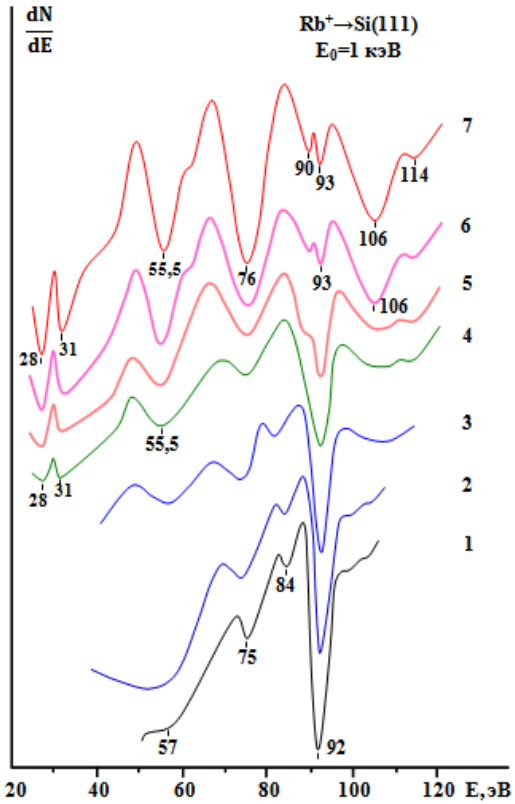


Рис. 2. Спектры Оже-электронов, полученные: от исходной поверхности Si(111) (спектр 1), от поверхности Si(111), очищенной термическим прогревом в два этапа: длительно при 1000 К и кратковременно при 1500 К (спектр 2) и от поверхности Si(111), полученной после термического прогрева при T=1550 К Si(111), предварительно имплантированного ионами Ba^+ с энергией E_0=1 кэВ и дозой облучения D=10^{17} см$^{-2}$ – (спектр 3)



0-кривая 1; $5 \cdot 10^{13}$ -2; $5 \cdot 10^{14}$ -3; $5 \cdot 10^{15}$ -4; 10^{16} -5; $8 \cdot 10^{16}$ -6; $2 \cdot 10^{17}$ -7

Рис. 3. Изменение оже-спектра кремния при имплантации ионов Rb^+ с E_0=1 кэВ с различной дозой облучения D, см$^{-2}$

На рис. 2 приведены спектры оже-электронов для поверхности кремния, не подвергнутой термической очистке в вакууме (спектр 1), после проведения термической очистки в вакууме 10^{-7} Па в два этапа: длительно (в течение 1 ч) при T=1000 K и кратковременно (в течение 0,5÷1 минут) при T=1500 K (спектр 2) и кремния, подвергнутого очистке предлагаемым нами способом (спектр 3).

Предлагаемый нами способ очистки заключается в проведении имплантации ионов Ba^+ (или щелочных элементов) в кремний, предварительно очищенный термическим прогревом в два этапа, с энергией E_0=1 кэВ и дозой 10^{16}÷10^{17} см$^{-2}$, с последующим термическим прогревом при 1550 K в течение 1÷2 минут. Как видно из спектра 3, такая обработка позволяет практически полностью очистить поверхность от примесей. Исследованиями изменения элементного и химического состава приповерхностной области Si нами установлено, что имплантация ионов Ba^+ и щелочных элементов, начиная с доз аморфизации, приводит к частичному образованию химических соединений между атомами Si и внедренной примеси, что осуществляется за счет энергии ионного пучка, т.е. происходит ионно-стимулированный синтез химических соединений. Для установления химического состояния имплантированных в Si ионов нами проводились исследования поверхности методом ЭОС. На рис.3 приведены спектры ЭОС чистого кремния (кривая 1) и Si, имплантированного ионами Rb^+ с различной дозой (кривые 2-7). Видно, что имплантация рубидия с дозой $D \leq 5\cdot10^{13}$ см$^{-2}$ приводит лишь к небольшому ослаблению пика $Si_{L_{2,3}VV}$ при 93 эВ, а оже-пики, характерные для легирующего элемента, в спектре отсутствуют. Это указывает на то, что при малых дозах легирующие ионы проникают вглубь мишени на глубины, превышающие зону выхода низкоэнергетичных оже-электронов, а фронт легирующей примеси первоначально формируется в области максимального пробега ионов с данной энергией. С дальнейшим увеличением дозы ионов в спектре появляется пик рубидия при E = 55,5 эВ, связанный с оже-переходом типа $M_5N_1N_{2,3}$, а амплитуда пика $Si_{L_{2,3}VV}$ сильно уменьшается. Другой особенностью спектра является то, что по мере ионной имплантации, начиная с $D=4\cdot10^{15}$ см$^{-2}$, изменяется форма пика $Si_{L_{2,3}VV}$ при E=93 эВ появляется небольшой выступ. Далее, с ростом дозы ионов Rb^+ пик $Si_{L_{2,3}VV}$ переходит из синглентной формы в дублетную с расщеплением 3 эВ. Такое поведение оже-пика $Si_{L_{2,3}VV}$, обусловленное взаимодействием между sp^3-электронами кремния s и d- электронами рубидия, говорит о возникновении химического соединения рубидия с кремнием. Нами, для установления количественного химического состава и определения типа химической связи кремния с атомами примеси в имплантированном слое был использован метод ЭОС в сочетании с ионным травлением образца.

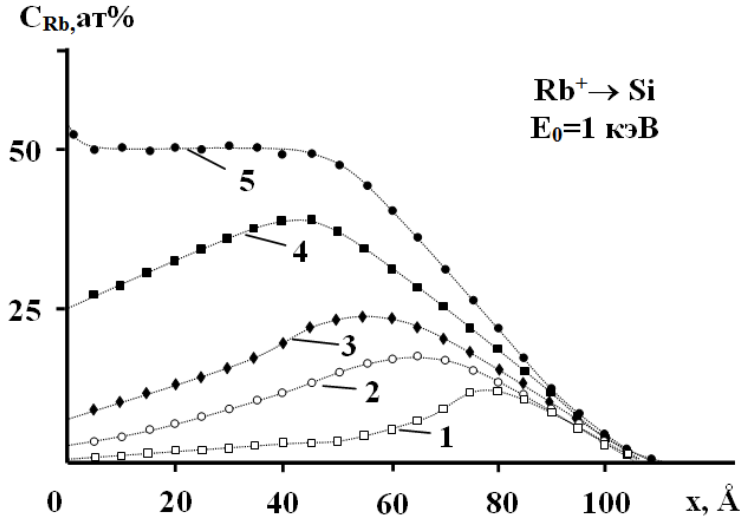
Концентрация атомов определялась с помощью коэффициентов элементной оже-чувствительности (S_x и S_i) с матричными поправками,

учитывающими различие атомной плотности N, коэффициента отражения r и глубины выхода оже-электронов λ по следующей формуле:

$$C_X = \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{N_i^0 \cdot I_i \cdot S_X \cdot \lambda_i^0 \cdot (1 + r_i^0)}{N_X^0 \cdot I_X \cdot S_i \cdot \lambda_X^0 \cdot (1 + r_X^0)} \right)^{-1} \quad (1)$$

где S_x и S_i – коэффициенты элементной оже-чувствительности элементов с неизвестной и известной концентрацией, N – атомная плотность, r – коэффициент отражения, λ – глубина выхода оже-электронов.

Коэффициенты элементной оже-чувствительности S нами определялись расчетным способом по известным формулам и экспериментально путем построения калибровочной кривой при напылении пленки металла на поверхность Si. На рис. 4 приведены концентрационные профили распределения атомов рубидия в ионно-имплантированном кремнии.



$1 \cdot 10^{13}$ (кривая 1); $1 \cdot 10^{14}$ (2); $1 \cdot 10^{15}$ (3); $5 \cdot 10^{15}$ (4), $1 \cdot 10^{16}$ (5) и $6 \cdot 10^{16}$ (6)

Рис. 4. Концентрационные профили распределения атомов Rb, имплантированных в Si(111) с энергией E_0=1 кэВ с различной дозой D, см$^{-2}$

Аналогичная картина наблюдалась при имплантации в Si ионов щелочных элементов. При этом в спектрах ЭОС в области 90÷97 эВ наблюдалось возникновение дублетного оже-пика. Таким образом, экспериментальные данные ЭОС и образование новых сверхструктур на картинах ДМЭ позволяет нам предполагать, что в результате имплантации ионов Ba^+ и щелочных элементов с дозой большей 10^{16}см$^{-2}$ и проведения последующего кратковременного термического прогрева в приповерхностной области кремния образуются тонкие наноразмерные силицидные пленки.

При исследовании изменения кристаллической структуры поверхности Si(111) и Si(100) методом ДМЭ в процессе имплантации ионов Ba^+ и щелочных элементов с энергией 0,5÷5 кэВ было установлено, что начиная с некоторой дозы ионов D_a, поверхность кремния полностью аморфизируется. Обнаружено, что для данного типа ионов величина D_a уменьшается с ростом энергии имплантируемых ионов. В табл.2 приведены значения D_a поверхности Si(111) при имплантации ионов Li^+, Na^+, K^+, Rb^+, Cs^+ и Ba^+ с разной энергией.

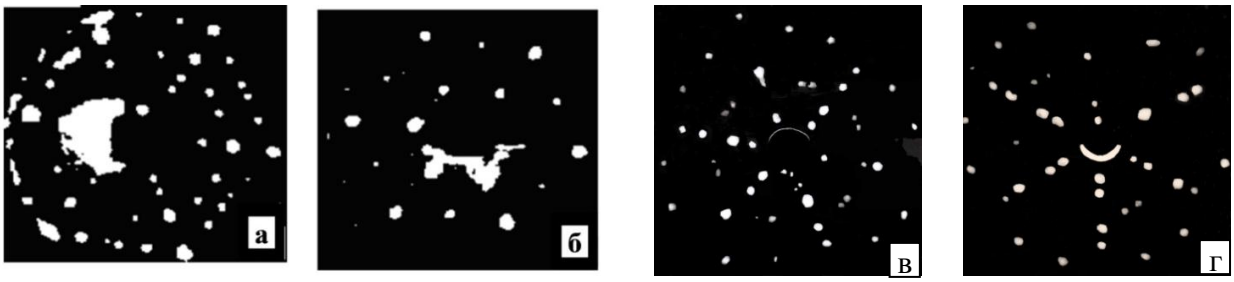
Таблица 2

Минимальные значения дозы аморфизации поверхности Si(111)/Si(100)

Энергия ионов E_0, эВ	Значения дозы аморфизации поверхности Si(111) / Si(100) D_a, x 10^{15} см$^{-2}$					
	Li^+	Na^+	K^+	Rb^+	Cs^+	Ba^+
500	10 / 12	7 / 9	6 / 8	6 / 8	4 / 6	4 / 5
1000	7 / 8	5 / 7	5 / 7	5 / 7	2 / 4	1 / 3
2000	5 / 7	3 / 5	3 / 4	4 / 3	1 / 2	0,7 / 1
3000	3 / 5	1 / 3	0,8 / 2	0,7 / 1	0,6 / 1	0,6 / 0,9
4000	1 / 1,5	0,8 / 1,2	0,9 / 1,2	0,5 / 0,8	0,4 / 0,5	0,3 / 0,6
5000	0,5 / 1	0,3 / 0,6	0,2 / 0,4	0,1 / 0,2	0,09/0,1	0,08/0,1

Из таблицы 2 видно, что минимальное значение дозы аморфизации D_a, для легких ионов оказывается большим, чем для тяжелых, а также доза аморфизации Si(100) во всех случаях превышает D_a Si(111). Это связано с тем, что при бомбардировке поверхности кремния тяжелыми ионами эффективность дефектообразования повышается из-за большей предельно переданной энергии ионами атомам мишени при их столкновении, а также с тем, что грань (100) является наименее плотной, а (111) является наиболее плотной гранью кремния.

В четвертой главе **«Формирование наноразмерных пленок силицидов на поверхности Si(111) и Si(100) методом низкоэнергетической ионной имплантации»** приводятся результаты исследования процесса формирования тонких наноразмерных пленок силицидов металлов при высокодозной и низкоэнергетической имплантации ионов Ba^+ и щелочных элементов в Si(111) и Si(100). Исследования изменения поверхностной структуры образцов Si, имплантированных ионами щелочных элементов (Li, Na, K, Rb и Cs) в результате термического прогрева показали, что в зависимости от типа иона также наблюдается формирование различных поверхностных структур. На рис.5 (а-г) приведены картины ДМЭ от поверхности Si(111), имплантированного ионами: Si(111)-4x4Li -а, Si(111)-2x2Rb -б, Si(111)-2x2Cs -в, Si(111)-4x4Na -г; полученные после кратковременного отжига при Т, К: 600, 800, 500, 900 К соответственно.



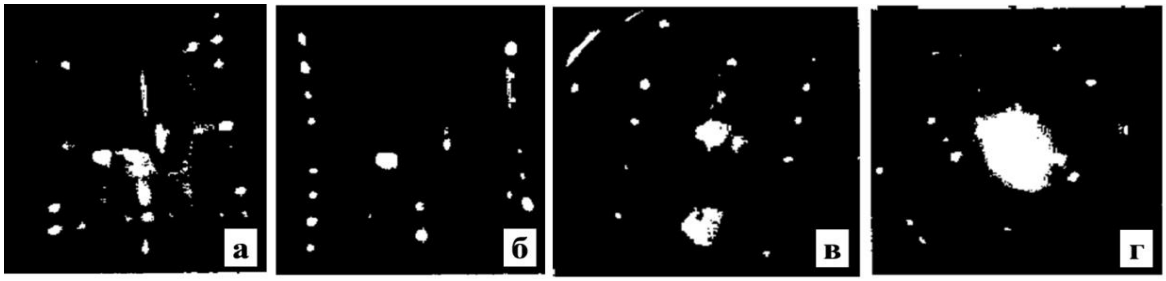
Si(111)-4x4Li -а; Si(111)-2x2 Rb -б; Cs–Si(111)-4x4Cs -в; Na–Si(111)-4x4 Na -г

Рис.5. Картины ДМЭ от поверхности Si(111), имплантированных ионами Li, Rb, Cs и Na

На дифракционной картине Si(111)-4x4Li, кроме основных рефлексов, наблюдаются двойниковые рефлексы-дублеты. Наличие дублетов свидетельствует о доменном характере пленки лития, образованной на кремнии. Двойниковые или дробные рефлексы также наблюдаются на картине ДМЭ Si(111)-2x2Cs. Причем здесь имеются три системы дополнительных рефлексов, отвечающие трем плоскостям, ограняющим появившиеся фасетки. Поскольку с увеличением энергии E_p дополнительные рефлексы, возникающие из (00) двумерного рефлекса, смещались в направлении (10), мы полагаем, что гранями фасетки являются плоскости типа (110). При прогреве образцов Si(100), имплантированных ионами Na^+, Rb^+, K^+ и Cs^+ с E_0=1 кэВ, нами обнаружены следующие поверхностные сверхструктуры (рис. 6 а-г): Si(100)-4x4Na -а; Si(100)-2x4Rb -б; Si(100)-2x1K -в; Si(100)-2x8Cs -г. Нами также наблюдались структуры: Si(100)-2x2Ba; Si(100)-1x1Ba; Si(100)-2x2Li.

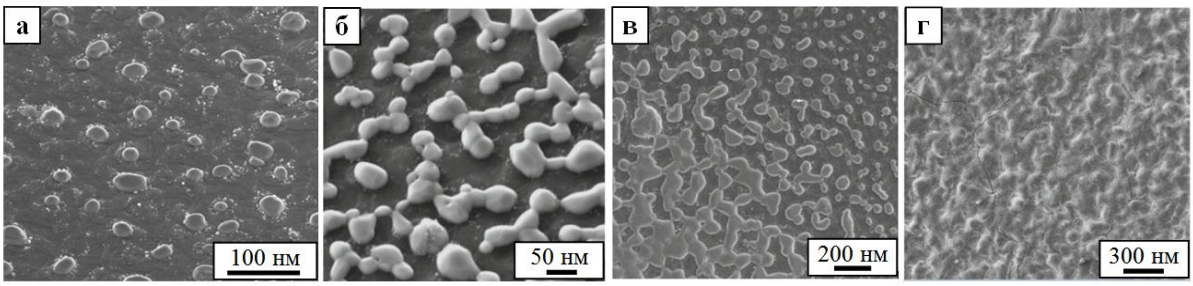
Изменение морфологии поверхности кремния в процессе имплантации ионов Ba^+ и щелочных элементов нами проводилось с помощью растровой электронной микроскопии в микроскопе Titan80-300 TEM/STEM (Голландия).

На рис. 7 приведены электронно-микроскопические изображения поверхности, снятые на разных стадиях формирования пленки силицида



Si(100)-4x4Na -а; Si(100)-2x4Rb -б; Si(100)-2x1K-в; Si(100)-2x8Cs –г

Рис.6. Картины ДМЭ от поверхности Si(100), имплантированных ионами Na, Rb, K, Cs



формирование зародышей силицида рубидия (а-б), их слияние в островки (в) и формирование сплошной пленки (г) силицида рубидия

Рис. 7. Электронно-микроскопические изображения поверхности на разных стадиях формирования пленки силицида рубидия

рубидия. При имплантации ионов Rb^+ с дозой 10^{15} см$^{-2}$ и прогреве при 600 К наблюдается формирование отдельных мелких островков силицида рубидия с размерами 10÷30 нм.

С увеличением дозы имплантации они сливаются в более крупные (рис.7 б, размером 30÷100 нм) островки округлой формы. Наличие огранки свидетельствует об их монокристаллической структуре. Однако между крупными островками наблюдаются неограненные мелкие островки с аморфной структурой. При дозе $6 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$ и прогреве при T=900 К происходит полное слияние островков и формирование сплошной пленки силицида рубидия.

Аналогичные результаты также наблюдались при имплантации в Si ионов щелочных элементов. Для определения химического состояния имплантированных в кремний ионов были изучены спектры ЭОС.

В таблице 3 приведены определенные нами оптимальные технологические режимы для формирования наноразмерных силицидных пленок.

Таблица 3

Оптимальные режимы формирования тонких наноразмерных пленок силицидов бария и щелочных элементов

Тип силицида / Параметры	LiSi	NaSi	KSi	RbSi	CsSi	BaSi
Структура исходного Si	111	100 111	100	100 111	100 111	100 111
Энергия ионов, кэВ	0,5-5	0,5-5	0,5-5	0,5-5	0,5-5	0,5-5
T отжига, К	900-1000	600-700	800-850	800-850	500-600	800-900
Толщина силицида, Å	50-110	45-100	35-95	30-90	40-90	35-85
Тип сверхструктуры	4x4	4x4 1x1	2x1	2x4 2x2	2x8 2x2	2x2 1x1
Энергия электронов E_P, эВ	42	35 43	49	35 42	39 30	38 43
T восстановления исходной структуры, К	1400	1100	1200	1200	1000	1300

Примечание*: Во всех случаях доза – больше 10^{16}см$^{-2}$.

В результате ионной имплантации и последующего отжига в приповерхностной области Si образуются пленки следующих силицидов: LiSi, KSi, RbSi, CsSi, NaSi и BaSi. Экспериментальные измерения толщины пленок силицидов показали, что она увеличивается с увеличением энергии имплантируемых ионов, а при фиксированной энергии ионов она растет с увеличением дозы примерно как $D^{1/2}$. Таким образом, в работе исследована кинетика образования силицидов бария и щелочных металлов. Установлены оптимальные условия образования силицидных пленок и основные факторы, влияющие на их параметры. Нами также исследовано изменение удельной электропроводимости поверхности Si(111) *n*-типа в процессе имплантации ионов Ba, Na и Li с энергией E_0=1кэВ различной дозой. Имплантация ионов (независимо от типа ионов) до дозы $8 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$ практически не приводит к изменению σ (рис.8). Это, вероятно, связано с глубоким проникновением вследствии каналирования имплантируемых ионов и малым их вкладом в поверхностную проводимость. Следует отметить, что имплантация ионов Ba^+

и щелочных элементов с дозой ~10^{14}см$^{-2}$ приводит к увеличению концентрации электронов на донорных уровнях и к началу расщепления донорных уровней, что в результате должно привести к увеличению σ. Однако при этих дозах поверхностная область Si(111) сильно разупорядочивается, что ведет к уменьшению электропроводимости поверхности, последнее компенсирует вклад увеличения концентрации доноров на рост σ. О правомерности подобного механизма свидетельствуют минимумы на дозных зависимостях σ (рис.8). С увеличением дозы имплантируемых ионов наблюдается резкий рост σ вплоть до D=10^{17}см$^{-2}$.

На рис. 9 приведены зависимости удельной электропроводности σ поверхности Si(111), имплантированного ионами Li^+, Na^+ и Ba^+ с энергией E_0=1 кэВ с дозой D=2·10^{17}см$^{-2}$ от температуры последующего отжига. Видно, что начиная с температуры $T_{кр}$, соответствующей рекристаллизации имплантированной области, наблюдается резкий рост σ.

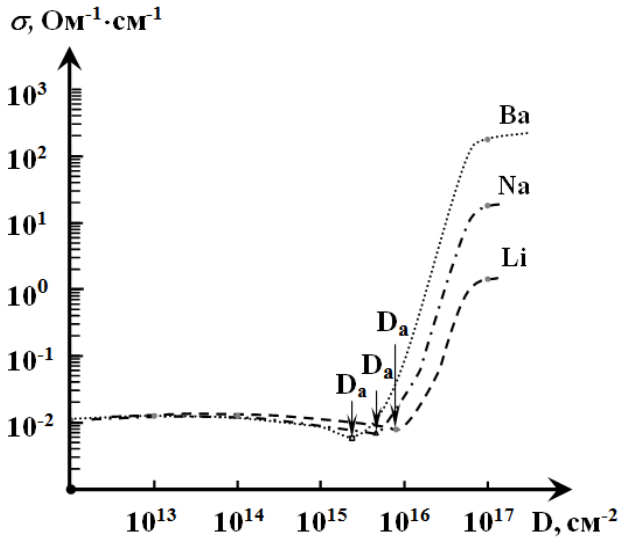


Рис.8. Зависимости удельной электропроводности σ поверхности Si(111) от дозы имплантации ионов (Li^+, Na^+ и Ba^+) с энергией E_0=1 кэВ

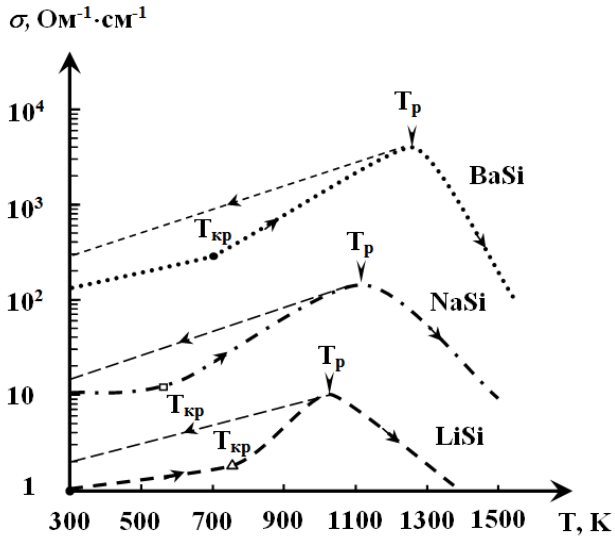


Рис. 9. Зависимости удельной электропроводности σ поверхности Si(111), имплантированного ионами (Li^+, Na^+ и Ba^+), от температуры отжига

По нашему мнению при T=$T_{кр}$ наблюдается образование наноразмерных пленок LiSi, NaSi, BaSi.

При температуре T>T_p разрушения силицидной пленки σ уменьшается. Оценка толщины силицидной пленки методом послойного оже-анализа показала, что при энергии ионов E_0=1 кэВ толщина пленок составляет 5÷6 нм (или 50÷60 Å). При охлаждении силицидных пленок от T_p до 300 К удельная электропроводимость силицидных пленок линейно уменьшается, что характерно для вырожденных полупроводников.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан новый способ очистки поверхности полупроводниковых кристаллов (в частности, кремния) путем создания в приповерхостной области кремния геттерирующего слоя имплантацией ионов Ba^+ и щелочных элементов с низкой энергией и большой дозой в предварительно очищенную традиционным термическим прогревом, в котором атомы бария и щелочных элементов образуют химические соединения с кремнием и примесными атомами O, C, S. И в результате термического прогрева при T=1550 K в течение 1÷2 минут геттерирующий слой полностью удаляется, оголяя чистую поверхность кремния;

2. Установлено, что поверхность чистого Si(111) имеет гладкий микрорельеф. Образование дефектов при имплантации ионов сопровождается изменением рельефа поверхности: при малых дозах $D \leq 5 \cdot 10^{14}$ $см^{-2}$ наблюдаются отдельные молекулярные комплексы-кластеры с увеличением дозы имплантированных ионов растет число кластеров, которые при дозах $D \geq 5 \cdot 10^{15}$ $см^{-2}$ объединяются и поверхность Si(111) становится полностью аморфной. Определены значения критических доз аморфизации поверхности Si(111) и Si(100) при имплантации ионов Li^+, Na^+, K^+, Rb^+, Cs^+ и Ba^+ с разной энергией.

3. Показано, что имплантация ионов Ba^+ и щелочных элементов с большой дозой ($10^{16} \div 10^{17} см^{-2}$) приводит к частичному образованию силицидов металлов и после кратковременного отжига при соответствующих температурах образуются пленки моносилицидов Li, Na, K, Rb, Cs и Ba.

4. Впервые установлено, что при дозах до $5 \cdot 10^{15}$ $см^{-2}$ профили распределения имплантированных атомов по глубине имеют форму близкую к гауссовскому, с увеличением дозы ионов максимум распределения смещается к поверхности. При высоких дозах $\sim 2 \cdot 10^{17}$ $см^{-2}$ максимум распределения начинается непосредственно с поверхности и образуется практически ступенчатый профиль распределения.

5. Установлено, что проведение имплантации ионов Na^+ в *p*-Si(111), предварительно легированный ионами B^+ с большой дозой приводит к уменьшению максимального пробега атомов Na примерно на 30 % и к резкому уменьшению ширины переходного слоя как после имплантации, так и после проведения последующего термического прогрева.

6. Показано, что имплантация ионов Na^+, Rb^+, Cs^+, Li^+ с E_0=1 кэВ, большой дозой в Si(111) и проведение последующего кратковременного прогрева при 600, 800, 500, 900 K, соответственно приводит к формированию в приповерхностном слое пленок силицидов со следующими структурами: Si(111)-4x4Na, Si(111)-2x2Rb, Si(111)-4x4Cs, Si(111)-4x4Li, а прогрев образцов Si(100), имплантированных ионами Na^+, Rb^+, K^+ и Cs^+ с E_0=1 кэВ приводит к образованию силицидов с поверхностными сверхструктурами: Si(100)-4x4Na, Si(100)-2x4Rb, Si(100)-2x1K, Si(100)-2x8Cs.

7. Впервые исследованиями методом РЭМ высокого разрешения установлено, что при имплантации ионов Rb^+ с дозой 10^{15} $см^{-2}$ наблюдается

формирование отдельных мелких островков силицида рубидия с размерами 10÷30 нм. С увеличением дозы имплантации они сливаются в более крупные (размером 30÷100 нм) островки, округлой формы с монокристаллической структурой. При этом между крупными островками наблюдаются неограненные мелкие островки с аморфной структурой. При дозе $6\cdot10^{16}$ см$^{-2}$ и прогреве при T=900 К происходит полное слияние островков и формирование сплошной пленки силицида рубидия.

8. Впервые определены оптимальные режимы формирования тонких наноразмерных пленок силицидов бария и щелочных элементов. Показано, что толщина пленок силицидов металлов линейно растет с увеличением энергии имплантируемых ионов и при фиксированной энергии увеличивается с ростом дозы как $D^{1/2}$.

9. Установлено, что имплантации ионов Ba^+, Na^+ и Li^+ с энергией E_0=1 кэВ (независимо от типа ионов) до дозы $D=8\cdot10^{14}$ см$^{-2}$ практически не приводит к изменению удельной электропроводимости поверхности Si(111) *n*-типа. С дальнейшим увеличением дозы имплантируемых ионов наблюдается резкий рост σ вплоть до $D=10^{17}$см$^{-2}$, затем происходит насыщение.

10. Исследованиями температурной зависимости электропроводности σ(T) ионно-имплантированных образцов обнаружен резкий изгиб при температуре кристаллизации $T_{кр}$, соответствующей образованию наноразмерных пленок-силицидов BaSi, LiSi и NaSi. Показано, что представленные силицидные пленки обладают почти линейной температурной зависимостью электропроводности подобно полупроводникам вплоть до температуры разложения силицидов $T_р$=1050-1250 К.

SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING OF SCIENTIFICDEGREES DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 AT PHYSICOTECHNICAL INSTITUTE, INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES, SAMAKAND STATE UNIVERSITY

TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY

BEKPULATOV ILKHOM RUSTAMOVICH

OBTAINING NANODIMENSIONAL METAL SILICIDE FILMS AND THEIR PHYSICAL PROPERTIES

01.04.04 – Physical electronics

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

Tashkent – 2018

The subject of doctoral dissertation is registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2017.2.PhD/FM98.

Dissertation has been prepared at the Tashkent State Technical University.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) has been posted on the website of the Scientific Council (fti.uz) and on Information-educational portal «ZiyoNet» (www.ziyonet.uz).

Scientific consultant:	**Rysbaev Abdurashit Sarbaevich** doctor of physical and mathematical sciences
Official opponents:	**Ashurov Khotam Baxronovich** doctor of technical sciences, senior researcher
	Egamberdiyev Baxrom Egamberdiyevich doctor of physical and mathematical sciences, professor
Leading organization:	**The National University of Uzbekistan**

The defense will take place on «____» _____2018 at _____ at the meeting of the Scientific Council number DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 at the Physical-Technical Institute, Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Samarkand State University (Address: 100084, 2 b, Bodomzor yo'li str., Tashkent city, Uzbekistan. Phone: (99871) 235-42-91, E-mail: ftikans@uzsci.net.

The doctoral dissertation is can be looked through in the Information-Resource Centre of the Physical-Technical Institute (is registered № ___) (Address: 100084, 2 b, Bodomzor yoli str., Tashkent, Uzbekistan. Phone: (99871) 235-42-91.

The abstract of the dissertation is sent out on «___» _____ 2018.
(mailing report № _____ on «___» _____ 2018).

N.R.Avezova
Chairman of scientific council on award of scientific degrees, doctor of technical sciences, senior researcher

O.A. Abdulkhaev
Scientific secretary of scientific council on award of scientific degrees, PhD in physics and mathematics

A. Abdurakhmanov
Chairman of scientific seminar under Scientific council on award of scientific degrees, doctor of technical sciences, professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The purpose of this work is to study the process of formation of thin nanosized monocrystal films of Ba and some alkali metals by implanting ions in Si(111) and Si(100). While studying the changes in the surface structure of Si(111) and Si(100) samples during the implantation of ions with E_0=0,5ч5 keV, it was found that regardless of the type of implanted ions, starting from a certain dose, the crystal surface becomes amorphous. It was also found that for a given type of ion dose value which the surface becomes amorphous, with increasing energy of dopant ions decreases.

The aim of the research work. Development of technology for the formation of thin nanosized films of silicides of Ba and alkaline element and study their structure and electrophysical properties.

The objects of research work were monocrystals of Si(111), Si(100) *p*- and *n*-type, which were implanted with Ba ions and alkali elements with specific resistance c = 100 ч 3000 Ohm·cm.

The scientific novelty of the research is as follows:

a new method for cleaning the surface of silicon monocrystals by implanting low-energy (E_0 = 0,5÷5 keV) ions of active metals with a large dose ($\geq 10^{16}$ cm^{-2}) and subsequent short-term (1÷2 minutes) at a temperature of 1550 K;

the influence of implantation of Li, K, Na, Rb, Cs, Ba ions with energies of 0,5ч5 keV on the elemental and chemical composition, crystal and electronic structures of the near-surface region of silicon monocrystals was first studied;

optimal technological regimes of ion implantation and subsequent thermal annealing were first determined for the formation of thin monocrystalline silicide films of Li, K, Na, Rb, Cs and Ba;

the electrophysical properties of silicide films and «silicide-silicon» heterostructures were studied. It is shown that silicide films have a linear dependence of the electrical conductivity on temperature, characteristic of degenerate semiconductors;

studies of the effect of preliminary implantation of B^+ ions in *p*-Si(111) with energy E_0=1,5 keV and dose D=10^{16} cm^{-2} on the profiles of Na atom distribution in silicon have shown that implantation of Na^+ ions in *p*-Si(111), pre-alloyed B with a large dose leads to a decrease in the maximum range of atoms by about 30% and to a sharp decrease in the width of the transition layer both after implantation and after subsequent thermal heating;

for the first time, using high-resolution scanning electron microscopy, it was found that when Ba^+ ions are implanted with a dose of 10^{15} sm^{-2} and heated at 600 K, formation of individual small islands of barium silicide with dimensions of 10ч30 nm is observed. With an increase in the dose of implantation, they merge into larger monocrystal islets, of a rounded shape. It was shown that at a dose of implantation of $6 \cdot 10^{16}$ sm^{-2} and heating at T = 900 K, complete fusion of islets and formation of a continuous barium silicide film occur.

Implementation of the research results. Based on the results of cleaning the surface of Si and the formation of thin nanosized silicide films;

the method of cleaning the surface of silicon monocrystals was used in the Electronography Laboratory of the Institute of Crystallography and Photonics of the Russian Academy of Sciences to produce an atomically clean surface of Si(111) and Si(100) single crystals with a perfect crystallographic structure. (Reference № 11205-4201-БВ of the Institute of Crystallography, Russian Academy of Sciences, 15.01.2018). The use of this cleaning method has made it possible to improve the parameters of thermoelectric materials;

the results of the cleaning of the Si surface by implantation ions of alkaline element and with subsequent heating, as well as the formation of thin nano-sized films of metal silicides were used in the implementation of the fundamental project F2-41 «Theoretical and experimental studies of the sputtering, implantation of atoms, formation of nanoscale structures and strained layers during ion implantation in materials of different nature (metals, semiconductors and insulators)» in obtaining concentration profiles of the distribution of atoms using layered etching ions Ar^+ (Reference of FTA-02-11/1246 of the Agency for Science and Technology of the Republic of Uzbekistan from 12.04.2017 y.) The use of scientific results made it possible to obtain atomic distributions over the depth of the crystal.

The outline of the thesis. The thesis consists of an introduction, four chapters, conclusion, a list of references. The text of the thesis is presented on 112 pages of typewritten text, including 40 figures and 5 tables.

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

I-бўлим (I-часть, part I)

1. Монография: Бекпулатов И.Р., Рысбаев А.С., Хайриддинов Б.Э., Хужаниязов Ж.Б. Структура и физические свойства наноразмерных пленок силицидов металлов. Ташкент. «Adabiyot uchqunlari», 2017, 230 с.
2. Rysbaev A.S., Khujaniyazov J.B., Rakhimov A.M., Bekpulatov I.R. Formation of nanosize silicides films on the Si(111) and Si(100) surfaces by low energy ion implantation// Technical Physics, 2014, Vol. 59. № 10, P. 1526-1530. (№11. Springer, IF: 0.632).
3. Rysbaev A.S., Khujaniyozov J.B., Bekpulatov I.R., Rakhimov A.M. Method of additional clearing of the surface of monocrystal Si(111)// Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2017, № 9, P. 92-98. (№11. Springer, IF: 0.359).
4. Rysbaev A.S., Khuzhaniyazov Zh.B., Normuradov M.T., Rakhimov A.M., Bekpulatov I.R. Peculiarities of the electron structure of nanosized ion-implanted layers in silicon// Technical Physics, 2014, Vol. 59, № 11, P. 1705-1710. (№11. Springer, IF: 0.632).
5. Рысбаев А.С., Хайриддинов Б.Э., Хужаниязов Ж.Б., Бекпулатов И.Р., Файзуллаев Р.Ф. Гетероструктурные переходы BaSi-Si и NaSi-Si, полученные низкоэнергетической ионной имплантацией// Узбекский физический журнал. 2016, Vol. 18, № 6, P. 396-402. (01.00.00; №5).
6. Бекпулатов И.Р., Хужаниязов Ж.Б., Рысбаев А.С., Халиков Ю.Д. Новая методика очистки поверхности монокристаллов полупроводников// Вестник ТашГТУ, 2015, № 3, С. 30-38. (05.00.00; №16).
7. Рысбаев А.С., Хужаниязов Ж.Б., Рахимов А.М., Бекпулатов И.Р., Файзуллаев Р.Ф. Исследование процесса формирования тонких наноразмерных плёнок силицидов Na, P, B и щелочных элементов// Вестник ТашГТУ, 2013, № 4, С. 42-48. (05.00.00; №16).

II -бўлим (II -часть, partII)

8. Rysbaev A.S., Bekpulatov I.R., Kamilov T.S., Talipova Sh.A., Ibragimova B.V. Formation of nanosize silicides films on the Si(111) and Si(100) surfaces// Nanopatterning 2017: 9th International Workshop on Nanoscale Pattern Formation at Surfaces, abstracts, For3nano: Helsinki, 2017,P. 107-108.
9. Rysbaev A.S., Khuzhaniyazov Zh.B., Bekpulatov I.R., Khayriddinov B.E. Kinetic formation of nanosized thin films of Si - M (M = Li, Na, Rb, Ba)// E-MRS Spring Meeting, abstracts, Strasbourg, France, 2017, P 9.53.
10. Rysbaev A.S., Khuzhaniyazov Zh.B., Bekpulatov I.R. Formation of nanodimensional silicides films on the Si surfaces by low energy ion implantation// E-MRS Spring Meeting, abstracts, Lille, France, 2016, P 2.8.

11. Rysbaev A.S., Khuzhaniyazov Zh.B., Bekpulatov I.R. Peculiarities of the electron structure of nanodimensional ion-implanted layers in silicon// E-MRS Spring Meeting, abstracts, Lille, France, 2016, P 2.7.

12. Рысбаев А.С., Нормурадов М.Т., Хужаниязов Ж.Б., Бекпулатов И.Р., Рахимов А.М. Исследование влияния имплантации ионов бария и щелочных элементов и последующего отжига на кристаллическую структуру поверхности монокристаллов Si(111) и Si(100)// Труды XXIV международной конференции «Радиационная физика твердого тела», Севастополь, Россия, 2014, С. 172-183.

13. Рысбаев А.С., Нормурадов М.Т., Хужаниязов Ж.Б., Бекпулатов И.Р., Рахимов А.М. Влияние имплантации ионов щелочных элементов на структуру поверхности Si(111) и Si(100)// Труды XXVI международной конференции, Севастополь, Россия, 2016, С. 344-353.

14. Рысбаев А.С., Хужаниязов Ж.Б., Бекпулатов И.Р., Хайриддинов Б.Э., Рахимов А.М. Кинетика образования тонких наноразмерных пленок Si – M (M = Li, Na, Rb, Ba)// Тезисы XLVII международной Тулиновской конференции, Москва, 2017, С. 136.

15. Рысбаев А.С., Хужаниязов Ж.Б., Бекпулатов И.Р., Файзуллаев Р.Ф., Саидахмедова З.Р. Оценка электроотрицательности и степени ионности химических связей в силицидных пленках полученных методом ионной имплантации// Тезисы XLVII международной Тулиновской конференции, Москва, 2017, С. 137.

16. Рысбаев А.С., Хужаниязов Ж.Б., Бекпулатов И.Р., Файзуллаев Р.Ф. Способ дополнительной очистки поверхности монокристаллов кремния// Тезисы XLV международной Тулиновской конференции, Москва, 2015, С. 145.

17. Рысбаев А.С., Хужаниязов Ж.Б., Бекпулатов И.Р., Файзуллаев Р.Ф. Исследование процессов формирования наноразмерных плёнок силицидов при имплантации низкоэнергетечиских ионов в Si(111)// Тезисы XLV международной Тулиновской конференции, Москва, 2016, С. 169.

18. Рысбаев А.С., Бекпулатов И.Р., Рысбаева З.А., Рахимов А.М. Об электропроводности систем «наноплёнка силицида - Si», полученных высокодозной имплантацией низкоэнергетических ионов некоторых элементо// Тезисы XLV международной Тулиновской конференции, Москва, 2016, С. 170.

19. Рысбаев А.С., Хужаниёзов Ж.Б., Бекпулатов И.Р., Рахимов А.М., Файзуллаев Р.Ф. Формирование наноразмерных плёнок силицидов на поверхности Si(111) и Si(100) методом низкоэнергетической ионной имплантации// Тезисы IX международной конференции Кремний-2014, Иркутск, 2014, С. 174.

20. Рысбаев А.С., Хужаниязов Ж.Б., Бекпулатов И.Р., Шоабдурахмонова Н.Ш. Влияние низкоэнергетической имплантации ионов Ba^+ и щелочных элементов на электропроводность поверхности Si// Тезисы XI международной конференции Кремний-2016, Новосибирск, 2016, С.186.

21. Рысбаев А.С., Хужаниязов Ж.Б., Бекпулатов И.Р., Сайдахмедова З.Р. Изменение электронной структуры приповерхностной области Si(111) в процессе имплантации низкоэнергетических ионов Ba, P и B// Тезисы XI международной конференции Кремний-2016. Новосибирск, 2016, С.187.

22. Rysbaev A.S., Khuzhaniyazov Zh.B., Bekpulatov I.R. Modification of electronic-energy structure of surface of Si(111) and Si(100) by high dose ion implantation with ions of Ba and alkaline elements// International Symposium, abstracts, Tashkent, 2016, P.351-352.

23. Rysbaev A.S., Khuzhaniyazov Zh.B., Bekpulatov I.R., Fayzullaev R.F. Thin films of silicides: reception and properties// International Symposium, abstracts, Tashkent, 2016, P. 235.

24. Рысбаев А.С., Хужаниязов Ж.Б., Бекпулатов И.Р., Талипова Ш.А. Об электронной структуре ионно-имплантированного кремния// Тезисы V международной конференции, Самарканд, 2016, С. 73-74.

25. Rysbaev A.S., Djuraev Sh.H., Rahimov A.M., Khujaniyozov J.B., Bekpulatov I.R. Low-energy ion implantation is a new method of obtaining of nanofilms of soliside// VI International conference IPEC-6, abstracts, Tashkent, 2013, P.77-80.

Автореферат «Til va adabiyot ta’limi» журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди (16.04.2018 йил).

Босишга рухсат этилди: 25.05.2018 йил.
Бичими 60x84 $^{1}/_{16}$, «Times New Roman» гарнитурада рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табоғи 3. Адади: 100. Буюртма: № 185.

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.