

**ҚАРШИ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ХУЗУРИДАГИ
ИЛМЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 РАҚАМЛИ ИЛМЙ КЕНГАШ**

ҚАРШИ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

НОРМУРОДОВ ДИЛШОД АБДУРАЗОҚОВИЧ

**КРЕМНИЙ МОНОКРИСТАЛЛИ СИРТИДА ОЛИНГАН ЮПҚА
МЕТАЛЛ СИЛИЦИДЛАРНИНГ ТУЗИЛИШИ, ЭЛЕКТРОН ВА
ОПТИК ХУСУСИЯТЛАРИ ВА УЛАР АСОСИДА
ГЕТЕРОСТРУКТУРАЛАР ҲОСИЛ ҚИЛИШ**

01.04.04 – Физик электроника

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

Қарши – 2022

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

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

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

Нормуродов Дилшод Абдуразоқович

Кремний монокристалли сиртида олинган юпқа металл силицидларнинг тузилиши, электрон ва оптик хусусиятлари ва улар асосида гетероструктуралар ҳосил қилиш..... 5

Нормуродов Дилшод Абдуразоқович

Формирование структур, электронные и оптические свойства тонких пленок силицидов металлов на монокристаллах кремния и гетероструктур на их основе..... 21

Normurodov Dilshod Abdurazokovich

Formation of the structure, electronic and optical properties of thin films of metal silicides on silicon single crystals and heterostructures based on them..... 39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 43

**ҚАРШИ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ХУЗУРИДАГИ
ИЛМЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 РАҚАМЛИ ИЛМЙ КЕНГАШ**

ҚАРШИ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

НОРМУРОДОВ ДИЛШОД АБДУРАЗОҚОВИЧ

**КРЕМНИЙ МОНОКРИСТАЛЛИ СИРТИДА ОЛИНГАН ЮПҚА
МЕТАЛЛ СИЛИЦИДЛАРНИНГ ТУЗИЛИШИ, ЭЛЕКТРОН ВА
ОПТИК ХУСУСИЯТЛАРИ ВА УЛАР АСОСИДА
ГЕТЕРОСТРУКТУРАЛАР ҲОСИЛ ҚИЛИШ**

01.04.04 – Физик электроника

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

Қарши – 2022

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2022.1.PhD/FM507 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Қарши давлат университети ва Тошкент давлат техника университетида бажарилган.
Диссертация автореферати уч тилда (Ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида (www.qarshidu.uz) ҳамда "ZiyoNet" Ахборот-таълим порталида (www.ziyounet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар: Нормурадов Мурадулла Тагаевич
физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар: Мамадалимов Абдуғофур Тешабоевич
физика-математика фанлари доктори, академик
Аликулов Муйсин Нортошев
физика-математика фанлари номзоди, доцент

Етакчи ташкилот: Андижон давлат университети

Диссертация химояси Қарши давлат университети ҳузуридаги илмий даражалар берувчи PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 рақамли илмий кенгашнинг 2022 йил "14" июли соат 16⁰⁰ даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 180103, Қарши шаҳри, Кўчабоғ кўчаси, 17-уй. Тел: (0 375) 225-34-13; факс: (0375) 221-00-56; e-mail: qarshidu@gmail.uz). Қарши давлат университети Бош биноси, 205-хона.

Диссертация билан Қарши давлат университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (103 рақами билан рўйхатга олинган). (Манзил: 180103, Қарши шаҳри, Кўчабоғ кўчаси, 17-уй. Тел./факс: (99875) 225-34-13; факс: (0375) 221-00-56; e-mail: qarshidu@gmail.uz).

Диссертация автореферати 2022 йил "02" июни кuni тарқатилди (2022 йил "02" июни даги № 2 рақамли рєєстр баённомаси).



Б.Э.Умврзаков
Илмий даражалар берувчи
Илмий кенгаш раиси ўринбосари,
ф.-м.ф.д., профессор

Г.Х.Аллаярова
Илмий даражалар берувчи
Илмий кенгаш илмий котиби,
ф.-м.ф.д., PhD.

А.К.Ташатов
Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш қошпидати
илмий семинар раиси,
ф.-м.ф.д., профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда ривожланаётган наноэлектроника соҳасида кичик ўлчамли наноплёнкалар олишга алоҳида аҳамият берилмоқда. Бугунги кунда жаҳон миқёсида ўтказилаётган тажрибалар таркибида металлнинг силицидли қатламлари ва нанофазалари мавжуд бўлган кўп қатламли юпка плёнкали МДЯ (металл – диэлектрик – яримўтказгич) ва ЯДЯ (яримўтказгич – диэлектрик – яримўтказгич) наноструктураларни, ҳамда бу структураларнинг фаза чегарасида омик контактлар ва тўсиқ қатламларини, электрон ва магнитли хотира қурилмаларни яратишда кенг истиқболга эга. Бу борада, кремний юзасидаги барий дисилициди ўзининг оптик хусусияти, фото-волтаик характеристикалари ва атмосфера ҳавосига бардошлилиги туфайли қуёш энергияси диапозонида фотоэлектрон ўзгартиргич қурилмаларни самарадорлигини оширишга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Дунёда яримўтказгичлар асосида металл силицидларни ҳосил қилишнинг турли усуллари қўлланилмоқда ва уларни такомиллаштиришга қаратилган илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда. Ушбу йўналишда монокристалл сирти ва сиртости соҳаларида актив металл ионлари таъсирида силицидлар ҳосил қилиш бўйича тадқиқотлар устувор ҳисобланмоқда. Шу билан бирга, Si юзасида ва юзаости соҳаларида MeSi ва MeSi₂ типдаги наноўлчамли структураларни олиш ва уларнинг таркиби, ўлчамлари, электрон ва кристалл структуралари, эмиссион ва оптик хусусиятларини ҳар томонлама тадқиқ этиш долзарб вазифалардан ҳисобланади.

Республикамызда наноэлектроника қурилмаларида ишлатиладиган наноструктура материаллари олишда актив металл ионлари имплантацияси ёрдамида монокристалл кремний сирти ва сиртости соҳаларида наноплёнкалар ҳосил қилинган. Наноўлчамли структуралар олишда ион имплантация усулидан ташқари магнетрон қурилмаси ёрдамида ион-плазма чанглантиш усулида монокристалл кремний сиртида актив металл ва кислород ионлари таъсирида юпка плёнкалар олинган. Уларни электрон тузилиши, электрон эмиссияси ва оптик хусусиятларини ўрганиш бўйича вазифалар белгиланган. Ушбу вазифаларни амалга оширишда, хусусан, ўрганилаётган металл силицид плёнкаларни кристалл тузилиши, таркиби, энергетик зоналарининг асосий параметрларини билиш муҳим илмий-амалий аҳамият касб этади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”¹ги Фармони, 2017 йил 13 февралдаги ПҚ-2772-сон “2017-2021 йилларда электротехника саноати бошқарувини жадал ривожлантириш ва диверсификациялашни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон “Фанлар академияси фаолияти, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш,

¹ Ўзбекистон Республикаси Президентининг Фармони, 07.02.2017 йилдаги ПФ-4947-сон

бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги, 2019 йил 22 августдаги ПҚ-4422-сон “Иқтисодиёт тармоқлари ва ижтимоий соҳанинг энергия самарадорлигини ошириш, энергия тежовчи технологияларни жорий этиш ва қайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантиришнинг тезкор чора-тадбирлар тўғрисида”ги қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация иши муайян даражада хизмат қилади.

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

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Наноўлчамли фазалар ва плёнкаларни олиш ва уларнинг хусусиятларини ўрганиш соҳасида дунёнинг машҳур олимлари иш олиб боришмоқда. Россиялик олимлар М.В.Гомоюнова, Г.С.Гребенюк ва бошқалар (РФА нинг А.Ф.Июффе номидаги Физика-техника институти, Санкт-Петербург) томонидан хона температураси шароитида Si (111) юзасида Co плёнкаси ўсишининг бошланғич босқичлари тадқиқ қилинган. Улар 300-500 °C температура интервалида юзанинг 25 Å чуқурлигига Co ни киритиш билан олиб бориладиган намунани қиздириш жараёнида каттик фазали CoSi₂нинг яримўтказгичли CoSi₂га айланишини кўрсатиб беришди. Д.И.Тетельбаум ва бошқалар (Россия фанлар академиясининг Микроструктуралар физикаси институти, Россия, Нижний Новгород шаҳри) томонидан SiO₂да кремний нанокристаллари системасининг люминесцент хусусиятларига Менделеев даврий жадвалидаги учинчи ва бешинчи гуруҳ элементлари аралашмалари таъсирининг мумкин бўлган механизмларини тадқиқ қилишди. Ушбу тадқиқотлар натижасида фотолюминесценция кучайиши ва сусайишининг легирловчи аралашма турига, шунингдек, имплантациядан кейинги термо ишлов бериш шароитларига боғлиқ эканлиги аниқланди. В.Л.Дубов, Д.В.Фомин ва бошқалар (Амур Давлат университети, Россия, Благовешенск шаҳри) BaSi₂/Si наноплёнкаларини фотоэлектрик ўзгартиргичлар, хусусан қуёш элементлари сифатида ишлатиш мумкинлигини тажрибада исботлашган.

Ҳозирги вақтда кремний юзасидаги юпка барий дисилициди плёнкалари катта қизиқиш билан ўрганилмоқда. Япон олимлари Hara K.O., Nakagawa Y. ва бошқалар (Center for Crystal Science and Technology, University of Yamanashi, 7-32 Miyamae, Kofu, Yamanashi 400-8511, Japan) назарий йўл билан (2Ba²⁺) (Si₄)⁴⁻ типидagi ион боғланиш билан тетрoэдрик Si₄ нинг ковалент боғланишлари бўлган *Zintl* фазасига тегишли эканлигини аниқлашди. Молекуляр орбиталар диаграммаси электрон структуралар асосида тушунтириб берилди ва бунда заряд Si нинг *p* – ҳолатидан Ba нинг *d* – ҳолатига ўтиши оптик ютилишни сезиларли даражада оширади деб ҳисобланади. Кремнийнинг барча кимёвий

диапазонлари ва ўсиш температураси диапазонлари учун Ферми сатҳи таққиланган зона ўртасида жойлашган бўлиб, бу $p-n$ – ўтишларни олиш учун афзал бўлган биполяр легирлаш имкониятларини очиб беради. Америкалик олимлар W.Theis ва R.M.Tromp 650°C температура шароитида гомоэпитакциал ўсиш жараёнида Si (001) сирти топографиясини тадқиқ қилишди ва “асосий” оролча чўққисида ҳосил бўладиган марказлар зичлиги профилини аниқлашди. Иваненко Л.И., Шапошников В.Л. ва бошқалар (Белорусс Давлат университети информатика и радиоэлектроника факультети) силицид плёнкали материаллардан кенг фойдаланиш имкониятларини кўрсатиб беришди. A.L.Schmitt, J.M. Higgins ва бошқалар (Висконсин-Мэдисон Университети, Кимё кафедраси, США.) Si сиртидаги металллар силицидларининг электрон ва кристалл структураларини ўрганишди ва улардан термоэлектрон материаллар сифатида ишлатиш мумкинлигини кўрсатиб беришган.

Тошкент Давлат техника университети олимлари (М.Т.Нормурадов, Б.Е.Умирзаков, А.С.Рисбаев ва бошқалар) биринчи марта ион имплантация усулида Si, GaAs, CdTe ва SiO_2 тагликлариди турли чуқурликда металл силицидларнинг наноўлчамли фаза ва қатламларини олишди ва MeSi_2 нинг квант-ўлчамли эффектлар намоён бўладиган нанокристалл фазалари ўлчамларини аниқлашди. Лекин ушбу диссертация иш бошлангунгача ион-плазмали усулда олинган фаол металллар силицидларининг таркиби, структуралари, электрон ва оптик хусусиятлари кам ўрганилган ва амалда Si юзаости қатламларида яратилган BaSi_2 нанофазалари ва қатламларнинг зона-энергетик параметрлари деярли ўрганилмаган.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Қарши давлат университети илмий-тадқиқот ишлари режасининг АИФ-1/7-сонли “Қарши давлат университети ва Қашқадарё вилоятидаги ишлаб чиқариш корхоналари ўртасида талабаларни ўқитиш сифатини яхшилашга қаратилган муносабатларни мустаҳкамлаш” мавзуидаги (2019-2021 й.) халқаро лойиҳаси доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади Si юзасида ва юзаости соҳаларида металл силицидларнинг гетероструктуравий фазалари ва қатламларининг шаклланиш қонуниятларини, уларнинг таркиби, структуралари ва физик хусусиятларини очиб беришдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

кейинги қиздириш орқали ион имплантация усулида олинган металл силицидлар юзасининг таркиби ва кристалл структураларини ўрганиш;

актив металллар ионлари билан имплантация қилинган Si ва SiO_2 лар учун чуқурлик бўйича легирланган элементлар атомлари тақсимланишининг концентрацион профилларини ўрганиш;

SiO_2/Si плёнкаларини олиш ва уларнинг таркиби, структуралари, электрон ва оптик хусусиятларини ўрганиш;

Ba^+ ва O_2^+ ионлари билан имплантация қилинган Si монокристаллари валент электронлари ҳолатлари зичлиги ва зона-энергетик параметрларини аниқлаш;

Si юзасида ва юзаости соҳаларида ҳосил қилинган BaSi₂нинг наноўлчамли фазалари ва қатламларининг таркиби ва электрон структураларини ўрганиш ва Si/BaSi₂/Si(111) зона-энергетик диаграммаларини куриш;

магнетрон чанглатиш орқали ион имплантация ва пуркаш методлари ёрдамида икки қатламли BaSi₂/Si/BaSi₂/Si(111) системаларни олиш ва уларнинг хусусиятларини ўрганиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида кремний монокристаллари ва плёнкалари, шунингдек кремний оксиди танлаб олинган.

Тадқиқотнинг предмети Si ва SiO₂ юзаларида Li⁺, Na⁺, K⁺, Rb⁺, Cs⁺ ва Ba⁺ элементларининг юпқа наноўлчамли плёнкаларининг ҳосил бўлиш жараёнлари, шунингдек, уларнинг структуралари ва физик хусусиятлари ташкил этган.

Тадқиқотнинг усуллари. Диссертацияда электрон оже-спектроскопияси (ЭОС), эластик сочилган электронлар спектроскопияси (ЭСЭС), характерли энергия йўқотган электронлар спектроскопияси (ХЭЙЭС), фотоэлектронлар спектроскопияси (ФЭС), ультрабинафша фотоэлектрон спектроскопия (УФЭС), растрли электрон микроскопия (РЭМ) ва кичик энергияли электронлар дифракцияси (КЭЭД) каби таҳлил усулларида фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги куйидагилардан иборат:

кичик дозаларда ($D=5 \cdot 10^{14}$ ион·см⁻²), $E_0 = 0.5 - 5$ кэВ энергия интервалида Ba⁺, ишқорий металллар ва кислород билан имплантация қилинган монокристалл кремнийда, матрица ва легирловчи элемент атомлари орасида кимёвий боғланишлар пайдо бўлиши кўрсатиб берилган;

ионлар дозалари ($D=D_T$) тўйиниш дозасига тенг бўлганда бир жинсли легирланган қатлам шаклланиши орқали ушбу қатлам оптимал температурада (450-500 °С) 30-40 дақиқа мобайнида қиздирилганда яхши стехиометрияга эга, қалинлиги 30–60 Å бўлган MeSi₂ типидagi силицидлар ҳосил бўлиши аниқланган;

Ba⁺ ионлари билан имплантация қилиш жараёнида SiO₂ учун ҳақиқий иккиламчи электронлар эмиссияси (ИЭЭ) коэффиценти δ_m ва уларни чиқиш чуқурлиги λ орасида боғланиш мавжудлиги аниқланиб, SiO₂ ни Ba⁺ ионлари билан легирлаш жараёнида λ – ИЭЭнинг чиқиш чуқурлиги икки марта ортиши ва $\lambda \approx 600 - 650$ Å га тенг бўлиши тажриба натижасида аниқланган;

тажрибада ион имплантация ва магнетрон қурилмаси ёрдамида ион-плазма чанглатиш усуллари билан Si нинг сиртости соҳаларида BaSi₂нинг “яширин” қатламлари олиниши орқали BaSi₂ нанофазаларининг квант ўлчам эффектлари намоён бўладиган ўлчамлари аниқланган.

Тадқиқотларнинг амалий аҳамияти куйидагилардан иборат:

ион имплантация жараёнида Si электрон структурасидаги ўзгаришларга олиб келадиган асосий механизмлар, ўзаро боғлиқ бўлмаган турли электрон спектроскопик усуллар ёрдамида аниқланган;

Ион имплантация ва магнетрон ўтқозиш усуллари билан Si нинг юзаости соҳаларида BaSi₂ нинг яширин қатламларини олиш усули ишлаб чиқилган;

Si нинг юза ва юзаости соҳаларида MeSi_2 типдаги силицидларни олиш учун ион имплантацияси (энергия, доза ва ион типи) ва кейинги қиздиришнинг оптимал режимлари аниқланган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги юпка металл плёнкалар замонавий стандарт усуллар ва қурилмаларда олинганлиги билан изоҳланади. Морфология, кристалл структура ва панжара доимийлари тўғрисида маълумотлар олиш мақсадида диссертация ишида стандарт РЭМ ва ИК-Фурье спектрофотометр IRTracer-100 қурилмалардан фойдаланилди. Таҷрибалар юқори вакуумда амалга оширилди ва тоза кремний учун олинган натижалар бошқа муаллифлар томонидан олинган натижалар билан катта аниқликда тўла мос келади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти Кремний юза ва юзаости қатламларида наноўлчамли структураларнинг шаклланиш механизмларини ва юпка плёнкалар назариясини ривожлантириш учун муҳим аҳамиятга эга бўлган валент электронлар спектридаги ўзига хос хусусиятлар табиатини аниқлаш билан изоҳланади;

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти берилган физик хусусиятларга эга бўлган наноўлчамли фаза ва қатламлар бўйича олинган натижалар: уч ўлчамли интеграл схемалар учун зарур бўлган махсус наноўлчамли ЯДЯ – структураларни; мукамал наноконтактлар ва ҳимоя қатламларини; опто-наноэлектроника қурилмаларини олишда катта амалий аҳамият касб этиши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалиётга жорий қилиниши. Кремний монокристалли сиртида металл силицидлар юпка қатламлари структураларининг шаклланиши, уларнинг электрон ва оптик хусусиятларини тадқиқ қилиш натижалари ва олинган гетероструктуралар асосида:

кичик дозаларда ($D=5 \cdot 10^{14}$ ион $\cdot\text{см}^{-2}$), $E_0 = 0.5 - 5$ кэВ энергия интервалида Ba^+ , ишқорий металллар ва кислород билан имплантация қилинган монокристалл кремнийда, матрица ва легирловчи элемент атомлари орасида кимёвий боғланишларнинг пайдо бўлишига доир хулосаларидан “Ўзэлтехсаноат” АКнинг “Фотон” АЖ да кремний ва кремний оксиди юзаси ва юзаости қатламларида наноўлчамли структуралар шаклланишининг асосий қонуниятларини ўрганишда фойдаланилган (“Фотон” аксиядорлик жамиятининг 2022 йил 27 апрелдаги № 142-сонли маълумотномаси). Натижада ион-имплантация ва магнетрон чанглатиш усуллари билан Si нинг сиртга яқин ҳудудида яширин BaSi_2 қатлами олинган. BaSi_2 нанофазаларининг ўлчамлари аниқланган ва бунда квант ўлчамли эффектлар намоён бўлиши кузатилган. Кремний намуналарига актив металллар ионларини имплантация қилганда ундаги хусусий киришмали атомларнинг чуқурлик бўйича қайта таксимланиши уларнинг турига боғлиқ ҳолда концентрацияси ёки ион-легиранган қатламда ёки Si нинг легиранмаган ҳудудида ортишини аниқлаш имконини берган;

ионлар дозалари ($D = D_T$) тўйиниш дозасига тенг бўлганда бир жинсли легиранган қатлам шаклланиши орқали ушбу қатлам оптимал температурада (450-500 °C) 30-40 дақиқа мобайнида қиздирилганда яхши стехиометрияга

эга, қалинлиги 30–60 Å бўлган MeSi_2 типдаги силицидлар ҳосил бўлиши аниқланганлиги бўйича олинган натижалар ОТ-Ф2-53 рақамли “Кванотова-размерные эффекты и электронные свойства двухслойных наноразмерных структур, созданных на поверхности и приповерхностной области пленок A^3B^5 и A^2B^6 ” номли фундаментал лойиҳасини бажаришда қўлланилди (Ислом Каримов номидаги Тошкент давлат техника университети ректорининг 2022 йил 28 апрелдаги № 01/9-14-1343 сон маълумотномаси). Натижада яратилган механизм бўйича олинган натижалар GaAs, CdTe, CdS, GaMeAs, CdMeTe ва CdMeS структураларининг энергетик зона кенглиги эгилиши ва асосий сатҳдаги силжишларини тушунтириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари 8 та халқаро ва 3 та Республика илмий-амалий анжуманларида муҳокама қилинган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича 16 та илмий иш чоп этилган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 5 та мақола, жумладан, 2 та республика ва 3 таси хорижий журналларда нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйхати, 51 та расм, 9 та жадвалдан иборат. Диссертациянинг ҳажми 142 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида илмий тадқиқот ишининг долзарблиги ва зарурияти асосланган, Республика фан ва технологиялар ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, муаммонинг ўрганилганлик даражаси, диссертация ишининг мақсад ва вазифалари келтирилган, объект ва предметлари тавсифланган, тадқиқотнинг илмий янгилиги кўрсатилган, натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти келтирилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган илмий ишлар, диссертация ҳажми ва тузилиши бўйича қисқача маълумотлар келтирилган.

Биринчи боб “Силицид плёнкаларининг структура ва хусусиятларини тадқиқ қилиш бўйича адабиётлар таҳлили” деб номланган бўлиб, бу боб кремний юзаости қатламларида кремний силицидларининг шаклланиш жараёнлари тўғрисида ишончли маълумотлар олиш мақсадида ўтказилган илмий тадқиқот ишлари ва турли структурали қурилмаларни яратиш, ҳамда биринчи навбатда тоза кремний юзаларини олиш бўйича қисқача адабиётлар таҳлиliga бағишланган.

Асосий эътибор нанокристаллар электрон ва кристалл структураларидаги ўзгаришларга олиб келадиган наноўлчамларни камайтиришга қаратилган. Хусусан, кремний квант нуқталарининг тақиқланган соҳалари кенглиги кремний кристалли тақиқланган соҳаси кенглигидан икки марта катта.

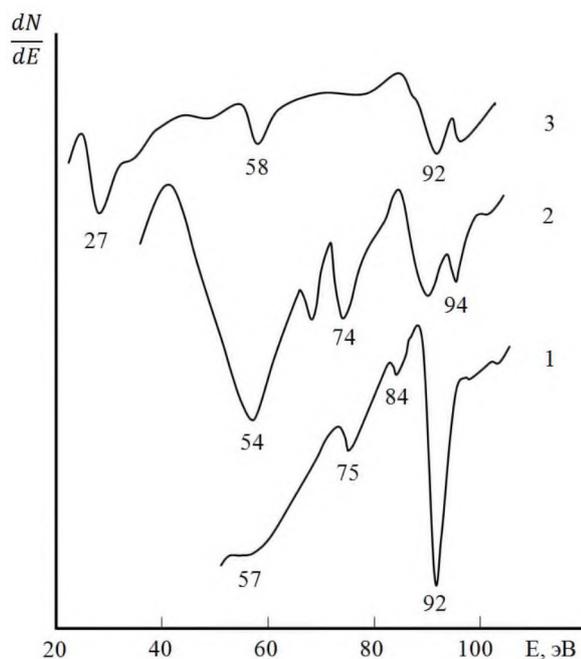
Бобнинг охирида келиб чиқадиган хулосалар берилган, тадқиқот мақсадлари ва вазифалари қўйилган.

Иккинчи боб “**Экспериментал тадқиқотлар**” деб номланган бўлиб, у электрон оже-спектроскопияси (ЭОС), эластик сочилган электронлар спектроскопияси (ЭСЭС), характерли энергия йўқотган электронлар спектроскопияси (ХЭЙЭС), фотоэлектронлар спектроскопияси (ФЭС), ультрабинафша фотоэлектрон спектроскопия (УФЭС), растрли электрон микроскопия (РЭМ) ва кичик энергияли электронлар дифракцияси (КЭЭД) каби комплекс методлардан фойдаланган ҳолда намуналар сиртининг физик-кимёвий хусусиятларини тадқиқ қилиш масалаларига бағишланган.

Металларнинг юпқа плёнкаларини олиш учун стандарт магнетрон чанглантиш системаси EPOS-PVD-DESK-PRO дан фойдаланилди. Алохида экспериментлар LAS-2200 типдаги юқори вакуум қурилмасида ўтказилди. Диссертация ишида кристалл структура, морфология ва панжара параметрлари тўғрисида маълумотлар олиш учун РЭМ ва IRTracer-100 ИК-Фурье спектрометр каби стандарт қурилмалардан фойдаланилди. Турли технологик жараёнлардаги Si юзасидан чиқиш ишининг ўзгаришлари контакт потенциаллар фарқи усулида аниқланди. Ушбу ишда фойдаланилган ҳар бир тадқиқот усули учун характерли бўлган хатоликлар манбалари муҳокама қилинди.

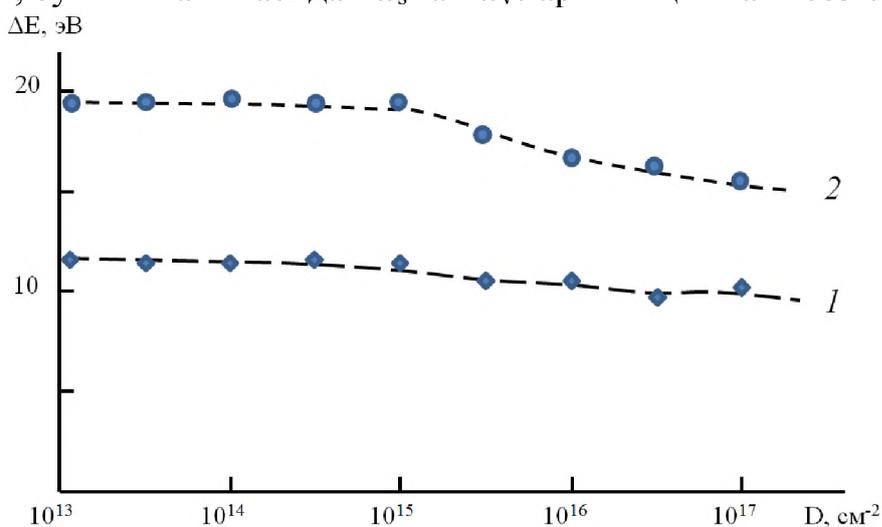
“Ион имплантация ва ион-плазмали чанглантириш методлардан фойдаланган ҳолда Si ва SiO₂ сиртида наноўлчамли структураларни ҳосил қилиш” номли учинчи боб паст энергияли турли дозалардаги Li⁺, Na⁺, K⁺, Rb⁺, Cs⁺ и Ba⁺ ионлари билан имплантациянинг Si (111), Si (100) монокристалл плёнкалар юзасининг элемент ва кимёвий таркиби, ҳамда кристалл структураларига таъсирини ўрганишга бағишланган.

1-расмда тоза кремний (1-спектр) ва юқори дозада ($D = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$) 1 кэВ энергияли натрий (3-спектр), барий (2-спектр) ионлари билан имплантация қилинган кремний учун Оже-спектрлар келтирилган. Расмдан кўришиб турибдики, имплантация қилинган аралашма атомлари кремний билан кимёвий боғланиш ҳосил қилади. Олинган бирикмалар типини компьютер дастури ёрдамида баҳолаш учун элемент оже-сезгирлик коэффициентларини ҳисобга олган ҳолда ҳисоблаш йўли билан олинган имплантацияланган атомлар тақсимотининг чуқурлик бўйича концентрацион профиллари аниқланди. Шунингдек, тажриба йўли билан ион имплантация қилинган Si намуналарини юқори дозада 2-4 дақиқа 700-1000 К температурада қисқа муддатли қиздириш боғланмаган аралашма атомларининг десорбциясига олиб келиши, қолган атомларнинг эса Si атомлари билан бирга кимёвий боғланишларга киришиши аниқланди. Шуни таъкидлаш лозимки, BaSi бирикмаси ва, шунингдек, имплантация қатламида ҳосил бўлувчи CsSi, NaSi, LiSi ва RbSi) бирикмалар, нормал валентлик коидаларига мос келмайди ва кремний атомлари орасидаги қисқартирилган масофа билан характерланади, бу эса Si-Si боғланишнинг ковалент боғланиш типига тўғри келишини кўрсатади. Барий, худди барча ишқорий элементлар каби кремнийга донор сифатида кириб, кремний атомларининг sp^3 -конфигурациясига стабилловчи таъсир кўрсатади ва бу билан Si-Si ковалент боғланишни мустаҳкамлайди.



1-расм. Тоза кремний учун (1-спектр) ва юкори дозада ($D = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$) 1 кэВ энергияли барий (2-спектр), Na (3-спектр) ионлари билан имплантация қилинган кремний учун Оже спектрлари.

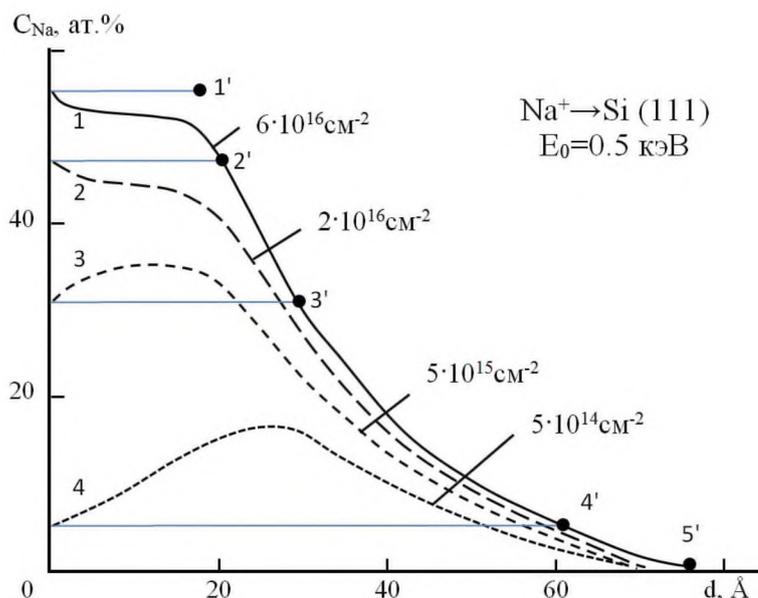
2-расмда $E_0=1$ кэВ энергияли Ba^+ ионлари билан легирланган Si (111) учун сиртий ($\hbar\omega_s$) ва ҳажмий ($\hbar\omega_v$) плазмонларнинг уйғотилишидаги йўқотиладиган энергия қийматлари ΔE нинг нурланиш дозасига боғлиқлик графиклари келтирилган. Кўриниб турибдики, ΔE нинг қиймати кичик дозаларда ($D \leq 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$) сезилар-сезилмас камаяди. Бу Si (111) сирт қатламидаги тартибсизлашишлар билан боғлиқ бўлса керак. Ионлар дозасининг кейинги ортиши тартибсизлашишлар билан биргаликда ион-легиранган қатламларнинг барий атомлари билан бойиши ва стехиометрик бўлмаган барий силицидларининг ҳосил бўлишига олиб келади, бунинг натижасида $\hbar\omega_s$ ва $\hbar\omega_v$ ларнинг қиймати сезиларли



2-расм. $E_0=1$ кэВ энергияли Ba^+ ионлари билан легирланган Si (111) учун сиртий ($\hbar\omega_s$) ва ҳажмий ($\hbar\omega_v$) плазмонларнинг уйғотилишидаги йўқотиладиган энергия қийматлари ΔE нинг нурланиш дозасига боғлиқлиги.

даражада камаяди. Бу ўзгаришлар $D_A \approx (8-10) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ гача бўлган дозаларда кузатилади. Бунда $\hbar\omega_s$ ва $\hbar\omega_v$ ларнинг қиймати χ сатҳда мос равишда 10.3 ва 15.2 эВ ни ташкил қилади.

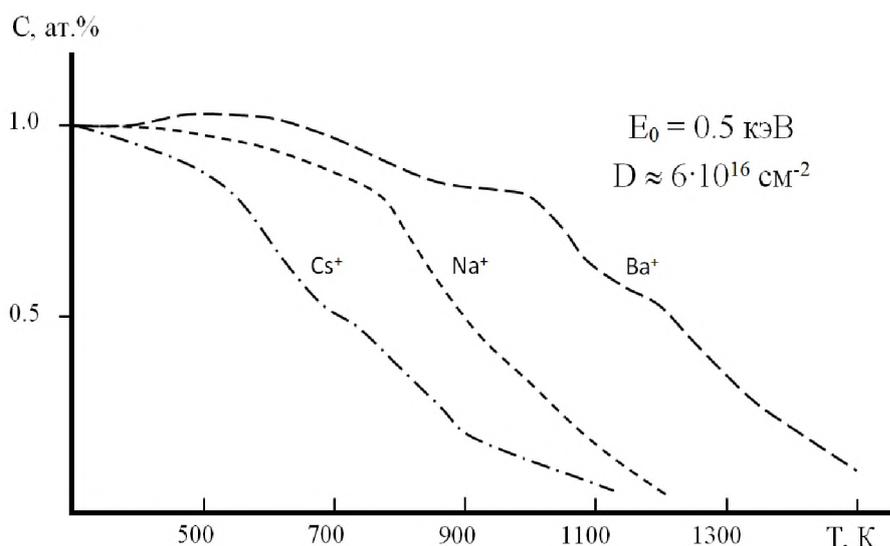
Юқори дозаларда кичик энергияли нурланиш билан легирланган кристалларнинг юзаости қатламларининг аралашма атомлар концентрацияларига боғлиқлик графикларини шартли равишда уч соҳага ажратиш мумкин (3-расм). $d = 25 - 30 \text{ \AA}$ чуқурликкача Na деярли текис тақсимланади.



3-расм. Турли дозалардаги Na^+ ионлари билан легирланган Si учун $C_{\text{Na}}(d)$ боғлиқлиги.

Бу қатламларда Na нинг концентрацияси 50-60 ат.% гача етади ва уларда асосан натрий моносилициди ва ортикча натрий атомлари мавжуд бўлади. Бунинг натижасида ўтказувчанлик зонаси туби яқинида электронлар билан тўлган тор зона пайдо бўлади ва ўтказувчанлик зонаси сиқилади. $d = 30 - 70 \text{ \AA}$ қалинлик интервалида натрий концентрацияси дастлаб тез, сўнгра нисбатан секин камая бошлайди. Ва бунинг натижасида зона структурасида қалинлик ўзгаради. Шундай қилиб, d ортиши билан янги зонанинг йўқолиши, E_g ва κ катталикларнинг ортиши кузатилади.

Худди шундай натижалар натрий ва цезий ионлари билан легирланган кремнийни қиздиришда ҳам олинди (4-расм). Бу ҳолда аралашма атомлари диффузияси ва десорбцияси жараёнлари барий ионлари билан легирланган кремний ҳолатига нисбатан паст температураларда содир бўлди. Масалан, NaSi нинг бўлиниши 800 K, NaSi_2 ники эса 900 K температуралардан бошлаб содир бўла бошлайди. Cs ионлари холида аралашма атомларининг десорбция температураси (500-550 K), ҳамда CsSi (600 K) ва CsSi_2 (700 K) силицидларнинг бўлиниш температуралари нисбатан юқори эмас ва бу жараёнлар унча катта бўлмаган температура интервалларида содир бўлади. Шу сабабли $C_{\text{Cs}}(T)$ боғланиш графигида нозик структуралар ёрқин намоён бўлмайди (4-расм).



4-расм. Ион-легируланган кремнийдаги легируланган атомлар сиртий концентрацияларига изохрон киздириш температурасининг таъсири. C_{300} -300 Кдаги концентрация.

1-жадвалда шаклланиш режимлари (Siнинг дастлабки структураси, ионлар энергиялари, кейинги киздириш температуралари) ва ион кремний намуналарни киздириш жараёнида юзага келадиган ишқорий элементлар силицидларининг юзавий структуралари типи, шунингдек, кремнийнинг дастлабки структураси ва силицид қалинлиги, ҳамда плёнканинг тикланиш температуралари келтирилган. Шунинг таъкидлашимиз лозимки, бундай юзавий структуралар 2-5 кэВ энергияларда имплантация қилинган намуналарни киздиришда ҳам кузатилади. Фарқ шундаки, юзавий структураларни шаклланиши учун мос температураларда узоқ муддатли киздириш талаб қилинади (қанча катта бўлса энергия ҳам шунча юқори бўлади). Кремний юзасининг дастлабки қирраси ва ишқорий элементларнинг имплантация қилинган ионлари типига боғлиқ равишда турли типдаги ўта юқори структуралар ҳосил бўлади.

1-жадвал

Барий ва калий силицидлари, барий дисилициди юпқа наноўлчамли плёнкалари шаклланишининг оптимал режимлари

Силицид тип	KSi	BaSi	BaSi ₂
Параметрлари			
Дастлабки Si структураси	100	100 111	100 111
Ионлар энергияси, кэВ	0.5-5	0.5-5	0.5-5
Киздириш температураси, К	800-850	800-900	1000-1100
Силицид қалинлиги, Å	35-95	35-85	35-85
Ўта структура тип	2x1	2x2 1x1	2x2 1x1
Электронлар энергияси E_p , эВ	49	38 43	38 43
Дастлабки структурани тиклаш T, К	1200	1300	1300

Ba^+ ионлари билан имплантация қилингандан сўнг спектрда куйидаги ўзгаришлар содир бўлади: чўққининг ҳолати ва шакли ўзгаради, янги хусусиятлар пайдо бўлади, эффе́ктив та́ксимланиш коэффи́циенти кенглиги ва фотоэлектронларнинг квант чиқиши ортади.

Электрон оже-спектроскопия (ЭОС) натижалари шуни кўрсатадики, киритилган барий атомларининг асосий қисми (80-85 %) кремний атомлари билан кимёвий боғланишга киришиб барий силицидни ҳосил қилади. Бу ҳол, бизнингча сирт энергетик параметрларининг ўзгаришига ва энергетик зоналарнинг эгилишига олиб келади. Кимёвий бирикмалар ҳосил бўлиши жараёнида барий атомлари электронлар донори, кремний атомлари эса акцептор ҳисобланади.

Валент электронларнинг қисман барийдан кремнийга ўтиши натижасида кремнийнинг валент зонасида электронлар ҳолат зичликларинг қайта тақсимо́ти содир бўлади. Кремний атомлари билан кимёвий боғланишга киришмаган барий атомлари яримўтказгичнинг тақиқланган соҳасида донор типдаги аралашма сатҳини юзага келтиради. Юқори дозаларда донор сатҳларнинг ажралиши содир бўлади ва ўтказувчанлик зонаси тубида электронлар билан тўлган тор соҳа юзага келади.

2-жадвал

То́за ва леги́рланган кремний энергетик зоналарининг асосий параметрлари

Параметрлар	Нурлантирилмаган р-типдаги Si	Ионлар билан леги́рланган Si,	
		Ba	O ₂
Φ , эВ	5.2	2.4	9.7
φ , эВ	4.8	2.4	5.1
δ_s , эВ	0.4	1.1	4.6
V_s , эВ	0.3	0	0
E_g , эВ	1.1	0.8	9
χ , эВ	4.1	2.4	0.7

Ион имплантация қилинганда зона параметрларининг, зоналараро электронлар тақсимо́ти ва кремний фотоэлектронлари квант чиқиши катталиклари ўзгаришларига олиб келиши аниқланди.

3-жадвал

Ион-леги́рланган қатламларнинг турли чуқурликлари учун зона параметрлари

№	Кимёвий боғланиш типи	Φ , эВ	φ , эВ	δ_s , эВ	E_g , эВ
1	BaSi	2.4	2.4	1.1	0.8
2	BaSi	2.5	2.5	1.1	0.8
3	BaSi+ BaSi ₂	3.8	2.8	1	1.1
4	BaSi ₂ + Si	4.2	3.5	0.7	1.1
5	Si+Ba	4.5	4.5	0.4	1.1

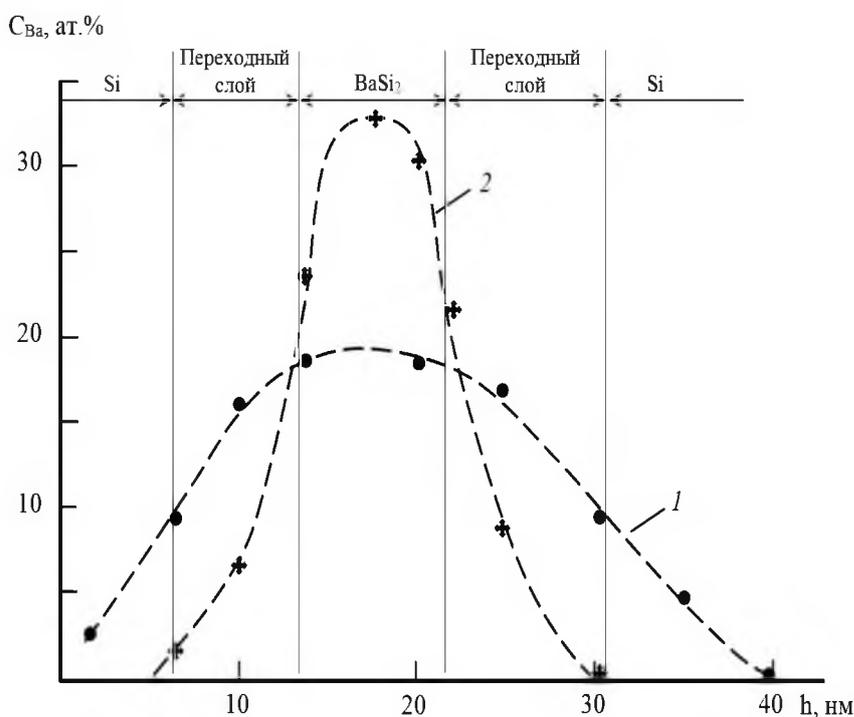
Кузатилаётган ўзгаришлар кремний ва легирловчи элемент атомлари орасидаги кимёвий боғланиш орқали тушунтирилади, чунки бу ҳолда имплантация қилинаётган элементларнинг боғланмаган атомлари мавжуд эканлиги туфайли тақиқланган зонада янги электрон ҳолатлар юзага келади.

$E_0 = 0,5 \text{ кэВ}$ энергияли юқори дозадаги Ba^+ ионлари билан легирланган кремнийнинг $20 - 25 \text{ \AA}$ қалинликдаги юзаости соҳаларида легирловчи аралашма ва матрица атомларининг бир жинсли тақсимоти юзага келади.

Тўртинчи боб “**Si**да Ba^+ ни имплантацияси орқали икки қатламли нанофаза ва қатламларни олиш ва уларнинг таркиби ва электрон структураларини тадқиқ қилиш” деб номланган бўлиб, бу бобда $\text{Si}/\text{BaSi}_2/\text{Si}$ типидagi нано ўлчамли гетеросистемаларни яратиш мақсадида Si нинг турли чуқурликларида ҳосил қилинган наноўлчамли BaSi_2 фазалари учун олинган тажриба натижалари келтирилган.

Сининг юзаости қатламларининг турли чуқурликларида наноўлчамли BaSi_2 фазаси ва қатламлари 10^{-7} Па дан юқори бўлмаган вакуум шароитида $D = 10^{14} - 10^{17} \text{ см}^{-2}$ дозаларда энергияларини $20 - 40 \text{ кэВ}$ энергия интервалида ўзгартириш орқали Ba^+ ионлари билан имплантация қилиш орқали олинди.

5-расмда 10^{17} см^{-2} тўйиниш дозасида $E_0 = 20 \text{ кэВ}$ энергияли Ba^+ ионлари билан легирланган ва легирлашдан сўнг 40 дақиқа мобайнида қиздирилган Si (111) учун h чуқурлик бўйича Ванинг тақсимоти концентрацион профиллари келтирилган. Оже спектрлар таҳлили шуни кўрсатдики, $h = 16 - 18 \text{ нм}$ чуқурликда боғланиш эгри чизиқлари максимумдан ўтар экан. Қиздиришгача ўлчанган

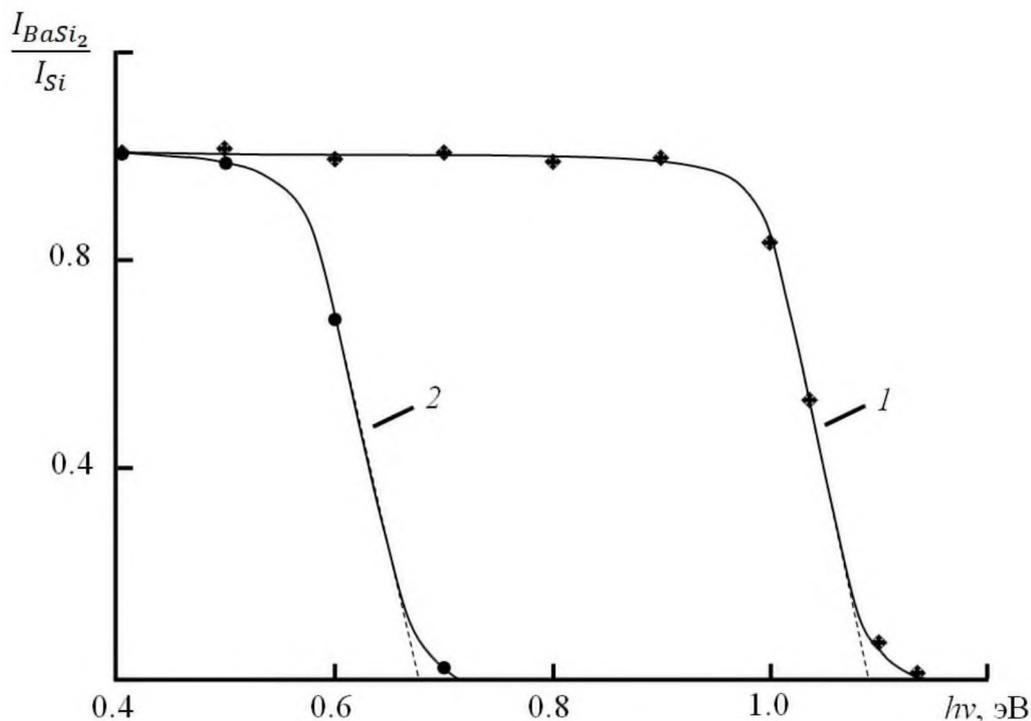


5-расм. $D = 10^{17} \text{ см}^{-2}$ да энергия $E_0 = 20 \text{ кэВ}$ бўлган Ba^+ ионлари билан имплантация қилинган Si нинг h чуқурликдаги Ba атомларининг тақсимланиш профиллари: 1 – қиздирилгунга қадар; 2-900 К да қиздирилгандан кейин.

$C_{Ba}(h)$ боғланиш графигида, ~ 20 ат.% концентрацияли кенг максимум кузатилади. Қиздиришдан сўнг, максимум соҳасида 30-35 ат.% гача атомлар концентрацияларининг ортиши содир бўлади ва $C_{Ba}(h)$ тақсимоти эгри чизиғи кенглиги сезиларли равишда камаяди. Бунда $L_{2,3}VV (E=92 \text{ эВ})$ кремний оже чўққиси $BaSi_2$ учун характерли бўлган $\sim 96 \text{ эВ}$ энергиягача силжийди. 2-эгри чизикдан кўринадики, $BaSi_2$ қатламининг кенглиги $\sim 10-12 \text{ нм}$ ни ташкил қилади. $Si/BaSi_2/Si$ чегараларида $\sim 6-8 \text{ нм}$ қалинликдаги ўтиш қатлами шаклланади, бу эса, $CoSi_2/Si/CoSi_2$ холидагидан етарлича катта.

Бу система учун 6-расмда I_{BaSi_2}/I_{Si} нинг фотонлар энергияси $h\nu$ га боғланиш графиги келтирилган. Бу ерда I_{Si} ва I_{BaSi_2} – тоза Si (111) ва очик $BaSi_2$ қатламли Si (111) орқали ўтаётган ёруғлик интенсивликлари.

6-расмдан кўринадики, тадқиқ қилинаётган намуналарда ёруғлик интенсивлиги $h\nu$ нинг маълум қийматларигача амалда деярли ўзгармайди. Тоза Si холида I нинг кескин камайиши $h\nu \approx 1 \text{ эВ}$ дан бошланади, $BaSi_2$ нанокатламли кремнийда эса $h\nu 0.55 \text{ эВ}$ лардан бошланади. Бу эгри чизиклар қисмларининг ўқиға $h\nu$ экстраполяцияси тақиқланган соҳанинг тахминий кенглигини беради. Кўриниб турибдики, тоза Si учун $E_g \sim 1.1 \text{ эВ}$ ни, $BaSi_2$ учун эса $\sim 0.67 \text{ эВ}$ ни ташкил қилади. Унча катта бўлмаган дозаларда ($D \leq 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) Ba^+ ионлари билан имплантация қилинган Si ни киздиргандан сўнг юзаости қатламларида $BaSi_2$ нанокристалл фазаларининг тартиб билан жойлашиб шаклланиши кузатилади.



6-расм. Тоза Si (1-эгри чизик) ва $BaSi_2$ нано қатламли Si (2-эгри чизик) учун ўтаётган ёруғлик интенсивлигининг фотон энергиясига боғлиқлиги.

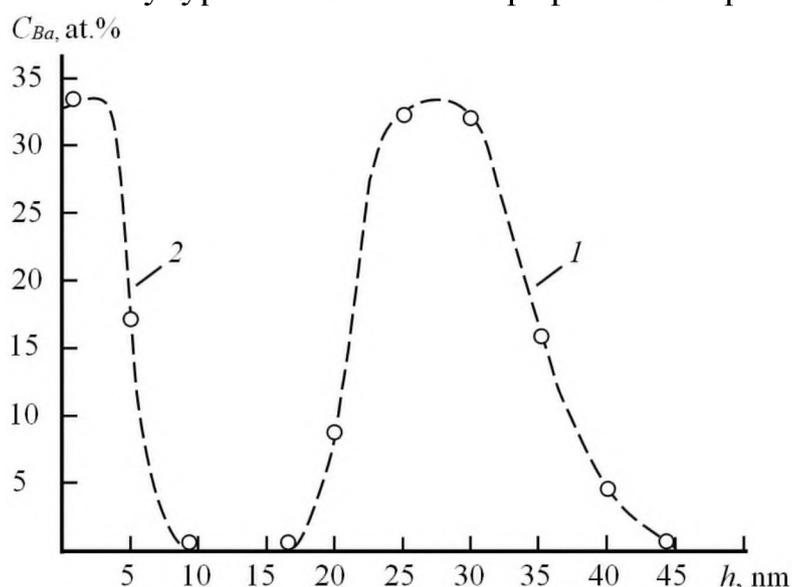
**Si (111) нинг турли чукурликларида BaSi₂ нанокристалларини
(НК) ҳосил қилиш учун ион имплантация ва термик
қиздиришнинг оптимал режимлари**

Тадқиқот объекти	$E_0 = 20$ кэВ				$E_0 = 30$ кэВ			
	$D, \text{см}^{-2}$	$T, \text{К}$	$d, \text{нм}$	$h, \text{нм}$	$D, \text{см}^{-2}$	$T, \text{К}$	$d, \text{нм}$	$h', \text{нм}$
Ba ⁺ →Si (111)	$5 \cdot 10^{14}$	950	6-8	16-18	$5 \cdot 10^{14}$	950	6-8	25-30
	10^{15}	950	8-10		10^{15}	1000	8-10	
	$5 \cdot 10^{15}$	1100	10-12		$5 \cdot 10^{15}$	1100	10-12	

4-жадвалда BaSi₂ нанокристалларини ҳосил қилиш учун Si(111) монокристаллининг турли икки чуқурлигида BaSi₂ нанокристалларини (НК) олиш учун ион имплантация ва термик қиздиришнинг оптимал режимлари келтирилган. Ионлар имплантациясининг ҳар бир циклидан кейин намуна мос температураларда 30 дақиқа мобайнида қиздирилди.

Жадвалдан кўринадикки, $E_0=30$ кэВ энергияли Ba⁺ ионлари билан имплантацияланган Si қиздиргандан сўнг, 25-30 нм чуқурликларда нанокристалл фазалар сфера кўринишида шаклланади. Ҳар икки ҳолда ҳам $D \approx 10^{15} \text{ см}^{-2}$ дозагача бу фазалар сферага яқин шаклга эга бўлади. D нинг кейинги ортишида кўшни фазалар чегаралари бир-бирини беркитади ва BaSi₂ қатлами ҳосил бўла бошлайди. Лекин қалинлик бўйича биржинсли BaSi₂ қатламининг шаклланиши дозаси $D \approx 10^{17} \text{ см}^{-2}$ га тенг бўлганда содир бўлади.

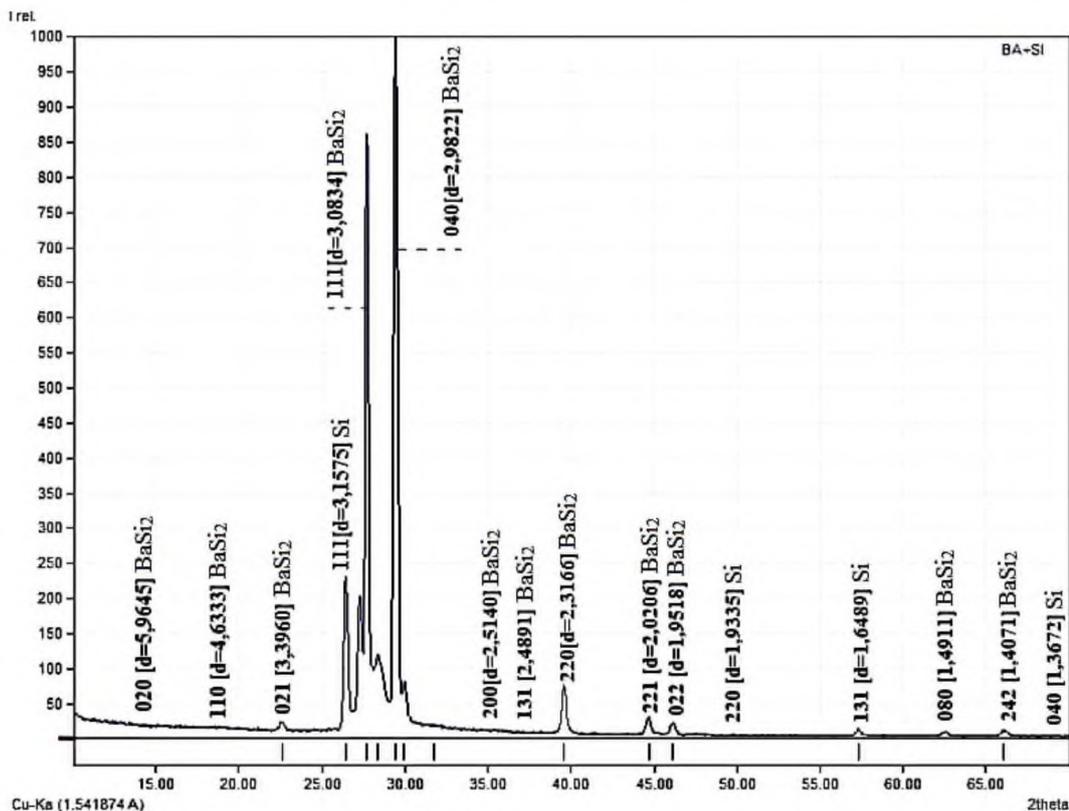
7-расмда $E_0=30$ ва 1 кэВ энергияли Ba⁺ ионлари билан имплантацияланган Si (111) учун C_{Ba} нинг h чуқурликка боғланиш графиги келтирилган. Ионлар



7-расм. $E_0 = 30$ кэВ – 1, ва 1 кэВ – 2 энергияли Ba⁺ ионлари билан имплантация қилинган Si учун чуқурлик бўйича Ba тақсимланишининг концентрацион профиллари. Ҳар бир циклдан сўнг имплантация $T \approx 900$ К да амалга оширилди.

имплантациясининг ҳар бир циклидан кейин намуна оптимал температураларда (900 К) 30-40 дақиқа мобайнида қиздирилди. Кўриниб турибдики, сиртда ва 20-30 нм чуқурликда Ва концентрациялари 30-35 ат.% ни ташкил қилади. Кремнийнинг $L_{2,3}VV$ оже-чўққиси ҳолати ва шаклини таҳлили шуни кўрсатдики, бу қатламларда $BaSi_2$ типдаги боғланишлар ҳосил бўлади.

8-расмда STOE “STADI P” (CoKa нурланиш) дифрактометрда $BaSi_2/Si/BaSi_2/Si(111)$ системаси учун олинган рентгенограмма келтирилган.



8-расм. $BaSi_2/Si/BaSi_2/Si(111)$ ситемаси сиртининг рентгенограммаси.

Кўриниб турибдики, рентгенограммада асосан $BaSi_2$ ва Si учун характерли бўлган кўп сондаги чўққилар кузатилади, бегона элементлар чўққилари деярли кўринмайди. Бундан келиб чиққан ҳолда ушбу система поликристалл структурага эга деб фараз қилиш мумкин. Бу фараз КЭЭД усули орқали олинган натижалар асосида тасдиқланди. ОЭС, УФЭС, РЭМ ва рентгеноструктуравий таҳлил усуллари кўллаган ҳолда қиздириш билан биргаликда Si да амалга оширилган Ba^+ ионлари имплантацияси усулида олинган наноплёнкали $BaSi_2/Si/BaSi_2/Si(111)$ системасининг таркиби, сирт морфологияси ва электрон структуралари тадқиқ қилинди. $Si/BaSi_2/Si$ системасининг зоналари энергетик параметрлари аниқланди ва энергетик зона диаграммалари чизилди. 0.5 кэВ дан 40 кэВ гача диапазондаги турли энергияларга эга бўлган Ba^+ ионлари учун $BaSi_2$ катлами қалинлиги ва бу катламнинг қандай чуқурликларда ҳосил бўлиши аниқланди.

ХУЛОСА

1. Кремний сиртида кейинги киздириш билан олиб бориладиган актив металллар ва кислород имплантацияси жараёнларида металл (MeSi ва MeSi_2) ва оксид силицидлар шаклланишининг асосий қонуниятлари ўрнатилди. Уларнинг таркиби, электрон ва кристалл структуралари ўрганилди;

2. Li^+ , Rb^+ , Cs^+ ва Ba^+ ионлари билан имплантация қилиш жараёнида Si ва SiO_2 нинг турли чуқурликлари бўйича легирланган элементлар атомлари тақсмоти концентрацион профиллари ўрганилди ва уларнинг таркиби, структуралари ва хусусиятлари имплантациядан кейинги киздириш жараёнларида ўрганилди. Силицидли плёнка ва кремний орасида 80-100 Å қалинликдаги ўтиш қатлами шаклланиши кўрсатиб берилди. Ўтиш қатламида қатлам қалинлиги ортиши билан зона структурасининг ўзгариши кузатилади, яъни $E_g \sim 0,6$ эВ дан 1.1 эВ гача ортади;

3. Тўйиниш дозаси ва $T=900$ Кда киздириш шароитларида оролчаларнинг батамом қўшилиши ва рубидий силицидининг яхлит плёнкаси ҳосил бўлиши аниқланди. Юпқа наноўлчамли ишқорий металллар ва барий силицид плёнкаларининг шаклланиши оптимал режимлари аниқланди. Металл силицидлар плёнкалари қалинликларининг имплантацияланган ионлар энергияларининг ортиши билан чизикли ортиши ва аниқ бир ушлаб турилган энергияларда доза ортиши билан $D^{1/2}$ қонуният бўйича ортиши кўрсатиб берилди.

4. Ba^+ ионлари билан имплантация қилиш жараёнида кремний оксиди плёнкасининг ИЭЭ коэффициенти δ_m нинг ўзгариши ва ИЭЭ чиқиш чуқурлиги λ орасидаги корреляция аниқланди. SiO_2 ни ионами Ba^+ ионлари билан легирлаш жараёнида λ' нинг қиймати икки маротаба ортар экан ва $\sim 600-650$ Å ни ташкил қилади;

5. Ba^+ ва O_2^+ ионлари билан имплантацияланган Si энергетик зоналарининг параметрлари аниқланди ва ион имплантацияланган Si нинг зона-энергетик диаграммалари чизилди;

6. Биринчи маротаба Si нинг турли чуқурликларида Ba^+ ионлари энергияларини 20-40 кэВ ва дозаларини $10^{14}-10^{17}$ см⁻² ораликларда ўзгартиришлар орқали BaSi_2 нинг нанофазалари ва наноқатламлари олинди.. Нанофазаларнинг ўлчамлари ва фазалар орасидаги масофалар баҳоланди. Нанофазалар ўлчамлари 10^{-19} дан 10^{-18} см³ гача ўзгарганда тақикланган зона кенглиги ~ 1 дан 0.7 эВ гача камайиши кўрсатиб берилди. $\text{Si}/\text{BaSi}_2/\text{Si}$ (111) системасининг зона-энергетик диаграммалари чизилди;

7. Биринчи маротаба магнетрон чанглантириш методидан ўлчамлари бошқариладиган BaSi_2 ва Si плёнкаларига эга бўлган кўп қатламли $\text{Si}/\text{BaSi}_2/\text{Si}$ (111) типдаги системаларни олишда фойдаланилди.

8. Ионлар имплантацияси жараёнларида Si нинг асосий сатҳларидаги зоналар эгилиши ва кимёвий силжишлар, зона-энергетик параметрларнинг ўзгариши асосий механизмлари аниқланди ва ўрнатилди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ
КАРШИНСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

КАРШИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

НОРМУРОДОВ ДИЛШОД АБДУРАЗОКОВИЧ

**ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУР, ЭЛЕКТРОННЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК СИЛИЦИДОВ МЕТАЛЛОВ
НА МОНОКРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ И ГЕТЕРОСТРУКТУР
НА ИХ ОСНОВЕ**

01.04.04 – Физическая электроника

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

Карши – 2022

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2022.1.PhD/FM507.

Диссертация выполнена в Каршинском государственном университете и Ташкентском государственном техническом университете имени Ислама Каримова.

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

Научный руководитель: Нормурадов Мурадулла Тогаевич
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: Мамадалимов Абдугафур Тешабаевич
доктор физико-математических наук, академик
Аликулов Муйсин Нортошевич
кандидат физико-математических наук, доцент

Ведущая организация: Андижанский государственный университет

Защита диссертации состоится «14» 07 2022 г. в 10⁰⁰ часов на заседании Научного совета PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 по присуждению ученых степеней при Каршинском государственном университете (Адрес: 180103, г. Карши, ул. Кучабог, 17. Тел.: (0 375) 225-34-13; факс: (0375) 221-00-56; e-mail: qarshidu@umail.uz). Каршинский государственный университет Главный учебный корпус (аудитория №205).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Каршинского государственного университета (зарегистрирована за №103). (Адрес: 180103, г. Карши, ул. Кучабог, 17. Тел.: (0 375) 225-34-13; факс: (0375) 221-00-56; e-mail: qarshidu@umail.uz).

Автореферат диссертации разослан «02» 07 2022 г.
(реестр протокола рассылки №2, от «02» 07 2022 г).



Б.Е.Умирзаков
заместитель председателя Научного совета
по присуждению ученых степеней,
д.ф.-м.н., профессор

Г.Х.Аллаярова
ученый секретарь Научного совета
по присуждению ученых степеней, PhD.

А.К.Ташатов
председатель научного семинара при
Научном совете по присуждению ученых
степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. На сегодняшний день в мире интенсивно развивается область многослойных тонкопленочных наноструктур, содержащих нанопазы и слои силицидов металлов имеющие перспективы в создании МДП (металл – диэлектрик – полупроводник), ПДП (полупроводник – диэлектрик – полупроводник) структур, омических контактов и барьерных слоев на межфазной границе этих структур, электронных и магнитозапоминающих устройств. В связи с этим особое внимание уделяется повышению эффективности фотоэлектрических преобразователей в диапазоне солнечной энергии за счет его оптических свойств, фотовольтаических характеристик и устойчивости к атмосферному воздуху.

В мире используются различные методы формирования силицидов металлов на основе полупроводников и проводятся научные исследования по их совершенствованию. В этом направлении приоритетными являются исследования по образованию силицидов под действием активных ионов металлов на поверхности и участках поверхности монокристалла. В то же время получение наноразмерных структур типа MeSi и MeSi_2 на поверхности и приповерхности Si и изучение их состава, размеров, электронной и кристаллической структур, эмиссионных и оптических свойств является **актуальной** проблемой физической электроники.

При производстве наноструктурированных материалов, используемых в наноэлектронных устройствах в стране, нанопленки формировались на поверхности и участках поверхности монокристаллического кремния с помощью имплантации ионов активных металлов. При производстве наноразмерных структур помимо метода ионной имплантации тонкие пленки на поверхности монокристаллического кремния получали методом ионно-плазменного напыления с использованием магнетронной установки. Поставлены задачи по изучению их электронной структуры, электронной эмиссии и оптических свойств. При решении этих задач, в частности, важно знать кристаллическую структуру, состав, основные параметры энергетических зон исследуемых пленок металлического кремния.

Данное диссертационное исследование, в достаточно определенной степени, служит выполнению задач, предусмотренных в Постановлении Президента Республики Узбекистан №ПП-4947 от 7 февраля 2017 года², «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», №ПП-2772 от 13 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию управления, ускоренному развитию и диверсификации электротехнической промышленности на 2017-2021 гг. № ПП-2789 от 17 февраля 2017 г. «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности», № ПП-4422 от 22 августа 2019 года «Об

²Указ Президента Республики Узбекистан №УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан».

ускоренных мерах по повышению энергоэффективности отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии» и др. нормативные акты, связанные с этой деятельностью.

Соответствие исследований приоритетным направлениям развития науки и технологий в республике. Диссертация выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан: II. «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение» и III. Развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. Получением и изучением свойств наноразмерных фаз и пленок занимаются известные ученые мира. Ученые из России М.В.Гомоюнова, Г.С.Гребенюк и др. (Санкт-Петербург, Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН) исследовали начальные стадии роста пленки Co на поверхности Si (111) при комнатной температуре. Показано, что отжиг образца, с нанесенным на поверхность 25 Å Co, проводимый в интервале температур 300-500 °С, приводит к образованию твердого превращения CoSi в полупроводниковый силицид CoSi₂. Д.И.Тетельбаумом и др. (Институт физики микроструктур Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия) исследовали возможные механизмы влияния примесей пятой и третьей групп таблицы Менделеева на люминесцентные свойства системы нанокристаллов кремния в SiO₂. Показано, что усиление и ослабление фотолюминесценции зависит как от сорта легирующей примеси, также и от условий постимплантационной термообработки. В.Л.Дубов, Д.В.Фомин и др. (Амурский государственный университет, Россия, г. Благовещенск) показали, что нанопленки BaSi₂/Si являются перспективным материалом для фотоэлектрических преобразователей, в частности солнечных элементов.

В настоящее время бурно изучаются тонкопленочные структуры дисилицида бария на поверхности кремния. Японскими учеными Hara K.O., Nakagawa Y. и др. (Center for Crystal Science and Technology, University of Yamanashi, 7-32 Miyamae, Kofu, Yamanashi 400-8511, Japan) теоретически показано, что функциональная плотность BaSi₂ принадлежит фазе *Zintl* со смешанной ковалентной связью тетраэдрического Si₄ с ионной связью типа (2Ba₂⁺) (Si₄)⁴⁻. Диаграмма молекулярных орбиталей объясняется на основе электронных структур, предполагая, что переход с переносом заряда от *p* – состояния Si к *d* – состояниям Ba, значительно увеличивает оптическое поглощение. Уровень Ферми закреплен в середине запрещенной зоны для всего диапазона химических потенциалов кремния и широкого диапазона температур роста, что указывает на возможность биполярного легирования, которое является преимуществом для изготовления *p-n*- переходов. Ученые из США W.Theis и R.M.Tromp исследовали топографию поверхности Si (001) во время гомоэпитаксиального роста при 650⁰ С и определили профиль плотности зародышеобразования на вершине «базового» островка. Иваненко Л.И., Шапошников В.Л. и др. (Белорусский государственный

университет информатики и радиоэлектроники) показали, что силицидные пленочные материалы имеют перспективу создания гетероструктур для элемента термоэлектрических приборов, интегральных схем, оптоэлектронных приборов. A.L. Schmitt, J.M. Higgins. и др. (Кафедра химии, Университет Висконсин-Мэдисон, США.) изучили электронную и кристаллическую структуру силицидов металлов на поверхности Si и показали возможность их применения в качестве термоэлектрических материалов.

Учеными Ташкентского Государственного технического университета (М.Т.Нормурадов, Б.Е.Умирзаков, А.С.Рисбаев и др.) впервые, методом ионной имплантации получены наноразмерные фазы и слои силицидов металлов на различных глубинах Si, GaAs, CdTe и SiO₂, определены размеры НК фаз MeSi₂, при которых проявляются квантово – размерные эффекты. Однако, до начала данной диссертационной работы, были мало изучены состав, структура, эмиссионные и оптические свойства нанопленок силицидов активных металлов, полученных методом ионно – плазменного напыления и, практически, не исследованы зонно – энергетические параметры нанофаз и слоев BaSi₂, созданных в приповерхностной области Si.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертационная работа. Диссертационная работа выполнена в Каршинском государственном университете в рамках международного проекта AIF-1/7 «Укрепление взаимоотношений между Каршинским государственным университетом и производственными предприятиями Кашкадарьинской области для улучшения качества подготовки студентов» (2019-2021 гг.).

Целью исследования является изучение закономерностей формирования гетероструктурных нанофаз и слоев силицидов металлов на поверхности и в приповерхностных слоях Si, изучение их состава, структуры и физических свойств.

Задачи исследования:

изучение состава и кристаллической структуры поверхности силицидов металлов, полученных методом ионной имплантации с последующим отжигом;

изучение концентрационных профилей распределения атомов легирующих элементов по глубине для Si и SiO₂ имплантированных ионами активных металлов;

получение и изучение состава, структуры, эмиссионных и оптических свойств плёнок SiO₂/Si;

определение зонно – энергетических параметров и исследование плотности состояния валентных электронов монокристаллов Si, имплантированных ионами Ba⁺ и O₂⁺;

изучение состава и электронной структуры наноразмерных фаз и слоев BaSi₂, созданных в приповерхностной области Si. Построение зонно – энергетической диаграммы Si/BaSi₂/Si(111);

получение и изучение свойств двухслойной системы BaSi₂/Si/BaSi₂/Si(111) методами ионной имплантации и напыления с помощью магнетронного распыления.

Объектами исследования были выбраны монокристаллы и пленки кремния, а также окись кремния.

Предметом исследования являются процессы создания тонких наноразмерных пленок силицидов Li^+ , Na^+ , K^+ , Rb^+ , Cs^+ и Ba^+ на поверхности Si и SiO_2 , их структура и физические свойства.

Методы исследований. В диссертационной работе были использованы методы Оже-электронная спектроскопия (ОЭС), спектроскопия характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ), вторичная электронная спектроскопия (ВЭС) и фотоэлектронная спектроскопия (ФЭС), ультрафиолетовая фотоэлектронная спектрометрия (УФЭС), растровая электронная микроскопия высокого разрешения (РЭМ) и дифракция медленных электронов (ДМЭ).

Научная новизна исследования заключается в следующем:

показано, что при имплантации ионов бария, щелочных металлов и кислорода в кремний в интервале энергий $E_0 = 0,5 - 5 \text{ кэВ}$ с малыми дозами ($D = 5 \cdot 10^{14} \text{ ион} \cdot \text{см}^{-2}$) образуется химическая связь между атомами легирующего элемента и матрицы.

При $D = D_n$ формируется однородно легированный слой. Силициды типа MeSi_2 и оксид SiO_2 с толщиной от 30-60 Å, с хорошей стехиометрией формируются после прогрева при оптимальной температуре в течении 30-40 мин.;

определена корреляция между изменениями значений коэффициента ВЭЭ δ_m и глубиной выхода ВЭЭ λ пленки оксида кремния при имплантации ионов Ba^+ . Показано, что при легировании SiO_2 ионами Ba^+ значение глубины выхода ВЭЭ увеличивается до двух раз и составляет $\sim 600-650 \text{ Å}$;

впервые, методом ионной имплантации и магнетронного ионно – плазменного напыления получен скрытый слой BaSi_2 в приповерхностной области Si . Определены размеры наночастиц BaSi_2 , при которых проявляются квантоворазмерные эффекты;

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

выявлены основные механизмы, приводящие к изменению электронной структуры Si при ионной имплантации с использованием различных не связанных между собой методов электронной спектроскопии;

разработан метод получения скрытых слоев BaSi_2 в приповерхностной области Si с использованием методов ионной имплантации и магнетронного осаждения;

определены оптимальные режимы ионной имплантации (энергия, доза и тип иона) и последующего отжига для получения силицидов типа MeSi_2 на поверхности и в приповерхностной области Si .

Достоверность результатов исследований обеспечивается использованием современных стандартных методов получения тонких пленок металлов. Для получения информации о морфологии, кристаллической структуре и параметрах решетки в диссертационной работе были использованы стандартные установки РЭМ и ИК-Фурье спектрофотометр IRTracer-100. Проведением экспериментов в условиях сверхвысокого вакуума и хорошим соответствием результатов для чистого кремния с данными других авторов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в выявлении природы механизмов формирования наноразмерных структур и теории тонких пленок в поверхностных и приповерхностных слоях кремния посредством изучения специфических свойств в спектре валентных электронов;

Практическая значимость доказывается получением результатов по наноразмерным фазам и слоям с заданными физическими свойствами, имеющими практический интерес для получения специальных наноразмерных ПДП – структур, необходимых для трехмерных интегральных схем, совершенных наноконтактов и защитных слоев, приборов опто – наноэлектроники.

Внедрение результатов исследования. Основные результаты исследований формирования структуры, электронных и оптических свойств тонких пленок силицидов металлов на монокристаллах кремния и гетероструктур:

выводы об образовании химических связей между атомами матрицы и легирующих элементов при малых дозах ($D=5 \cdot 10^{14}$ ион \cdot см $^{-2}$), в диапазоне энергий $E_0 = 0,5 - 5$ кэВ, в монокристаллическом кремнии, имплантированном Ba^+ , щелочными металлами и кислородом, использованы при исследовании основных закономерностей формирования наноразмерных структур на поверхностных и приповерхностных слоях кремния и оксида кремния в АО «Фотон» (Справка АО «Фотон», 27 апреля 2022 г., № 142). В результате методами ионной имплантации и магнетронного распыления был получен скрытый слой $BaSi_2$ в приповерхностной области Si, определены размеры нанофаз $BaSi_2$ и обнаружены квантово-размерные эффекты. При имплантации ионов активных металлов в образцы кремния анализ перераспределения по глубине специально введенных в него атомов позволил определить, в зависимости от их типа, увеличение их концентрации либо в ионно-легированном слое, либо в нелегированной области Si;

формирование однородного слоя сплава при дозах ионов ($D=D_t$), равных дозе насыщения, выявило образование силицидов типа $MeSi_2$ хорошей стехиометрии толщиной 30-60 Å при нагреве до оптимальной температуры (450-500°C) в течение 30-40 минут. Результаты были использованы при реализации фундаментального проекта ОТ-Ф2-53 «Квантово-размерные эффекты и электронные свойства двумерных наноразмерных структур, созданных на поверхности и поверхности пленки A^3B^5 и A^2B^6 » (Справка ректора Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова № 01/9-14-1343). Результаты, полученные по полученному механизму, позволили объяснить кривизну ширины энергетической зоны и сдвиги основных поверхностей структур GaAs, CdTe, CdS, GaMeAs, CdMeTe и CdMeS.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования были обсуждены на 8 международных и 3 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследований. Полученные результаты по теме диссертации изложены 16 научных трудах, в том числе 5 из них в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией

Республики Узбекистан по публикациям научных результатов докторских диссертаций из них 3 в международных и 2 в республиканских журналах.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 142 машинописного текста, включая 51 рисунок и 9 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, описана степень изученности проблемы, приводится связь исследований с приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике, сформулирована цель и задачи диссертационной работы, приводится научная новизна, научная и практическая значимость полученных результатов, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

Первая глава **«Обзор литературы по исследованию структуры и свойств пленок силицидов»** посвящена краткому литературному обзору работ, посвященных исследованию получения достоверной информации о процессе формирования пленок силицидов кремния в приповерхностном слое кремния и для создания различных структур, устройств, в первую очередь, необходимых для получения чистой поверхности кремния.

Большое внимание уделяется в наноразмерном диапазоне влиянию уменьшения размеров нанокристаллов заметному изменению их электронной и кристаллической структуры. В частности, ширина запрещенной зоны кремниевых квантовых точек вдвое превышает ширину запрещенной зоны кристаллического кремния.

В конце главы приводятся выводы из обзора, цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава **«Методика экспериментальных исследований»** посвящена исследованию физико-химических свойств поверхности образцов с использованием комплекса методов: дифракция медленных электронов (ДМЭ), электронная оже-спектроскопия (ЭОС), спектроскопия характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ), фотоэлектронная спектроскопия (ФЭС). Для получения тонких пленок металлов использовалась стандартная установка магнетронного распыления системы EPOS-PVD-DESK-PRO. Отдельные эксперименты проводились в сверхвысоковакуумной установке типа LAS-2200. Для получения информации о морфологии, кристаллической структуре и параметрах решетки в диссертационной работе были использованы стандартные установки РЭМ, ДБЭ и ИК-Фурье спектрометр IRTracer-100. Изменение работы выхода поверхности Si, происходящее в процессе различных технологических обработок, определялось с помощью метода контактной разности потенциалов. Обсуждаются основные источники погрешностей, характерные для каждого из методов исследования, использованных в настоящей работе.

Третья глава «Создание наноразмерных структур на поверхности Si и SiO₂ с использованием методов ионной имплантации и ионно-плазменного напыления» посвящена изучению влияния низкоэнергетической имплантации ионов Li⁺, Na⁺, Rb⁺, K⁺, Cs⁺ и Ba⁺ с различными дозами на элементный и химический состав, кристаллическую структуру поверхности монокристаллов пленок Si (111), Si (100).

На рис.1 приведены оже-спектры для чистого кремния (спектр 1) и кремния, имплантированного ионами бария (спектр 2), натрия (спектр 3) с энергией 1 кэВ при высокодозном облучении ($D = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$). Видно, что атомы имплантированной примеси в легированном слое образуют химическое соединение с кремнием. С помощью компьютерной программы для оценки типа полученных соединений были определены концентрационные профили распределения имплантированных атомов по глубине, полученные расчетным путем с учетом коэффициентов элементной оже-чувствительности. Экспериментально также установлено, что кратковременный отжиг ионно-имплантированных образцов Si большой дозой в течение 2÷4 минут при температуре 700÷1000 К приводит к десорбции несвязанных атомов примеси, а остальные атомы полностью входят в состав химического соединения с атомами Si. Следует отметить, что соединения BaSi (а также соединения CsSi, NaSi, LiSi и RbSi), образующиеся в имплантированном слое, не соответствуют правилу нормальной валентности и характеризуются укороченными расстояниями между атомами кремния, что указывает на ковалентный тип связи Si-Si. Барий, как и все щелочные элементы, выступая в кремнии в качестве донора, оказывает стабилизирующее действие на sp^3 -конфигурацию атомов кремния и тем самым укрепляет ковалентные связи Si-Si.

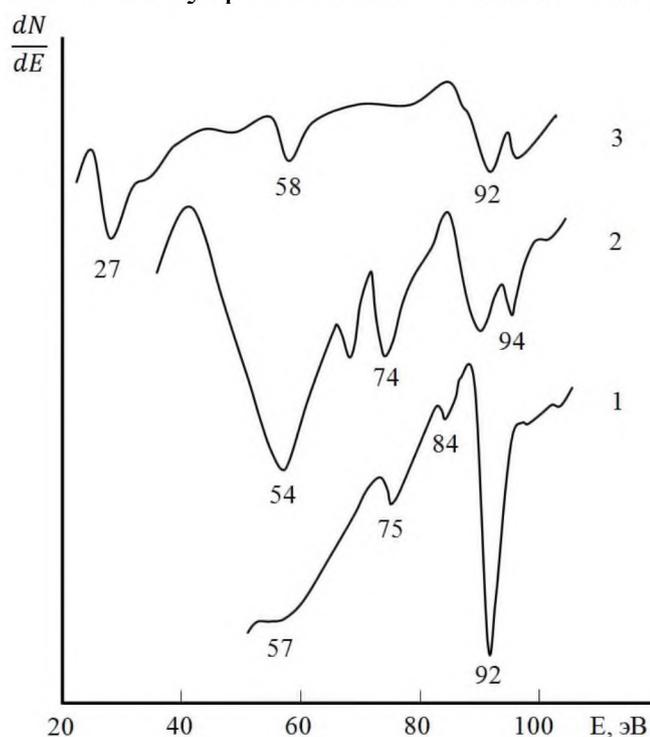


Рис. 1. Спектры ЭОС для чистого кремния (спектр 1) и кремния, имплантированного ионами бария (2), Na (3) с энергией $E_0 = 1 \text{ кэВ}$ и дозой $D = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

На рис. 2 приведены изменения значений потерь энергии ΔE на возбуждение поверхностного ($\hbar\omega_s$) и объёмного ($\hbar\omega_v$) плазмонов от дозы облучения для Si (111), имплантированного ионами Ba⁺ с $E_0=1$ кэВ. Видно, что при низких дозах ($D \leq 5 \cdot 10^{14}$ см⁻²) значение ΔE незначительно уменьшается. По-видимому, это связано с разупорядочением поверхностных слоев Si (111). Дальнейшее увеличение дозы ионов наряду с разупорядочением приводит к обогащению ионно – легированных слоев атомами бария и образованию нестехиометрических силицидов бария, следовательно, значения $\hbar\omega_s$ и $\hbar\omega_v$ заметно уменьшаются. Эти изменения происходят до $D_A \approx (8-10) \cdot 10^{17}$ см⁻². При этом, значения $\hbar\omega_s$ и $\hbar\omega_v$ устанавливаются на χ уровне 10,3 и 15,2 эВ, соответственно.

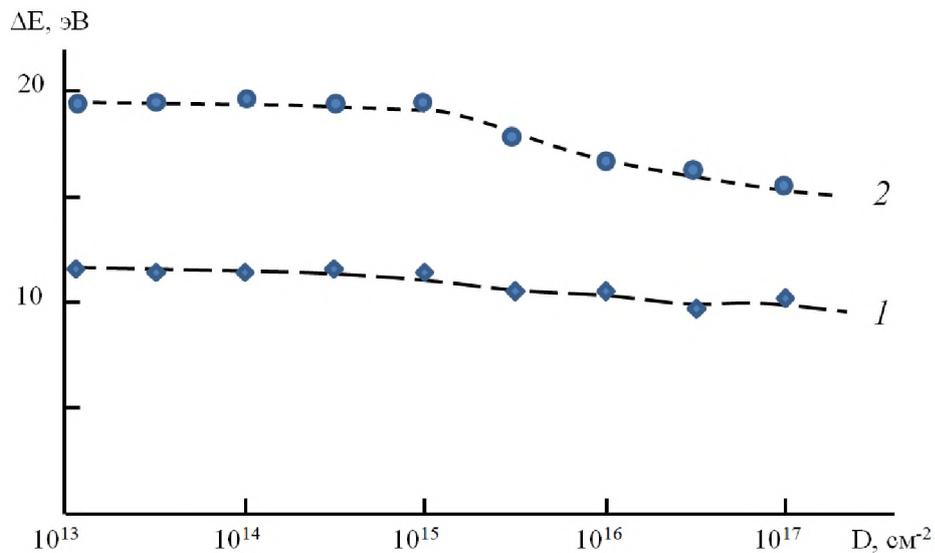


Рис. 2. Зависимости энергии возбуждения плазменных колебаний от дозы облучения для Si (111), имплантированного ионами Ba⁺ с $E_0=1$ кэВ; 1-для $\hbar\omega_s$; 2-для $\hbar\omega_v$.

Приповерхностные слои кристалла, легированного с низкой энергией и высокой дозой облучения, в зависимости от концентрации примесных атомов можно условно разделить на три участка (рис. 3). До глубины $d = 25 \div 30 \text{ \AA}$ Na распределяется почти равномерно. В этих слоях концентрация Na достигает до $50 \div 60$ ат.% и в них имеется в основном моносилицид натрия и некоторый избыток атомов натрия. При этом, вблизи дна зоны проводимости появляется узкая зона, заполненная электронами, а запрещенная зона и зона проводимости сужаются. В интервале толщин $d = 30 \div 70 \text{ \AA}$ концентрация натрия сначала быстро, а затем относительно медленно уменьшается. Следовательно, происходит изменение толщины зонной структуры. Так с ростом d наблюдается исчезновение новой зоны, увеличение величины E_g и κ .

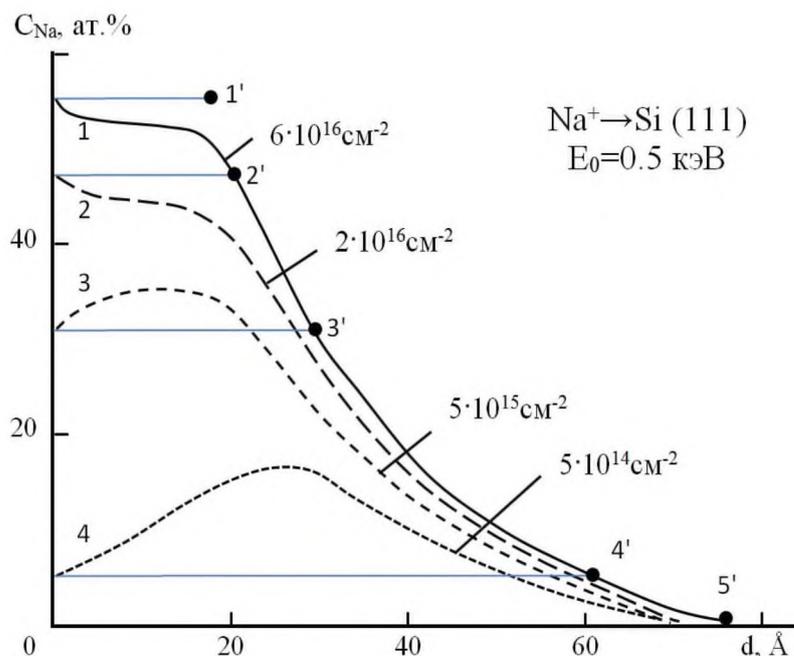


Рис. 3. Зависимости $C_{Na}(d)$ для Si, легированного ионами Na^+ разными дозами.

Аналогичные результаты получены и в случае прогрева кремния, легированного ионами натрия и цезия (рис.4). В этом случае процессы диффузии и десорбции примесных атомов происходили при относительно меньших температурах, чем в случае кремния, легированного ионами бария. Так например, разложение $NaSi$ происходило начиная с 800 К, а $NaSi_2$ – с 900 К. В случае ионов Cs температура десорбции примесных атомов (500 ÷ 550 К) и температуры разложения силицидов $CsSi$ (600 К) и $CsSi_2$ (700 К) относительно невысокие и эти процессы протекают в небольших температурных интервалах. Поэтому на кривой зависимости $C_{Cs}(T)$ тонкая структура четко не проявляется (рис. 4).

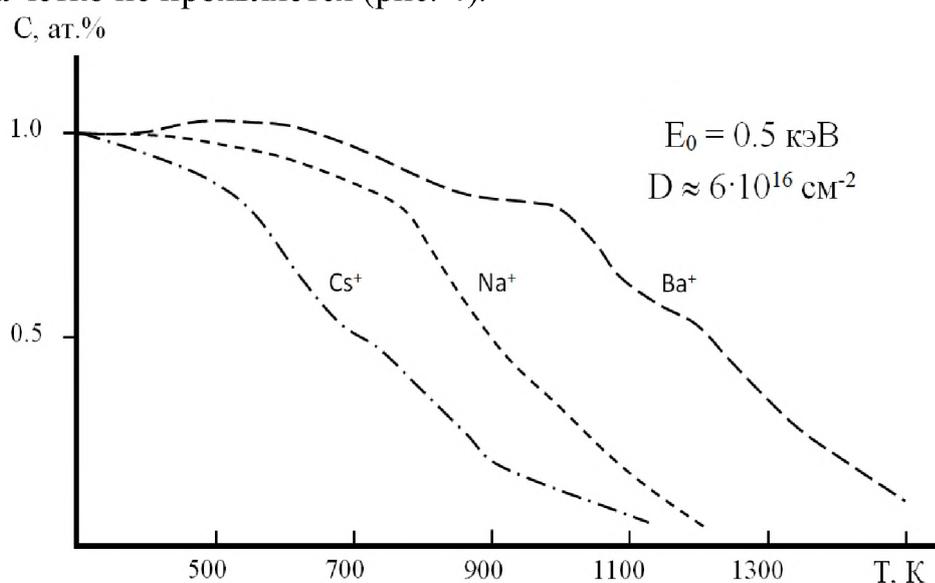


Рис. 4. Влияние температуры изохронного отжига на поверхностную концентрацию легирующих атомов ионно-легированного кремния. C_{300} – концентрация при 300 К.

В табл. 1 приведены режимы формирования (исходная структура Si, ионная энергия, температура последующего отжига) и типы поверхностных структур силицидов щелочных элементов, образующихся при отжиге образцов ионного кремния, а также толщина силицида, температура восстановления пленок и исходная структура кремния. Отметим, что такие поверхностные структуры наблюдались и при нагреве имплантированных образцов с энергией 2÷5 кэВ. Разница лишь в том, что для формирования поверхностных структур требуется более длительный отжиг при соответствующих температурах (чем больше энергия ионов, тем больше длительность отжига). В зависимости от типа исходной грани поверхности кремния и типа имплантированных ионов щелочных элементов образуются поверхностные сверхструктуры различного типа.

Таблица 1.

Оптимальные режимы формирования тонких наноразмерных пленок дисилицида бария, силицидов бария и калия

Тип силицида	KSi	BaSi	BaSi ₂
Параметры			
Структура исходного Si	100	100 111	100 111
Энергия ионов, кэВ	0,5÷5	0,5÷5	0,5÷5
T отжига, К	800÷850	800÷900	800÷900
Толщина силицида, Å	35÷95	35÷85	35÷85
Тип сверхструктуры	2x1	2x2 1x1	2x2 1x1
Энергия электронов E _p , эВ	49	38 43	38 43
T восстановления исходной структуры, К	1200	1300	1300

После имплантации ионов Ba⁺ в спектре происходят следующие изменения: положение и форма пиков меняются, появляются новые особенности, ширина КЭР и квантовый выход фотоэлектронов увеличиваются. Результаты электронной оже-спектроскопии (ЭОС) показывают, что основная часть (80 ÷ 85 %) внедренных атомов бария, входят в химическую связь с атомами кремния и образуют силицид бария. Это, по-видимому, приводит к изменению энергетических параметров поверхности и выпрямлению изгиба энергетических зон. При образовании химических соединений атомы бария являются донорами электронов, а атомы кремния – акцепторами.

Вследствие частичного перехода валентных электронов из бария в кремний происходит перераспределение электронных состояний в валентной зоне кремния. Атомы бария, не входящие в химическую связь с атомами кремния, в запрещенной зоне полупроводника образуют примесные уровни донорного типа. При больших дозах происходит расщепление донорных уровней и вблизи дна зоны проводимости образуется узкая зона, заполненная электронами.

Таблица 2.

Основные параметры энергетических зон чистого и ионно легированного кремния

Параметры	Необлученный Si p-типа	Si, легированный ионами	
		Ba	O ₂
Φ , эВ	5,2	2,4	9,7
φ , эВ	4,8	2,4	5,1
δ_s , эВ	0,4	1,1	4,6
V_s , эВ	0,3	0	0
E_g^* , эВ	1,1	0,8 *	9
χ , эВ	4,1	2,4	0,7

Установлено, что ионная имплантация приводит к изменению параметров зон, энергетического распределения электронов в зонах и изменению величины квантового выхода фотоэлектронов кремния.

Таблица 3.

Параметры зоны для разных глубин ионно-легированного слоя

№	Тип хим. Связи	Φ , эВ	φ , эВ	δ_s , эВ	E_g , эВ
1	BaSi	2.4	2.4	1.1	0.8
2	BaSi	2.5	2.5	1.1	0.8
3	BaSi+ BaSi ₂	3.8	2.8	1	1.1
4	BaSi ₂ + Si	4.2	3.5	0.7	1.1
5	Si+Ba	4.5	4.5	0.4	1.1

Наблюдаемые изменения объясняются как образованием химической связи между атомами легирующего элемента и кремния, так и возникновением новых электронных состояний в запрещенной зоне из-за наличия несвязанных атомов имплантируемого элемента.

В кремнии, легированном ионами Ba⁺ с $E_0 = 0,5 \text{ кэВ}$ с высокой дозой в приповерхностной области толщиной $20 - 25 \text{ \AA}$, образуется, практически, однородное распределение атомов матрицы и легирующей примеси.

В четвертой главе «Получение двухслойных нанофаз и нанослоев имплантацией ионов Ba⁺ в Si и исследование их состава и электронной структуры» приводятся результаты, полученные для наноразмерных фаз BaSi₂, созданных на различных глубинах Si, с целью создания наноразмерных гетеросистем типа Si/BaSi₂/Si.

Наноразмерные фазы и слои BaSi₂ на различных глубинах приповерхностного слоя Si, получены имплантацией ионов Ba⁺ с вариацией энергии E_0 в пределах $20 - 40 \text{ кэВ}$ и дозы $D = 10^{14} - 10^{17} \text{ см}^{-2}$, при вакууме не хуже 10^{-7} Па .

На рисунке 5 приведены концентрационные профили распределения Ba по глубине h для Si (111), имплантированного ионами Ba⁺ с $E_0 = 20 \text{ кэВ}$ при дозе насыщения 10^{17} см^{-2} до и после прогрева при 950 К в течении 40 мин .

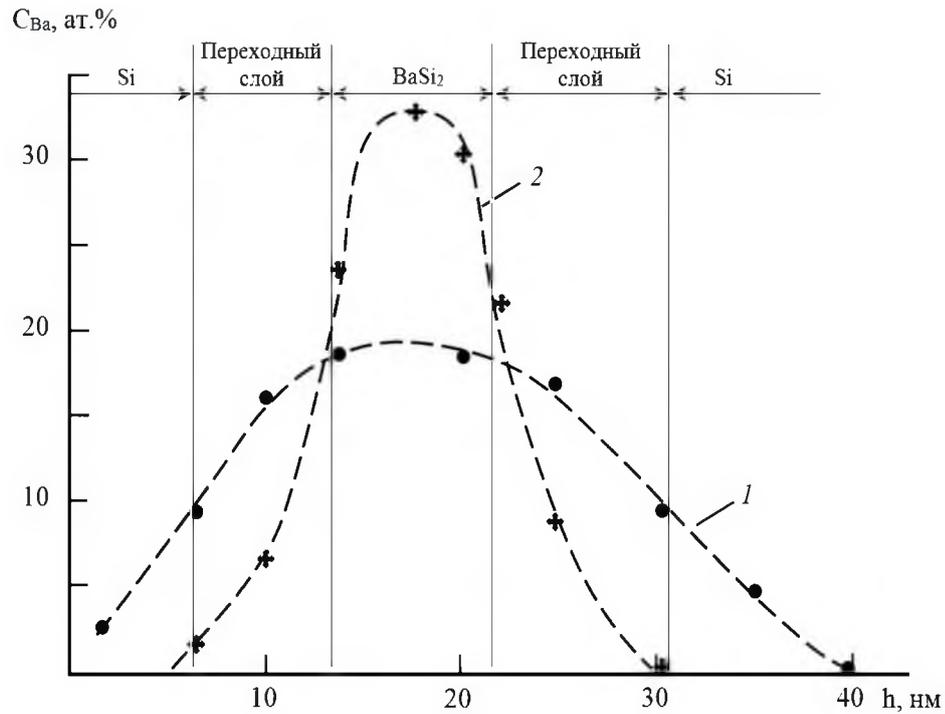


Рис. 5. Профили распределения атомов Ba по глубине h Si, имплантированного ионами Ba^+ с энергией $E_0 = 20$ кэВ при $D \approx 10^{17}$ см $^{-2}$: 1 – до прогрева; 2 – после прогрева при 900 К.

Анализ оже-спектров показал, что кривые проходят через максимум на глубине $h=16\div 18$ нм. На зависимости $C_{Ba}(h)$, измеренного до прогрева, наблюдается широкий максимум с концентрацией ~ 20 ат.%. После прогрева происходит увеличение концентрации атомов в области максимума до 30-35 ат.% и существенное уменьшение полуширины кривой распределения $C_{Ba}(h)$. При этом, положение оже пика кремния $L_{2,3}VV$ ($E = 92$ эВ) смещается до энергии ~ 96 эВ, что характерно для $BaSi_2$. Из кривой 2 видно, что ширина слоя $BaSi_2$ составляет $\sim 10\div 12$ нм. На границах Si/ $BaSi_2$ /Si формируется переходный слой толщиной $\sim 6\div 8$ нм, что значительно больше, чем в случае $CoSi_2/Si/CoSi_2$.

Для этой системы на рис. 6 приведена зависимость I_{BaSi_2}/I_{Si} от энергии фотонов $h\nu$. Где I_{Si} и I_{BaSi_2} – интенсивности проходящего света через чистый Si (111) и через Si (111) с скрытым нанослоем $BaSi_2$ соответственно. Из рисунка 6 видно, что интенсивности света исследуемых образцов до определенного значения $h\nu$, практически, не меняются. В случае чистого Si резкое уменьшение I начинается с $h\nu \approx 1$ эВ, а в случае Si с нанослоем $BaSi_2$ с $h\nu$ 0.55 эВ. Экстраполяция этой части кривых к оси $h\nu$ дает примерное значение ширины запрещенной зоны. Видно, что E_g для чистого Si составляет ~ 1.1 эВ, а для $BaSi_2$ - ~ 0.67 эВ. После прогрева Si, имплантированного ионами Ba^+ с невысокой дозой ($D \leq 5 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$), в приповерхностном слое формируются регулярно расположенные нанокристаллические фазы $BaSi_2$.

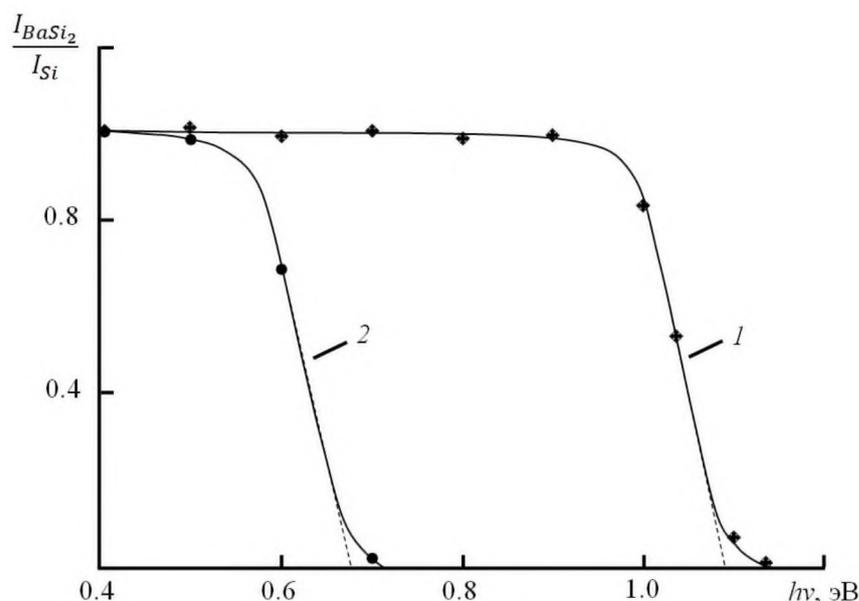


Рис. 6. Зависимость интенсивности проходящего света от энергии фотонов для чистого Si (кривая 1), и Si с нанослоем BaSi₂ (кривая 2).

В таблице 4 приведены оптимальные режимы ионной имплантации и отжига для получения НК BaSi₂ в двух разных глубинах монокристалла Si (111). После каждого цикла имплантации ионов образец прогревался при соответствующей температуре в течении 30 мин.

Таблица 4.

Оптимальные режимы ионной имплантации и отжига для получения нанокристаллов (НК) BaSi₂ на различных глубинах Si (111)

Объект исследования	$E_0 = 20$ кэВ				$E_0 = 30$ кэВ			
	$D, \text{см}^{-2}$	$T, \text{К}$	$d, \text{нм}$	$h, \text{нм}$	$D, \text{см}^{-2}$	$T, \text{К}$	$d, \text{нм}$	$h', \text{нм}$
Ba ⁺ →Si (111)	5×10^{14}	950	6-8	16-18	5×10^{14}	950	6-8	25-30
	10^{15}	950	8-10		10^{15}	1000	8-10	
	5×10^{15}	1100	10-12		5×10^{15}	1100	10-12	

Из таблицы видно, что после прогрева Si, имплантированного ионами Ba⁺ с $E_0 = 30$ кэВ нанокристаллические фазы в виде сфер формировались на глубине 25 – 30 нм. В обоих случаях до $D \approx 10^{15} \text{ см}^{-2}$ эти фазы имеют форму близкую к сферической. С дальнейшим ростом D границы соседних фаз перекрывают друг – друга и начинается образование слоя BaSi₂. Однако, однородный по толщине слой BaSi₂ формируется при $D \approx 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

На рис. 7 приведена зависимость C_{Ba} от глубины h для Si (111), имплантированного ионами Ba⁺ с $E_0 = 30$ и 1 кэВ. После каждого цикла ионной имплантации проводился прогрев при оптимальной температуре ($T=900$ К) в течении 30-40 мин. Видно, что на поверхности и на глубине 20-30 нм концентрация Ba составляет 30-35 ат.%. Анализ изменения положения и формы оже – пика $L_{2,3}VV$ кремния показали, что в этих слоях образуются соединения типа BaSi₂.

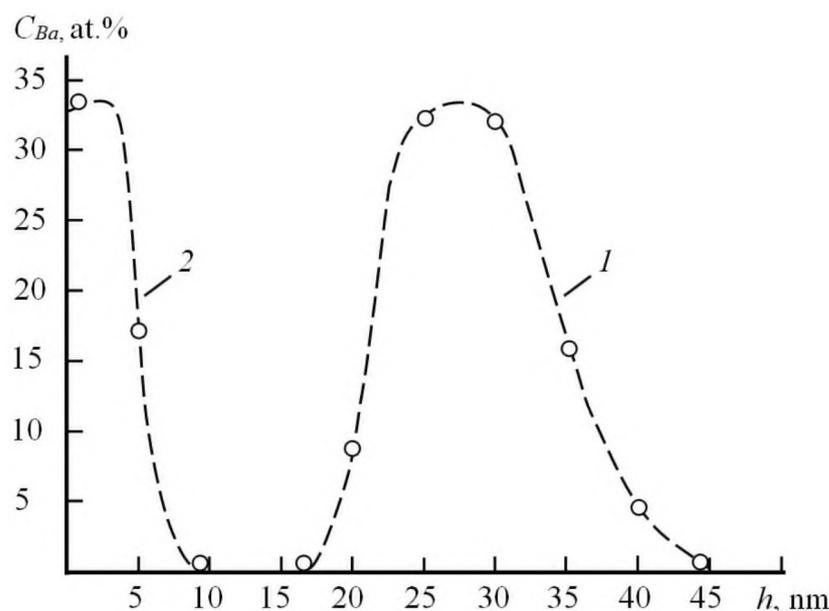


Рис. 7. Концентрационные профили распределения Ва по глубине для Si, имплантированного ионами Ba^+ с $E_0 = 30$ кэВ – 1, и 1 кэВ-2. После каждого цикла имплантации проводился прогрев при $T \approx 900$ К.

На рисунке 8 приведена рентгенограмма системы $BaSi_2 / Si / BaSi_2 / Si$ (111), снятая на дифрактометре *STOE «STADI P»* (*CoKa* – излучение). Видно, что на рентгенограмме, в основном, обнаруживаются множество пиков, характерных для $BaSi_2$ и Si, а пики посторонних элементов, практически, отсутствуют. Исходя из этого можно полагать, что данная система имеет

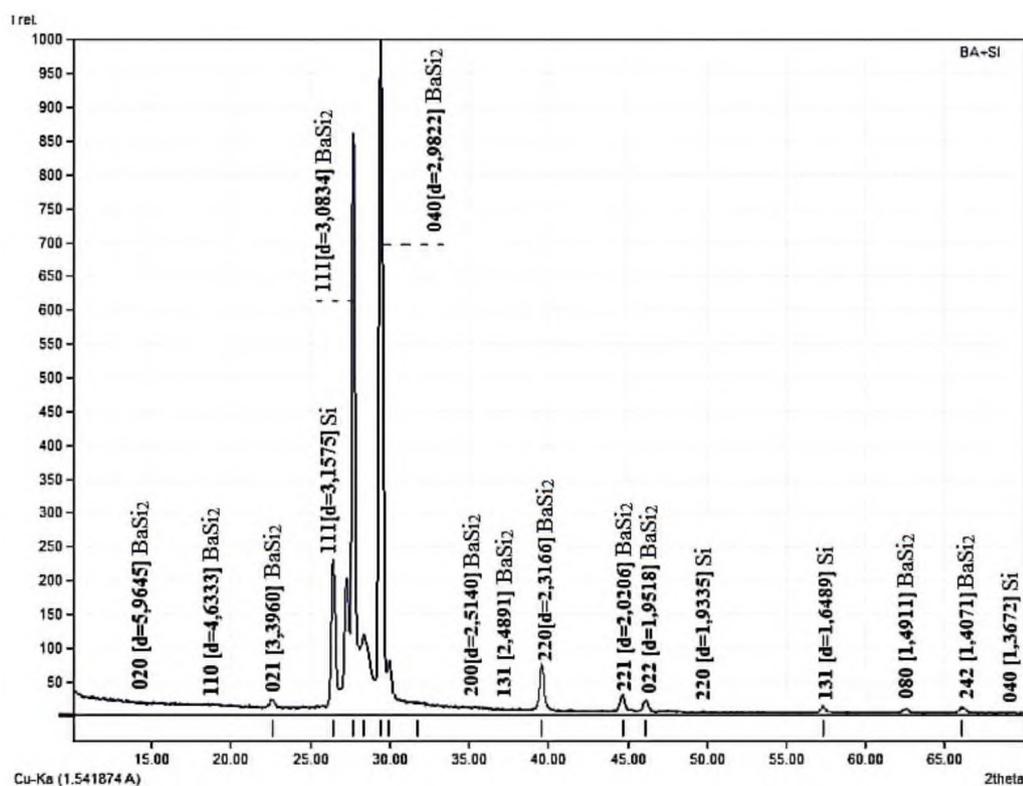


Рис. 8. Рентгенограмма поверхности системы $BaSi_2/Si/BaSi_2/Si(111)$.

поликристаллическую структуру. Данное предположение подтверждалось результатами, полученными методом ДБЭ. С использованием методов ОЭС, УФЭС, РЭМ и рентгеноструктурного анализа исследованы состав, морфология поверхности и электронная структура нанопленочной системы $\text{BaSi}_2/\text{Si}/\text{BaSi}_2/\text{Si}(111)$, полученных методом имплантации ионов Ba^+ в Si в сочетании с прогревом. Определены параметры энергетических зон и построена энергетическая зонная диаграмма системы $\text{Si}/\text{BaSi}_2/\text{Si}$. Определены глубина образования и толщина слоя BaSi_2 для различных энергий ионов Ba^+ в диапазоне от 0.5 кэВ до 40 кэВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлены основные закономерности формирования силицидов металлов (MeSi и MeSi_2) и оксида на поверхности кремния при имплантации ионов активных металлов и кислорода с последующим отжигом. Изучены их состав, электронная и кристаллическая структуры;

2. Изучены концентрационные профили распределения атомов легирующих элементов по глубине Si и SiO_2 при имплантации ионов Li^+ , Rb^+ , Cs^+ и Ba^+ и изменения состава, структуры и свойств образцов в результате постимплантационного отжига. Показано, что между силицидной пленкой и кремнием формируется переходный слой толщиной $80 \div 100 \text{ \AA}$. В переходном слое с увеличением толщины наблюдается изменение зонной структуры: увеличение величины E_g от $\sim 0,6 \text{ эВ}$ до $1,1 \text{ эВ}$;

3. Установлено, что при дозе насыщения и нагреве при $T=900 \text{ К}$ островки полностью сливаются и образуется сплошная пленка силицида рубидия. Определены оптимальные режимы формирования тонких наноразмерных пленок силицидов бария и щелочных элементов. Показано, что толщина пленок силицидов металлов линейно увеличивается с ростом энергии имплантированных ионов и при фиксированной энергии увеличивается с увеличением дозы по закону $D^{1/2}$.

4. Определена корреляция между изменением значений коэффициента ВЭЭ δ_m и глубиной выхода ВЭЭ λ пленки оксида кремния при имплантации ионов Ba^+ . Показано, что при легировании SiO_2 ионами Ba^+ значение λ' увеличивается в два раза и составляет $\sim 600 \div 650 \text{ \AA}$;

5. Определены основные параметры энергетических зон Si, имплантированного ионами Ba^+ и O_2^+ и построены зонно-энергетические диаграммы ионно-имплантированного Si;

6. Впервые, вариацией энергии ионов Ba^+ в пределах $20 \div 40 \text{ кэВ}$ и дозы $10^{14} \div 10^{17} \text{ см}^{-2}$ на различных глубинах Si получены нанофазы и нанослои BaSi_2 . Оценены размеры нанофаз и расстояния между фазами. Показано, что при изменении размеров нанофаз в пределах от 10^{-19} до 10^{-18} см^3 ширина запрещенной зоны уменьшается в пределах от ~ 1 до $0,7 \text{ эВ}$. Построена зонно-энергетическая диаграмма системы $\text{Si}/\text{BaSi}_2/\text{Si}(111)$;

7. Впервые метод магнетронного распыления использован для получения многослойной системы типа Si/BaSi₂/Si(111) с регулируемыми размерами пленок BaSi₂ и Si.

8. Установлены основные механизмы изменения зонно-энергетических параметров, величины изгиба зон и химических сдвигов основных уровней Si при имплантации ионов.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING OF SCIENTIFIC
DEGREES PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 OF
KARSHI STATE UNIVERSITY**

KARSHI STATE UNIVERSITY

NORMURODOV DILSHOD ABDURAZOKOVICH

**FORMATION OF THE STRUCTURE, ELECTRONIC AND OPTICAL
PROPERTIES OF THIN FILMS OF METAL SILICIDES ON SILICON
SINGLE CRYSTALS AND HETEROSTRUCTURES BASED ON THEM**

01.04.04 – Physical electronics

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

Karshi – 2022

The subject of doctor of philosophy dissertation is registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2022.1.PhD/FM507.

Dissertation has been prepared at Karshi state university and Tashkent state technical university named after Islam Karimov.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (rasume)) has been posted on the website of the Scientific Council (www.qarshidu.uz) and on Information-education portal "ZiyoNet" (www.ziynet.uz).

Scientific consultant:

Normuradov Muradulla Togaevich

doctor of physical and mathematical sciences, professor

Official opponents:

Mamadlimov Abdugafur Teshaboyevich

doctor of physical and mathematical sciences, academic

Aliqulov Muysin Nortoshevich

candidate of physical and mathematical sciences, docent

Leading organization:

Andijan State University

The defense will take place on "14" 07 2022 at 10⁰⁰ at the meeting of scientific council number PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 for the award of academic degrees at Karshi State University (Address: 180103, Karshi city, Kuchabog street 17. Phone: (0 375) 225-34-13; Fax: (0375) 221-00-56; e-mail: qarshidu@umail.uz). Karshi State University, Main Academic Building (room No. 205).

The dissertation can be found in the Information Resource Center of Karshi State University (registered №108)(Address: 180103, Karshi, Kuchabog street 17. Phone: (0 375) 225-34-13; Fax: (0375) 221-00-56; e-mail: qarshidu@umail.uz).

The Abstract of the dissertation sent out on "02" 07 2022
(Mailing report № 2 on "02" 07 2022).



B.E.Umirzakov
vice-chairman of Scientific Council on award of scientific degrees, doctor of physical and mathematical sciences, professor

G.Kh.Allayarova
Scientific secretary of scientific council on award of scientific degrees, PhD

A.K.Tashatov
Chairman of scientific seminar under scientific council on award of Scientific degrees, doctor of physical and mathematical sciences, professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The importance and necessity of the topic of dissertation:

To date, the world is intensively developing the field of multilayer thin-film nanostructures containing nanophases and layers of metal silicides, which have prospects in the creation of MIS (metal – insulator – semiconductor), SDP (semiconductor – insulator – semiconductor) structures, ohmic contacts and barrier layers at the interphase boundary of these structures, electronic and magnetic memory devices. In this regard, special attention is paid to improving the efficiency of photoelectric converters in the solar energy range due to its optical properties, photovoltaic characteristics and resistance to atmospheric air.

Various methods for the formation of metal silicides based on semiconductors are used in the world and scientific research is being carried out to improve them. In this direction, priority is given to studies on the formation of silicides under the action of active metal ions on the surface and surface areas of a single crystal. At the same time, the preparation of nanoscale structures of the MeSi and MeSi₂ types on the Si surface and subsurface and the study of their composition, size, electronic and crystal structures, emission and optical properties is an urgent problem of physical electronics.

The aim of the research work is the study of the regularities of the formation of heterostructural nanophases and layers of metal silicides on the surface and in the near-surface layers of Si, the study of their composition, structure and physical properties.

The objects of research work of study were single crystals and films of silicon, as well as silicon oxide.

The subject of research is the processes of creating thin nanoscale films of Li⁺, Na⁺, K⁺, Rb⁺, Cs⁺ and Ba⁺ silicides on the surface of Si and SiO₂, their structure and physical properties.

Research methods: The methods used in the dissertation work were Auger electron spectroscopy (OES), characteristic electron energy loss spectroscopy (ECEE), secondary electron spectroscopy (SES) and photoelectron spectroscopy (PES), ultraviolet photoelectron spectrometry (UPS), high-resolution scanning electron microscopy (SEM) and slow electron diffraction (LEED).

Scientific novelty of the research work:

it has been shown that when barium, alkali metal and oxygen ions are implanted into silicon in the energy range $E_0 = 0.5 \div 5$ keV with low doses ($D = 5 \cdot 10^{14}$ ion \cdot sm⁻²), a chemical bond is formed between the atoms of the alloying element and the matrix. At $D = D_s$, a uniformly doped layer is formed. Silicides of the MeSi₂ type and oxide SiO₂ with a thickness of 30-60 Å, with good stoichiometry are formed after heating at the optimum temperature for 30-40 minutes;

the correlation between changes in the values of the secondary electrons coefficient (SEE) δ_m and the depth of the exit of the true secondary electrons (SEE) λ silicon oxide film upon implantation of Ba⁺ ions was determined. It has been

shown that when SiO₂ is doped with Ba⁺ ions, the value of the true secondary electrons (SEE) exit depth increases up to two times and amounts to ~ 600-650 Å;

for the first time, by the method of ion implantation and magnetron ion-plasma sputtering, a hidden layer of BaSi₂ was obtained in the near-surface region of Si. The sizes of BaSi₂ nanophases at which quantum size effects are manifested are determined;

the main mechanisms leading to a change in the electronic structure of Si upon ion implantation have been established.

The practical results of the study are as follows:

the main mechanisms leading to a change in the electronic structure of Si during ion implantation were revealed using various unrelated methods of electron spectroscopy;

a method was developed for obtaining hidden BaSi₂ layers in the near-surface region of Si using ion implantation and magnetron deposition methods;

the optimal modes of ion implantation (energy, dose, and type of ion) and subsequent annealing were determined to obtain MeSi₂ – type silicides on the surface and in the near – surface region of Si.

Implementation of the research results. The main results of studies of the structure formation, electronic and optical properties of thin films of metal silicides on silicon single crystals and heterostructures:

conclusions about the formation of chemical bonds between the atoms of the matrix and alloying elements at low doses ($D=5 \cdot 10^{14}$ ion·sm⁻²), in the energy range $E_0 = 0.5 \div 5$ keV, in single-crystal silicon implanted with Ba⁺, alkali metals and oxygen, were used in the study of the main regularities of the formation of nanoscale structures on the surface and near-surface layers of silicon and silicon oxide in JSC “Photon” (Certificate of JSC “Photon”, April 27, 2022, No. 142). As a result, the methods of ion implantation and magnetron sputtering yielded a BaSi₂ hidden layer in the near-surface region of Si, determined the sizes of BaSi₂ nanophases, and revealed quantum size effects. During the implantation of active metal ions into silicon samples, an analysis of the depth redistribution of atoms specially introduced into it made it possible to determine, depending on their type, an increase in their concentration either in the ion-doped layer or in the undoped Si region;

the formation of a homogeneous alloy layer at ion doses ($D=D_s$) equal to the saturation dose revealed the formation of silicides of the MeSi₂ type of good stoichiometry with a thickness of 30-60 Å upon heating to the optimum temperature (450-500°C) for 30-40 minutes. The results were used in the implementation of the fundamental project OT-F2-53 “Quantum-size effects and electronic properties of two-dimensional nano-sized structures created on the surface and surface of the A³B⁵ and A²B⁶ film” (Reference of the rector of the Tashkent State Technical University named after Islam Karimov No. 01/9-14-1343). The results obtained by the obtained mechanism made it possible to explain the energy band width curvature and the shifts of the main surfaces of the GaAs, CdTe, CdS, GaMeAs, CdMeTe, and CdMeS structures.

Approbation of the research results. The results of this study were discussed at 8 international and 3 republican scientific and practical conferences.

Publication of research results. The results obtained on the topic of the dissertation are presented in 16 scientific works, including 5 of them in publications recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of scientific results of doctoral dissertations, 3 of them in international and 2 in republican journals.

Structure and volume of dissertation. The dissertation work consists of an introduction, four chapters, a conclusion and a list of references. The work is presented in 142 typewritten texts, including 51 figures and 9 tables.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть, part I)

1. Normuradov M.T., Rysbaev A.S., Khujaniyazov J.B., Normuradov D.A. Structure of MeSi silicide films (Me: Li, Rb, K and Cs) according to electron microscopy data and the diffraction of slow electrons. // Journal of surface Investigation: X-ray, Synchrotron and neutron techniques, 2020, Vol. 14, № 5, pp.1066-1071. doi:10.1134/S1027451020050365 (№3 Scopus: IF=0,36).

2. Rysbaev A.S., Normurodov M.T., Khujaniyozov J.B., Rysbaev A.A., Normurodov D.A. On the Formation of Silicide Films of Metals (Li, Cs, Rb, and Ba) During Ion Implantation in Si and Subsequent Thermal Annealing. // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2021, Vol. 15, No. 3. – pp. 607-610. Doi: 10.1134/S1027451021030319 (№3 Scopus: IF=0,36).

3. Нормуродов Д.А. Формирование тонких пленок методом ионно-плазменного и ионно-лучевого нанесения. // ҚарДУ хабарлари 2021 (4) 50. – С.18-23 (01.00.00. ОАК Раёсатининг 2021 йил 31 мартдаги 295/6-сон қарори).

4. Умирзаков Б.Е., Нормуродов М.Т., Нормуродов Д.А., Бекпулатов И.Р. Состав и электронная структура скрытых наноразмерных фаз и слоев BaSi₂, созданных в приповерхностной области Si. // Физика и техника полупроводников, 2022, том 56, вып. 5. С.491-495. DOI: 10.21883/FTP.2022.05.52351.9795 (Импакт фактор РИНЦ 2018 = 0,802).

5. Нормуродов Д.А. Структура и свойства границы раздела нанопленка-полупроводник. // ҚарДУ хабарлари 2022 (1) 51. – С. 12-16 (01.00.00. ОАК Раёсатининг 2021 йил 31 мартдаги 295/6-сон қарори).

II бўлим (II часть, part II)

1. Нормуродов М.Т., Нормуродов Д.А., Бекпулатов И.Р., Хужаниязов Ж.Б. Влияние технологических режимов ионной имплантации и последующего отжига на профили распределения имплантированных атомов в Si(111) и Si(100). // Восьмая международная конференция по физической электронике IPES-8. – Ташкент, 2021. – С. 60-61.

2. Нормуродов М.Т., Рысбаев А.С., Нормуродов Д.А., Хужаниёзов Ж.Б., Холмухамедова В.Х. Спектроскопия упругорассеянных электронов – новый метод диагностики электронного состояния поверхности. // Труды XXIV Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» Москва, Россия 19-23 августа 2019 г. том 2. – С. 76-79.

3. Рысбаев А.С., Нормуродов М.Т., Хужаниёзов Ж.Б., Нормуродов Д.А. Об образовании пленок силицидов металлов (Li, Na, K, Cs, Rb, Ba) при ионной имплантации в Si и последующем термическом отжиге. // Труды XXIV Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» – М., 2019 г. том 2. – С. 159-163.

4. Рысбаев А.С., Нормурадов М.Т., Бекпулатов И.Р., Нормурадов Д.А. О влиянии предварительной имплантации B^+ на распределение Na^+ в кремнии. // Тезисы докладов 50-й международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. – М., 2021. – С. 141.

5. Нормурадов М.Т., Рысбаев А.С., Нормурадов Д.А., Турсунметова З.А. Формирование и свойства пленок дисилицида бария. // Тезисы докладов 50-й международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. – М., 2021. – С. 140.

6. Нормурадов М.Т., Рысбаев А.С., Нормурадов Д.А. Спектроскопия упруго отраженных медленных электронов – новый метод диагностики электронного состояния поверхности. // “Фан, таълим ва ишлаб чиқариш интеграцияси” Хорижий олимлар иштирокида ўтказилган Республика илмий-амалий конференцияси материаллари тўплами. 2020 й. – 199-202 б.

7. Нормурадов М.Т., Нормурадов Д.А., Давранов Қ.Т. Изменение структуры и свойств поверхности материалов низкоэнергетической ионной имплантации. // “Фан, таълим ва ишлаб чиқариш интеграцияси” Хорижий олимлар иштирокида ўтказилган Республика илмий-амалий конференцияси материаллари тўплами. 2020 й. – 193-196 б.

8. Нормурадов М.Т., Нормурадов Д.А., Давранов Қ.Т. Исследование образования диэлектрических плёнок на поверхности кремния с применением ионной имплантации. // “Фан, таълим ва ишлаб чиқариш интеграцияси” Хорижий олимлар иштирокида ўтказилган Республика илмий-амалий конференцияси материаллари тўплами. 2020 й. – 244-249 б.

9. Нормурадов М.Т., Нормурадов Д.А., Давранов Қ.Т. Формирование тонких пленок силицидов металлов методами ионно-плазменного и ионно-лучевого нанесения. // Материалы Международной научной конференции «Тенденции развития физики конденсированных сред» Фергана, 25-май. 2021 г. – С. 51-53.

10. Нормурадов М.Т., Нормурадов Д.А., Давранов Қ.Т., Хамидов Л.Ш. Взаимодействие электронов малых и средних энергий с поверхностью металла и сплава, имплантированных ионами бария. // Материалы Международной научной конференции «Тенденции развития физики конденсированных сред» Фергана, 25-май. 2021 г. – С. 54-57.

11. Нормурадов Д.А. Создание новых материалов с применением низкоэнергетической ионной имплантации. // Материалы Международной научной конференции «Тенденции развития физики конденсированных сред» Фергана, 25-май. 2021 г. – С. 58-62.

Автореферат Қарши давлат университетининг “ҚарДУ хабарлари” илмий-назарий, услубий
журнали таҳририясида таҳрирдан ўтказилди (28.06.2022 йил).

Гувоҳнома № 14-061

28.06.2022. Босишга рухсат этилди.
Офсет босма қоғози. Қоғоз бичими 60x84 1/16.
“Times” гарнитураси. Офсет босма усули.
Ҳисоб-нашриёт т. 3.2. Шартли б.т. 3,7.
Адади 60 нусха. Буюртма №. 37

Қарши давлат университети
кичик босмахонасида чоп этилди.