ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАР ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

БОЛТАЕВ ХУРШИД ХАМИДОВИЧ

ЮҚОРИ ВАКУУМЛИ ЧАНГЛАТИШ ВА ИОН ИМПЛАНТАЦИЯ УСУЛИ БИЛАН Si СИРТИДА ОЛИНГАН НАНОСТРУКТУРАЛАРНИНГ ЭЛЕКТРОН ВА ОПТИК ХУСУСИЯТЛАРИ

01.04.04 - Физик электроника

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент шаҳри – 2021 йил

УДК 535.371:535.016:538.975

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

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

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

Болтаев Хуршид Хамидович
Юқори вакуумли чанглатиш ва ион имплантация усули билан Si сиртида олинган наноструктураларнинг электрон ва оптик хусусиятлари …….....…… 3

Болтаев Хуршид Хамидович
Электронные и оптические свойства наноструктур, созданных на поверхности Si методами высоко вакуумного напыления и ионной имплантации ……..... 21

Boltaev Khurshid Khamidovich
Electronic and optical properties of nanostructures created on the Si surface by high vacuum deposition and ion implantation …… 39

Эълон қилинган ишлар рўйхати
Список опубликованных работ
List of published works……..... 42

ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАР ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

БОЛТАЕВ ХУРШИД ХАМИДОВИЧ

ЮҚОРИ ВАКУУМЛИ ЧАНГЛАТИШ ВА ИОН ИМПЛАНТАЦИЯ УСУЛИ БИЛАН Si СИРТИДА ОЛИНГАН НАНОСТРУКТУРАЛАРНИНГ ЭЛЕКТРОН ВА ОПТИК ХУСУСИЯТЛАРИ

01.04.04 - Физик электроника

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент шаҳри – 2021 йил

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2018.2.PhD/FM243 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ислом Каримов номидаги Тошкент давлат техника университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус ва инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида (www.iplt.uz) ҳамда «ZiyoNet» ахборот-таълим порталида (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:	**Ташмухаммедова Дилноза Артикбаевна** физика-математика фанлари доктори, профессор
Расмий опоннентлар:	**Исаханов Зинаобидин Абилпейзович** физика-математика фанлари доктори, катта илмий ходим
	Рахмонов Ганибай Таджиевич физика-математика фанлари номзоди, доцент
Етакчи ташкилот	**Урганч давлат университети**

Диссертация ҳимояси Ион-плазма ва лазер технологиялари институти ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 рақамли илмий кенгашнинг 2021 йил « 28 » 05 соат 16^{00} даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 33-уй. Тел./факс: (99871) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz, Ион-плазма ва лазер технологиялари институти мажлислар зали).

Диссертация билан Ион-плазма ва лазер технологиялари институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (6 рақами билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 33-уй. Тел: (99871) 262-31-69.)

Диссертация автореферати 2021 йил « 12 » 05 куни тарқатилди.

(2021 йил « 12 » 05 даги 6 рақамли реестр баённомаси)

Х.Б.Ашуров
илмий даражалар берувчи
Илмий кенгаш раиси,
т.ф.д., профессор

И.Д.Ядгаров
илмий даражалар берувчи
Илмий кенгаш илмий котиби,
ф-м.ф.д., катта илмий ходим

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

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Ҳозирги вақтда ярим ўтказгичли ва диэлектрик плёнкалар сиртидаги наноўлчамли структуралар хусусиятлари жадал ўрганилмоқда. Наноўлчамли соҳада нанокристаллар ўлчамини камайиши сезиларли равишда унинг электрон ва кристалл структурасини ўзгаришига олиб келади. Хусусан, кремнийли квант нуқталарининг таъқиқланган зона кенглиги кристалл ҳолатдаги кремний таъқиқланган зона кенглигидан икки марта катта бўлади. Ушбу параметрларнинг ўзгариши ўртасидаги ўзаро боғланишини аниқлаш илмий ва амалий аҳамиятга эга. Нанокристаллар ва наноплёнкалар ҳосил қилишнинг замонавий усулларидан бири кичик энергияли ионлар имплантацияси усулидир. Бу жиҳатдан турли усулларда кремний асосида наноўлчамли структуралар ҳосил қилиш ва уларнинг таркиби, электрон ва кристалл тузилиши, электр ва оптик хусусиятларини ўрганиш замонавий физик электрониканинг долзарб муаммолари ҳисобланади.

Сўнгги вақтларда Республикамизда сирт физикаси ва физик электрониканинг долзарб муаммолари, микро- ва наноэлектроника курилмаларини ривожлантиришда наноўлчамли структураларни олиш бўйича илмий-тадқиқот ишлари фаол олиб борилмоқда. Актив металл ионлари билан имплантация қилиниб, хусусияти ўзгартирилган Si поли- ва монокристалини кенг қамровли тадқиқотлар ўтказилди. Шунингдек, термодиффузияда кремний сиртида олинган Ва ва Pd наноўлчамли силицид қатламлари шаклланишининг физик механизми ва қонуниятлари тадқиқ қилинди.

Ушбу диссертация иши Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947 сонли “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида[1]” Фармонида белгиланган вазифаларга мос келади.

Диссертация бўйича олиб борилаётган тадқиқотлар 2015 йил 15 декабрда қабул қилинган “2011-2015 йилларда Ўзбекистон Республикаси саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида”ги № ПФ-1442 сонли, 2017 йил 7 февралдаги “2017- 2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича Ҳаракатлар стратегиясини амалга ошириш бўйича кейинги чора-тадбирлар тўғрисида”ги № ПФ-4947 сонли Президент Фармонини, 2017 йил 17 февралдаги “Фанлар академияси фаолияти, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги № ПҚ-2789 сонли, 2019 йил 22 августдаги “Иқтисодий ва ижтимоий соҳаларнинг энергия самарадорлигини ошириш, энергия тежайдиган технологияларни жорий этиш ва қайта тикланадиган энергия манбаларини ривожлантириш бўйича тезкор чора-тадбирлар тўғрисида”ги ПҚ-4422-сонли

[1] 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”ги Ўзбекистон Республикаси Президентининг Фармони.

Президент Қарорини, шунингдек, Республикада сўнгги йилларда ушбу соҳада қабул қилинган бошқа меъёрий ҳужжатларга киритилган вазифаларни бажаришда маълум даражада хизмат қилади.

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

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Берилган физик хусусиятларга эга наноструктурани ҳосил қилиш муаммоси устида дунёнинг етук олимлари ишламоқдалар. АҚШ олимлари W.Theis ва R.M.Tromplар Si(001) сирти топографиясини 650 ºС ҳароратда гомоэпитаксиал ўсиш вақтида тадқиқ қилишди ва “таянч” оролчалар сиртида ўзак зичлиги профилини аниқлашди. Рус олимлари С.В.Ситников ва бошқалар Si(111)нинг ультратекис сиртида иккиўлчамли оролчалар вужудга келиши жараёнини ўрганишди, А.М.Мизеров ва бошқалар экспериментал равишда Si(111) таглигида GaN эпитаксияси учун оптимал бошланғич шароитларни ўрганишди.

Япониялик K.Nakagava, M.Miyao ва Y.Shirakiлар кремнийда молекуляр нурли эпитаксия (МНЭ) усулида сегрегация қилинган сурма ва галлий атомларини таглик ориентациясига боғлиқлигини тадқиқ қилишди. МНЭ усулида ўстириш вақтида легирланган киришма атомлари ўсувчи қатламга қисман киритилган, қолдиқлар эса сирт бўйлаб тақсимланади. Сурма ва галлий учун фаоллашув энергиялари мос равишда 0,75 эВ ва 0,45 эВ. Улар бир хил фаоллашув энергияларига эга бўлсада, Si(111) га қўшилиш коэффициентлари иккала атомларнинг легирловчи киритмалари Si(100) дан ўн баробар катта. Ушбу натижалар сирт миграцияси модели билан яхши тушунтирилади.

Сўнгги 10-15 йил ичида физика-математика фанлари доктори, профессор Б.Е.Умирзаков раҳбарлиги остида Тошкент давлат техника университетида турли табиатли материаллар асосида наноўлчамли структураларни олиш ва уларнинг электрон хусусиятларини ўрганишга қаратилган интенсив тадқиқотлар олиб борилди. Ушбу тадқиқотлар натижасида ионларни имплантация қилиш, ўта юқори вакуумли ўтказиш ва термодиффузия усулларидан фойдаланган ҳолда Mo, Si, GaAs, CaF_2 ва SiO_2 сирти ва сирт ости соҳаларида наноўлчамли кристалл фазалар ва плёнкалар яратилган.

Бироқ, бугунги кунга қадар Si асосида кўп компонентли наноўлчамли структуралар олиш учун самарали усул ишлаб чиқилмаган, Si сиртининг электрон тузилиши унинг ўтказувчанлик турига ва кристаллографик йўналишларига боғлиқлиги кам ўрганилган, кремнийда термодиффузия асосида палладий ва барий силицидларининг шаклланиш қонуниятлари

деярли ўрганилмаган, квант ўлчамли эффектларнинг пайдо бўлишига таъсир кўрсатадиган силицидли наноструктураларнинг критик ўлчамлари етарлича ўрганилмаган. Замонавий физик электроника ва электрон асбобсозликнинг ушбу долзарб муаммолари асосида диссертациянинг мақсад ва вазифалари аниқланди.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Тошкент давлат техника университети илмий-тадқиқот ишлари тематик режасининг № ЁФ2-02 “Турли табиатли монокристалл материаларнинг таркибини ва сиртдаги киришма атомларнинг жойлашув ўрнини аниқлаш” (2012-2013); № ЁФ-2-6 “Ўта сезгир фотоэлементлар, жумладан қуёш элементларини тайёрлашда қўлланиладиган материалларни таркибини ва физик хусусиятларини электрон спектроскопия усулларида ўрганиш” (2014-2015); № ОТ-Ф2-53 “A^3B^5 ва A^2B^6 пленкаларнинг сирти ва сирт ости соҳаларида ҳосил қилинган икки қатламли наноўлчамли тизимларнинг квант ўлчамли эффектлари ва электрон хоссалари” (2017-2020) фундаментал лойиҳалар доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади юқори вакуумли чанглатиш, термодиффузия ва ион имплантация ёрдамида кремний юзасида наноўлчамли фаза ва плёнка олиш, уларнинг электрон ва оптик хусусиятларини ўрганишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

кремний валент зонасидаги электронлар ҳолатининг зичлигига ўтказувчанлик тури ва кристаллографик йўналишнинг таъсирини ўрганиш;

кремнийда палладий ва барий термодиффузияси вақтида Pd ва Ba силицидларининг вужудга келиш қонуниятларини ўрганиш;

қиздириш ва ион имплантация натижасида ҳосил бўлган металл силицидининг морфологияси, таркиби, кристалл тузилиши ва электрон хусусиятларини ўрганиш;

силицид наноструктураларда квант ўлчамли эффектлар ҳосил бўлишини ўрганиш;

атомлар чангланиши ва ион бомбардимонининг қуёш элементлари ва диодли структураларда ишлатиладиган Si да O ва K киришма атомларининг чуқурлик бўйича профилли тақсимланишига таъсирини ўрганиш;

Тадқиқотнинг объектлари монокристалл Si, Si ва Al плёнка намуналари ҳисобланади.

Тадқиқотнинг предмети ион имплантацияси ва юқори вакуумли термодиффузия вақтида кремний юзасида нанокристаллар ва наноплёнкалар вужудга келишининг физикавий механизмлари ва қонуниятлари ҳисобланади.

Тадқиқотнинг усуллари. Оже-электрон спектроскопия (ОЭС), тез электронларнинг дифракцияси (ТЭД), растрли электрон микроскопия (РЭМ), ультрабинафша фотоэлектрон спектроскопияси (УБЭС), эластик қайтган электрон спектроскопияси (ЭҚЭС), энергиясини характерли йўқотган электронлар спектроскопияси (ЭХЭЙС).

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

n- ва p-тип кремнийнинг валент электронлари зичлиги ҳолати максимумларининг ўрни ва шакли бир-биридан кескин фарқ қилиши кўрсатилган. Валент электронларининг ҳолат зичлиги монокристалларнинг кристаллографик йўналишларига ҳам боғлиқ, аммо ҳар хил қирралар учун айрим максимумларнинг ўрни бир-бири билан тахминан мос келиши аниқланган;

Si сиртига Pd атомлари адсорбцияланганда уларнинг чегарасида қуйи силицириднинг ўта юпқа плёнкасининг шаклланиши кўрсатилган. Pd нинг Si га термодиффизуяси силицид плёнкаси орқали рўй беради ва T=1050-1100 K да гексогонал панжарали бир жинсли Pd_2Si монокристалл плёнкаси шаклланади. Ba-Si тизимида эса Si нинг Ba га ва Ba нинг Si га ўзаро диффузияси туфайли Ba силициди ҳосил бўлади ва T=1100 K ҳароратда кубик панжарали $BaSi_2$ плёнкаси шаклланиши аниқланган;

илк бор монокристалл кремний сиртида ҳосил қилинган $MeSi_2$ нанокристаллар ва наноплёнкаларнинг сирт морфологияси, таркиби, кристалл ва электрон структуралари ўрганилди. $MeSi_2$ тизимининг тўлиқ кристалланиш ҳароратининг ионлар дозаси ва энергиясига ўзаро боғлиқлиги аниқланди;

металл силицид наноструктурани олиш усули таклиф қилинди, илк бор квант ўлчамли эффектлар вужудга келадиган наноплёнкалар қалинлиги ва нанокристалл фаза ўлчамлари аниқланди;

илк бор термодиффузия ва ион имплантацияси усулларида ҳосил қилинган $MeSi_2$-Si тизимида кислород киришма атомларининг чуқурлик бўйича профили ўрганилди.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

кремний сиртини 0,5 дан 5 кэВ энергияли металл ионлари билан нурлантирилиш ва кейинги 1200 К гача бўлган ҳароратда қиздириш йўли билан металл силицид наноструктураларини олиш усули ишлаб чиқилган;

термодиффузия ва ион имплантация усуллари ёрдамида металл силицириднинг наноўлчамли пленкалари олишнинг мақбул шартлари аниқланди.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги замонавий илмий ва эксперимантал усуллардан, тажрибаларнинг зарур статистикасидан, мустақил ўлчаш ва маълумотларни қайта ишлаш техникаларидан фойдаланиш, шунингдек Si ва $CoSi_2$ плёнкалари учун олинган натижаларни, бошқа муаллифларнинг маълумотларига таққослаш билан белгиланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Илмий аҳамияти: тадқиқот натижалари тоза кремний монокристали валент электронлари ҳолатининг зичлиги ва ўтказувчанлик турига боғлиқлигини аниқлашга имкон беради.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундан иборатки, Pd_2Si, $BaSi_2$ каби наноўлчамли тизимлар олиш учун ишлаб чиқилган усуллар турли хил МОЯ, МДЯ ва ЯДЯ тизимларида, қаттиқ жисмли электрон қурилмалар

учун контактли ва тўсиқли қатламларда, шу жумладан қуёш энергетикасида муҳим аҳамиятга эга.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Нанокристаллар, сиртдаги наноплёнкалар ва кичик энергияли ионлар билан имлантация қилинган Si монокристалл пленкаларининг ҳосил бўлиш қонуниятлари ва физик механизмларини ўрганиш натижаларига кўра:

силицид металл наноструктураларини олиш усулига Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлигининг ихтиро учун патенти олинган (№ IAP 04874 - 2014). Натижа, кремний сиртида ҳосил қилинган силицид плёнкаларининг қалинлиги, кристалл тузилиши ва панжара доимийларини аниқлаш имконини беради;

Наноўлчамли металл силицид плёнкаларининг зона параметрларини аниқлашда олинган натижалар Ф-2-31 рақамли “Наноўлчамли металлар силицид плёнкаларни структураси ва физик хоссаларини ўрганиш ва термосезгир структуралар ҳосил қилиш” мавзусидаги фундаментал лойиҳада қўлланилди (Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2020 йил 2 ноябрда берилган 89-03-4333-сонли маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш силицид плёнкаларнинг электрон тузилиши ва зона параметрларини ўлчаш имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари 10 та халқаро илмий-амалий анжуманларда муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 18 та илмий иш нашр этилган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш учун тавсия этилган илмий нашрларда 5 та мақола чоп этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, илова ва фойдаланилган адабиётлар рўйхати, 51 та расм, 8 та жадвалдан иборат. Диссертациянинг ҳажми 123 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзаблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, объект ва предметлари тавсифланган, Республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

«Кремний асосидаги наноструктураларнинг таркиби, тузилиши ва физик хусусиятлари» номли биринчи бобда Si асосида чанглатиш, термодиффузия ва ион имплантация усулларида ҳосил қилинган истиқболли наноструктураларнинг олиниши ва хусусиятларини ўрганишга бағишланган тадқиқотларнинг асосий мазмуни таҳлил қилинган.

Молекуляр нурли эпитаксия усулига асосланган берилган хусусиятли наноструктуралар шаклланиш жараёнини бошқариш замонавий нанотехнологияларнинг долзарб муаммоси ҳисобланади. Электр майдонда сиртдан атомлар диффузиясини тавсифлаш учун бир қанча омилларни эътиборга олиш зарур. Биринчидан, сирт бўйлаб ўтказувчанликка таъсир қилувчи локаллашган электрон ҳолатлар (Тамм ҳолати) пайдо бўлади. Иккинчидан, адсорбцияланган зарралар диффузиясини белгилайдиган юқори структурали реконструкциялар мавжуд. Учинчидан, адсорбцияланган атомларнинг манбаи ва чўкмаси бўлган атом поғоналарининг мавжудлиги фақатгина адсорбцияланган атомлар концентрациясини ўзгартирибгина қолмай, балки эпитаксиал ўстириш ёки юқори ҳароратли қиздириш жараёнида ўзлари кўчиб ўтади.

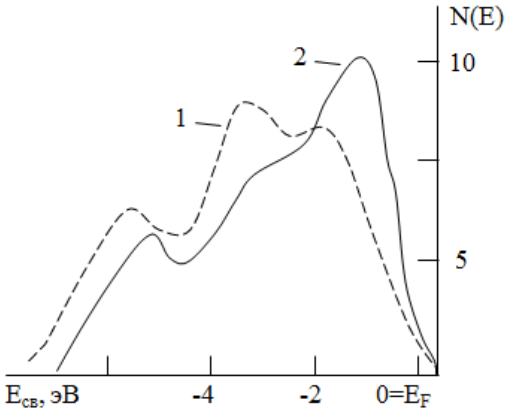
Тадқиқотларнинг қисқача таҳлил натижалари шуни кўрсатдики, ҳозирги вақтда ион имплантация усулида олинган Si эпиплёнкаси шаклланиши, таркиби, сирт топографияси ва наноўлчамли фаза тузилиши, кремний сиртида ҳосил қилинган оролчали наноплёнкалар хусусияти ва таркиби, кремний асосида кўпкомпонентли наноструктураларнинг тузилиши, электрон ва оптик хусусиятлари яхши ўрганилган.

Аммо, ҳозирги вақтга қадар Si сирти электрон тузилишининг унинг ўтказувчанлик турига ва кристаллографик йўналишига боғлиқлиги кам ўрганилган, кремнийда Pd ва Ba термодиффузияси вақтида палладий ва барий силицидларини шаклланиш қонуниятлари ўрганилмаган, квант ўлчамли эффектлар ҳосил бўладиган силицид наноструктураларнинг критик ўлчамлари етарлича ўрганилмаган.

«Экспериментал тадқиқотлар усули» номли иккинчи бобда материалларнинг таркиби, тузилиши, электрон ва оптик хусусиятларини тадқиқ қилиш усуллари ва ион имплантация, чанглатиш ва термодиффизия усулларининг қурилмалари келтирилди. Тадқиқотлар иккиламчи электронлар эмиссияси (ИЭЭ) ва фотоэлектронларнинг квант чиқиши коэффицентларининг энергия бўйича боғланиши, Оже-электронлар спектроскопияси (ОЭС), электронларнинг характерли энергиясини йўқотиш спектроскопияси (ЭХЭЙС), эластик қайтган секин электронлар спектроскопияси (ЭҚСЭС), ультрабинафша фотоэлектронлар спектроскопияси (УФЭС), шунингдек растрли электрон микроскопия (РЭМ), ва тез электронлар дифракцияси (ТЭД) каби усуллар ёрдамида олиб борилди.

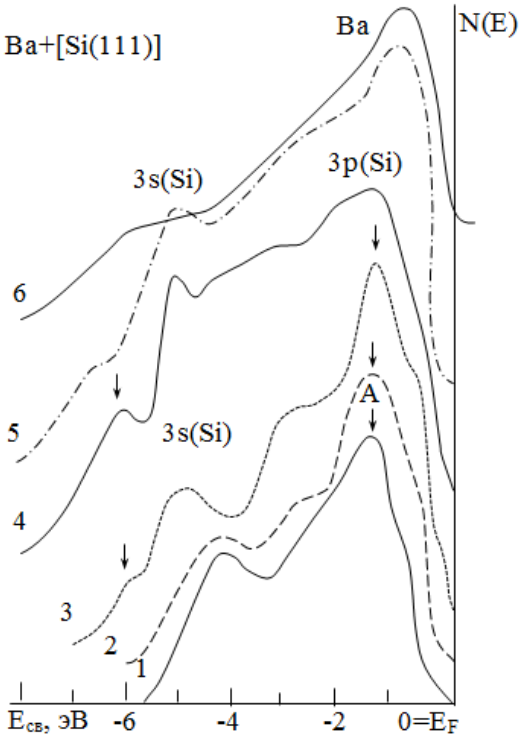
«Юқори вакуум шароитида актив металлар билан чанглатилган Si сиртида ҳосил қилинган наноплёнкаларнинг электрон ва оптик хусусиятлари» номли учинчи бобда юқори вакуум ва кислород атмосферасида металл атомларини адсорбцияланган Si монокристалларининг таркибини ўзгартириш морфологияси, электрон ва кристалл тузилиши, эмиссия ва оптик хусусиятлари бўйича барча тадқиқот натижалари келтирилган. Шу билан бир қаторда Si да Ba ва Pd нинг термо диффузия вақтида наноўлчамли силицид қатламларининг пайдо бўлишининг қонуниятлари тадқиқ қилинган. 1-расмда яхши тозаланган n- ва p-типидаги

Si(111) намуналари учун фотоэлектрон спектрлар тасвирланган. Абцисса ўқига электронларнинг боғланиш энергияси жойлаштирилган (энергия соф Pd нинг Ферми сатҳларида ҳисобланади). 1-расмдан кўриниб турибдики, бу эгри чизиқлар аниқ тузилишга эга. Улар тахминан валент зона электронларининг зичлик ҳолати тақсимотини акс эттиради. Кейинги тадқиқотлар шуни кўрсатдики, турли хил чегараларнинг эгри тузилиши ҳам бир-биридан сезиларли даражада фарқ қилади, аммо улар электрон энергиясининг яқин қийматларида кузатиладиган бир қатор хусусиятларга эга. Шу сабабли, ҳар хил чегаралар учун валент электронларнинг энергия ҳолати зичлигининг баъзи максимал қийматлари тахминан мос келишини тахмин қилишимиз мумкин. Биз ўрганган барча намуналар юзасида металл ва газ атомларининг адсорбцияланиши фотоэлектронларнинг ЭЭТ (эгрилик энергия тақсимоти)ида кескин ўзгариш-ларга олиб келади.



1-расм. Si(111) монокристаллар учун электронларнинг нормаллашган энергия бўйича тақсимоти:
1 - n-тип; 2 - p-тип

2-расмда hν=10,2 эВ энергияли уйғонган квантларда олинган турли қалинликдаги Ba плёнкаси билан қопланган Si(111) учун ФЭС кўрсатилган. Аниқлик учун, эгри чизиқлар вертикал равишда силжиган. Кичик қалинликдаги барий қопламаларининг (θ=0.5-0.6), кремнийдан асосан электронлар чиқарилганда, ЭЭТда қуйидаги ўзгаришлар кузатилди: ўсиб бориши билан сирт ҳолатларидан келиб чиқадиган хусусиятлар янада аниқроқ ажралиб туради; спектрнинг бошланиши ва валент зонадаги электронларнинг зичлиги максимум чўққилари паст энергиялар томон силжийди; $E_{боғ}$=-6 эВ соҳада Si (s-ҳолатлардан электрон чиқиши)да янги чўққига ҳосил бўлади, ЭЭТ кенглиги ошади ва фотоэлектронларнинг квант чиқиши ошади. ЭЭТнинг кичик энергияли ҳолатининг ўзгариши, φ пасайишига тўғри келади ва A чўққисидаги силжиш зоналарнинг эгилиши ўзгаришига тенгдир. p-типли Si сиртида Ba адсорбцияси

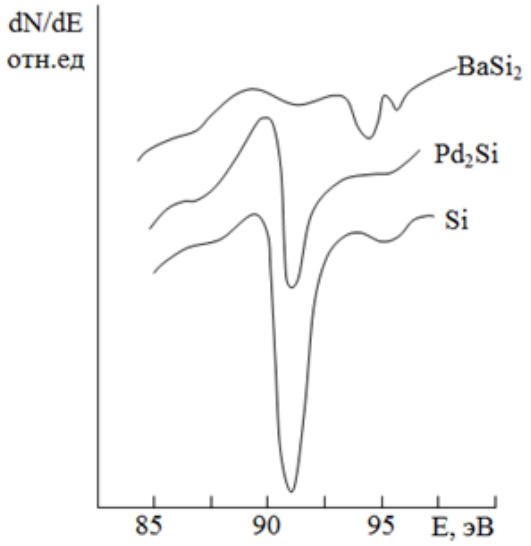


2-расм. θ қалинликдаги барий плёнкали кремнийнинг ФЭС, моноқатлам:
1 - 0; 2 - 0,2; 3 - 0,4; 4 - 0,7; 5 - 1; 6 - 2. hν = 10,2 эВ

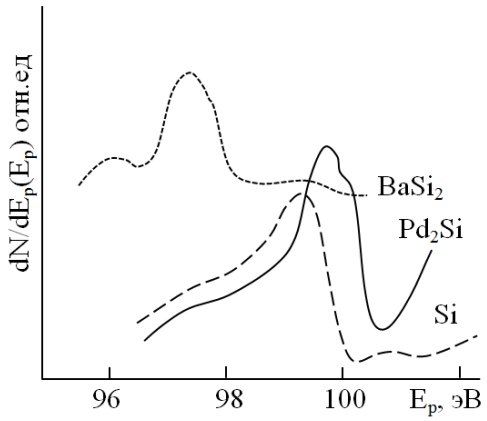
эгрилик зонасини ортишига олиб келади, яъни бу ҳолат юзада донорлар даражасининг ортиши билан боғлиқ. Y нинг ўсиши асосан чиқиш ишининг камайиши ва эгрилик зоналарнинг ортиши билан боғлиқ. Барий қатлами қалинлигининг янада ортиши билан (2-расм, 4-6-эгри чизиқлар) Si га хос бўлган чўққиларнинг интенсивлиги монотон равишда пасаяди ва қуйма барийдан чиқишга мос келадиган структура шакллана бошлайди.

3-расмда тоза кремний ва қалинлиги ~400 Å бўлган $BaSi_2$ ва Pd_2Si плёнкаларининг оже-электрон спектрлари тасвирланган. Бунда силицид плёнкаларининг спектрлари кремний спектрларидан сезиларли даражада фарқ қилишини кўриш мумкин. Хусусан, $BaSi_2$ ва Pd_2Si силицидлари ҳосил бўлганда $L_{2,3}VV$ Si чўққиси нафақат интенсивликда, балки ҳолати ва шакли ҳам сезиларли даражада ўзгаради. Ушбу ўзгаришларга асосланиб, биз кимёвий боғланишларнинг шаклланишини ва ҳосил бўлган бирикмалар турларини баҳоладик.

4-расмда $BaSi_2$ ва Pd_2Si ҳосил бўлиши вақтида кремнийнинг ЭҚЭ (эластик қайтган электронлар) L_{23} чўққиси ҳолатларининг ўзгариши тасвирланган. Кўриш мумкинки, $BaSi_2$ да L_{23} кремний чўққисининг ҳолати 3-4 эВ га, Pd_2Si ҳолатида эса чўққиларнинг силжиши атиги 0,5-1 эВга тенг. Ме ва Si ўртасидаги боғланиш ион-ковалент характерни ҳосил қилади: Ba-Si ҳолатида, ионларнинг боғланиш даражаси Pd-Si га қараганда каттароқдир. Иккала ҳолатда ҳам L_{23} кремний чизиғи пастроқ энергия томон силжийди. Бунинг сабаби, металл силицидлари ҳосил бўлиши вақтида электронлар металл атомларидан Si атомларига ўтиши, бу эса кремний электронларининг боғланиш энергиясининг камайишига олиб келади.



3-расм. Si, $BaSi_2$ плёнкаси ва Pd_2Si силицид плёнкаларининг Оже спектрлари

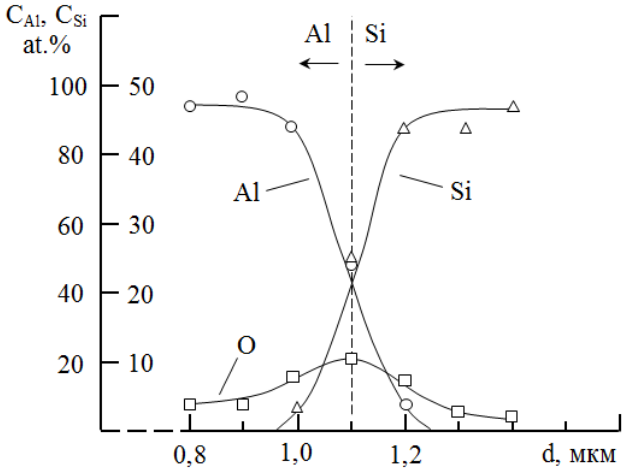


4-расм. Металл силицидлардаги L_{23} кремний линиясининг ЭҚЭ спектрлари

Полинг формуласи бўйича ўтказилган ҳисоб-китоблар шуни кўрсатдики, $BaSi_2$ ҳолатида боғланишнинг ионланиш даражаси 25-30%, Pd_2Ba да эса ~10% бўлади.

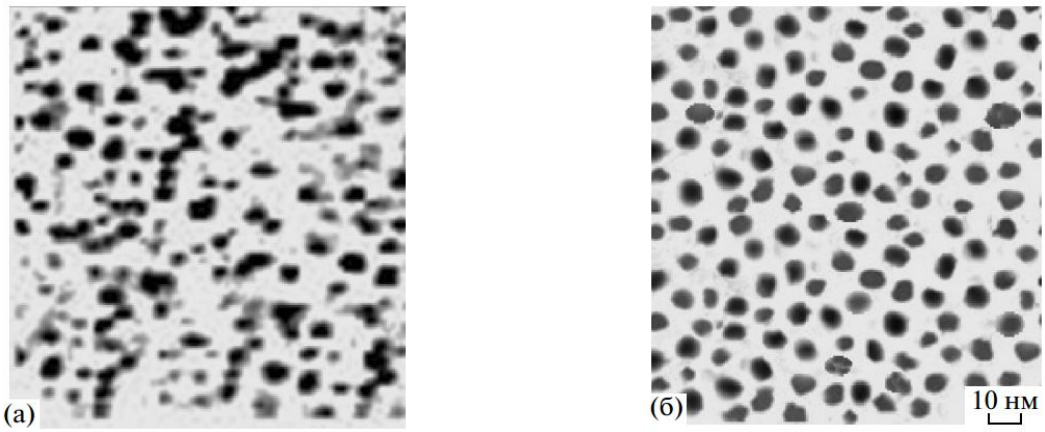
Ишда шунингдек бошқариб бўлмайдиган киришмаларнинг таркиби, уларнинг кимёвий ҳолати ва Al-Si тизимининг чегарасида профилли тақсимоти ҳам ўрганилган. 5-расмда Al-Si контакти чегарасида Al, Si ва O атомларининг профиллари тақсимланиши тасвирлаган. Асосий элементлар (Al ва Si) атомларининг ўзаро диффузияланиши натижасида чегарада қалинлиги ~150-200 нм бўлган ўтиш қатлами ҳосил бўлганлиги кўриниб турибди. O атомларининг бўлиниш чегарасида тақсимланиш концентрацияси максимал қийматга эришади ва 10-12 % атрофида бўлади.

ИИМС ва ОЭС ёрдамида ўтказилган тадқиқот Al-Si контакт соҳасида киришма элементларнинг профилли тақсимланиши, уларнинг металл-яримўтказгичли контакти чегарасида концентрацияси кескин ошишини кўрсатди.



5-расм. Al-Si тизими учун Al (1396 эВ) va Si (1619 эВ) Оже-чўққиларининг интенсивлигига боғлиқлиги. Алюминийнинг қалинлиги ~1 μm.

Тўртинчи бобда **“Кичик энергияли ионларни (E_0=0.5-5 кэВ) имплантация қилиш натижасида олинган металл силицид наноструктураларининг таркиби, тузилиши ва физик хусусиятлари**” ўрганилди. Тажриба натижалари шуни кўрсатдики, мукаммал нанокристалл фазаларининг шаклланиши матрица сиртининг силлиқлиги ва тозалиги даражасига боғлиқ. Биринчи ҳолда, Si юзаси T = 1100 °C гача қиздирилиб тозаланган. 6-расм (а ва б)ларда Si(111) плёнкасининг D = 10^{15} $см^{-2}$ дозада E_0= 1 кэВ бўлган Co^+ ионлари билан имплантация қилинган РЭМ тасвирлари кўрсатилган.



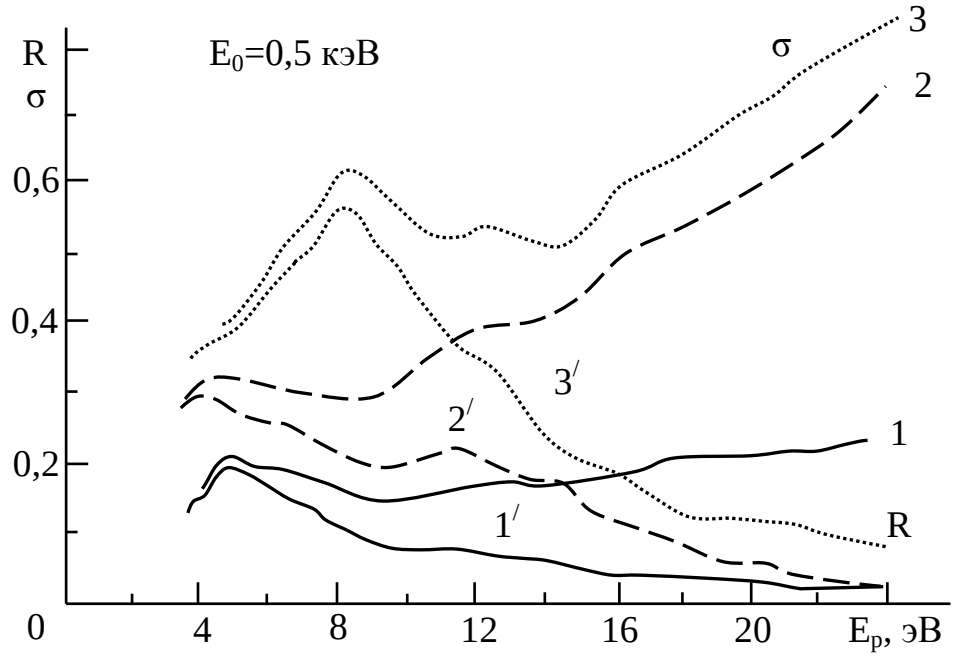
6-расм. Si(111) плёнкасининг E_0=1 кэВ энергияли D=10^{15} $см^{-2}$ нурланиш дозасида Co ионлари билан имплантация қилинган РЭМ тасвирлари: а - фақат юқори ҳароратли қиздириш билан тозаланган Si сирти; б - қиздириш орқали ионли емириш билан тозаланган Si сирт юзаси.

Иккинчи ҳолда, тоза Si сиртини 600 эВ энергияли аргон ионлари билан емириш, сўнгра T=700–800 °C ҳароратда узоқ муддатли қиздириш ва T=1200 °C гача қисқа муддатли қиздириш билан эришилди. Имплантация вақтида диаметри d=1 мм бўлган нур дастаси юзага тушган ва РЭМ тасвир ион имплантация қилинган майдоннинг марказидан d~10 мкм ўлчамга эга бўлди. 6-расмдан кўриниб турибдики, тартибланган силицидли нанокристаллар фақат яхши тозаланган кремний юзасида ҳосил бўлади. Ушбу нанокристалларнинг диаметри 10-20 нм.

Маълумки, кичик энергия соҳасида σ ва R коэффициентларининг энергия билан боғлиқлиги (E_p=1-30 эВ) турли табиатли материаллар сиртининг электрон тузилиши (плазма тебранишлари ва бир заррали қўзғалишлар энергиялари) ҳақида маълумот беради ва сирт таркиби ва тузилишидаги ўзгаришларга жуда сезгир.

$\sigma(E_p)$, $R(E_p)$ эгри чизиқларининг юпқа структурасидаги ўзгариш ва бу коэффициентлар қийматининг ошиши Si монокристалларини кислород ва бор ионлари билан легирлаганда аниқ намоён бўлади (7-расм).

Масалан, $R(E_p)$ эгри чизиғининг асосий максимумининг ҳолати барий ионларини имплантациялашда қуйи энергияларга, O_2^+ ионларини имплантацияси пайтида эса юқори E_p томон силжийди. O_2^+ бўлганда, R_m қиймати ~0,6 га етади.

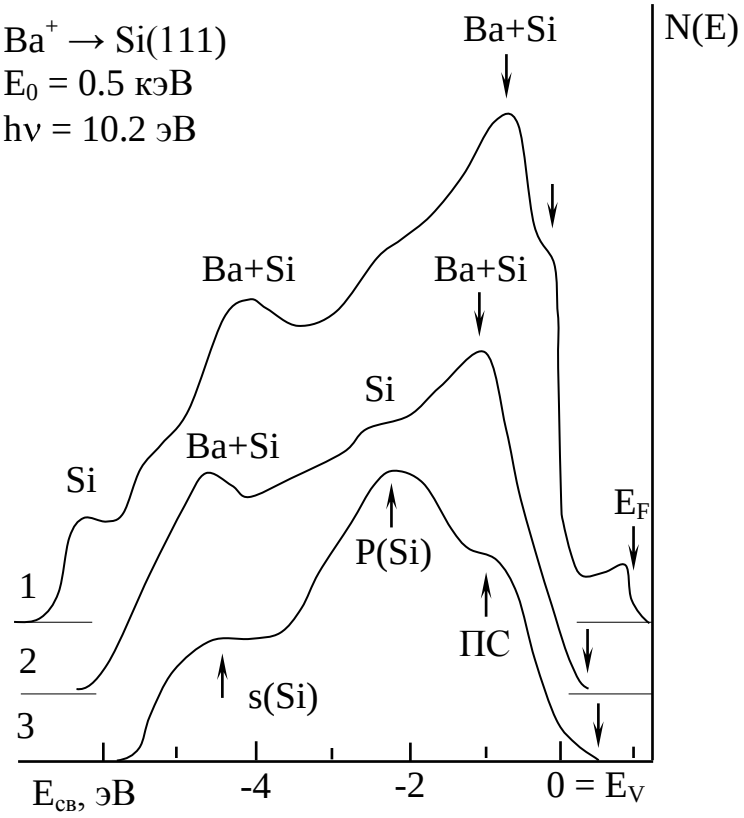


7-расм. E_p нинг σ, R га боғлиқлиги: тоза кремний (1, 1′); Ba^+ (2, 2′) ва O_2^+ (3, 3′) ионлари билан легирланган.

Чиқиш ишига келсак, O_2^+ ионлари билан легирлангандан кейин унинг қиймати бироз ошади ($\Delta e\varphi \approx 0{,}5$-1 эВ), барий билан легирланганда у 2 эВ гача пасаяди. Шундай қилиб, ионларнинг катта дозада имплантация қилиш валент электронлар ҳолатининг зичлиги ва Si диапозонлари параметрларининг

сезиларли ўзгаришига олиб келади, натижада бирламчи электронларнинг қаттиқ жисм билан эластик ва ноэластик таъсир ўтказиш жараёнлари ва иккиламчи электронларни вакуумга чиқариш шартлари сезиларли даражада ўзгаради.

8-расмда $D=D_H=6\cdot10^{16}$ см$^{-2}$ да E_0=0,5 кэВ энергияли Ba^+ ионлари билан имплантация қилинган Si(111) учун қиздиришдан олдин ва кейин олинган фотоэлектрон спектрлари кўрсатилган. 1-эгри чизиқ шуни кўрсатадики, ион имплантация қилинган Si спектрида Ba + Si бирикмасига ва эркин (ортиқча) Ba ва Si атомларига хос хусусиятлар мавжуд. T=1100 К гача қиздирилгандан сўнг, Ba ва Si эркин атомларининг концентрацияси нолга камаяди ва қалинлиги ~25-30 Å бўлган доимий $BaSi_2$ монокристалл наноплёнкаси ҳосил бўлади. T=1400 К да қиздирилгандан сўнг, $BaSi_2$ плёнкаси бутунлай буғланади ва тоза Si(111) спектр тузилиши тўлиқ тикланади.



8-расм. Қиздиришдан кейинги D = $6\cdot10^{16}$ см^2 дозали E= 0,5 кэВ энергияли Ba^+ ионлари билан имплантация қилинган кремнийнинг фотоэлектрон спектрлари, T, К: 1-300 (қиздиришсиз), 2-1100, 3-1400.

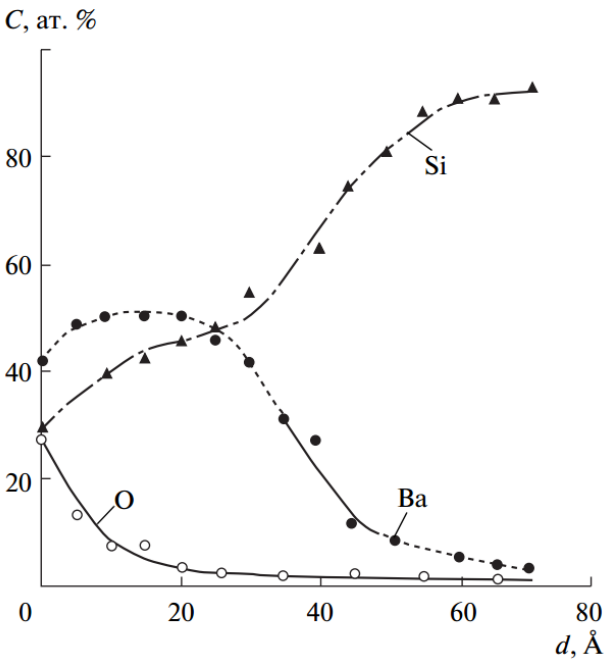
10^{14}-10^{15} см$^{-2}$ оралиғида ионлар миқдорини ўзгартириб, имплантациядан кейинги қиздиришни амалга оширган ҳолда, металл силицидларнинг алоҳида нанокристалл фазалари олинган. 1-жадвалдан кўриниб турибдики, d≈15-20 нм ва h=3-4 нм бўлган нанокристалл фазали силицидларнинг E_g си ҳудди шундай наноплёнканинг E_g сидан 1,5 баравар катта. Кўринишидан, кичик ўлчамларида нанокристалларда квант ўлчамдаги эффектлар намоён бўлади.

1-жадвал.

Қиздириш билан ион имплантация қилинган кремний сиртида ҳосил қилинган силицид нанофазалар ва наноплёнкалар ўлчамларининг энергетик зона параметрларига боғлиқлиги

Силицид	d, нм	b, нм	h, нм	E_g, эВ	E_V, эВ	$\varkappa$, эВ
$CoSi_2$	15-20	50-60	3-4	0,92	5,4	4,5
	25-30	50-60	3-4	0,8	4,8	4
			3	0,6	-	-
	Яхлит плёнка		100	0,5	4,5	4
$NaSi_2$	15-20		3,5-4	0,7		3,5
	30-40					
	Яхлит плёнка		4-5	0,7	4,2	3,5
$BaSi_2$	20-25		4-4,5	0,7	4,1	3,4
	30-40					
	Яхлит плёнка		3-4	0,6	4	3,4

9-расмда 0,5 кэВ энергияли Ba^+ ионлари билан легирланган кремний намунасида асосий (Si, Ba) ва киришма (O) атомларининг ҳаво билан контактдан кейин чуқурлик бўйича тақсимланиши тасвирланган. Расмдан кўриниб турибдики, кислород атомларининг тақсимланиш графиги монотон равишда камаювчи эгри чизиқдан иборат: сиртдаги концентрация 25-28 ат. % ва 30-35 Å чуқурликда, атиги ~ 1–2% ни ташкил этади. Буни, эҳтимол, қуйидагича изоҳлаш мумкин. Имплантация энергиясидан қатъи назар, ионли легирланган намуналар ҳавода сақланганда, уларнинг сиртида камида 3-5 моноқатлам киришма атомлари бир қаватли қатламлари адсорбцияланади. Диффузия сабабли ушбу атомларнинг баъзилари намунага чуқур кириб бориши мумкин. Кичик энергияли имплантацияда, легирланган ионлар асосан сиртости қатламларида локаллашади ва уларнинг зичлигини оширади, бу эса намуна ичига кирадиган атомларнинг диффузияланиш интенсивлигини кескин камайтиради. Ушбу тизимни T~1000 K ҳароратда қисқа муддатли



9-расм. Асосий (Si, Ba) ва киришма (O) атомларининг E_0 = 0,5 кэВ энергияли Ba^+ легирланган ионларини кремний намунаси чуқурлиги бўйича тақсимланиши.

қиздирилиши, 10-15 Å қалинликдаги сиртда O атомлари концентрациясининг кескин камайишига (1-2% гача) олиб келди.

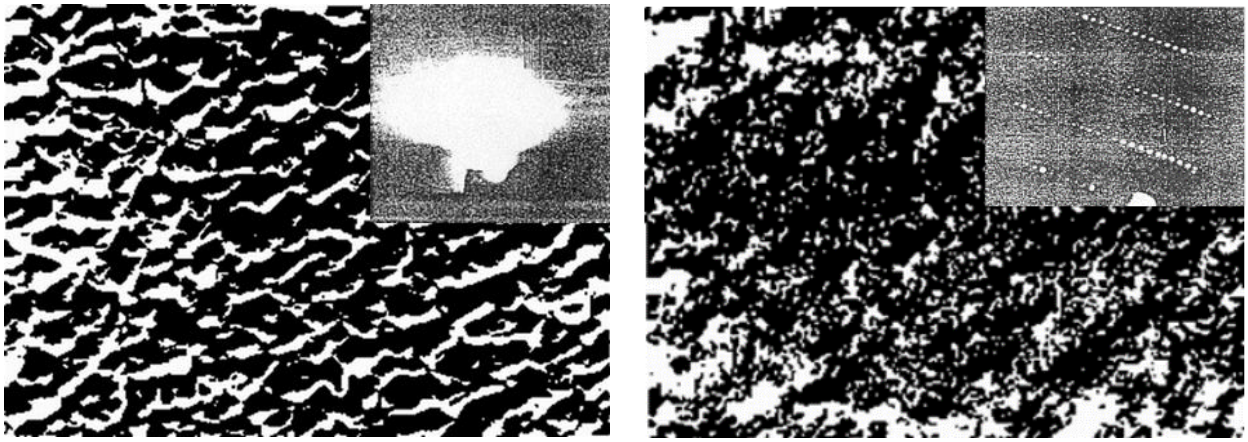
2-жадвалда T=900 K ҳароратда қиздиришдан олдин ва ундан кейин E_0=1 кэВ энергияли, тўйинганлик дозаси $D = 6 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$ бўлган O^+ ионлари билан имплантация қилинган соф Si плёнкаси ва Si учун нур қайтариш коэффициенти *R* қийматлари келтирилган. Ионли легирланган қатламнинг қалинлиги атиги 50-100 Å бўлса ҳам, ион имплантациядан сўнг нур қайтариш коэффициенти кескин камайганлигини кўриш мумкин.

2-жадвал.

Si ва SiO_2 юзаси учун ёруғлик қайтариш коэффициенти R қийматлари

Пленка	Плёнка қалинлиги, нм	R, %		
		λ=400 нм	λ=600 нм	λ=800 нм
Si(111)	3000	55	38	35
$O_2^+ \rightarrow$Si(111) E_0=1 кэВ, $D=6 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$	5-10	22	15	15
SiO_2/Si(111)	5	40	25	28

Si(111) сиртини микрофотографияси шуни кўрсатадики, қалинлиги θ≈200 Å бўлган палладий сирт плёнкаси нотекис уч ўлчовли кичик қиррали ороллар шаклида ўсиб боради (10-расм). Рентген нурли электрон микроскоп ёрдамида аниқланганда нотекисликнинг баландлиги ~50-100 Å ни ташкил этади. Бунда дифракцион тасвирда аморф материалларга хос бўлган катта оқ нуқта кузатилади (10-расм, а қўшимча расм). T=1200 K ҳароратда қиздирилгандан сўнг (10-расм, б) сирт морфологияси ва Pd_2Si монокристалл плёнкалар шаклланишида сезиларли ўсиш мавжуд.



а) б)

10-расм. Pd-Si(111) сиртининг микрофотографияси. θ = 200 Å; T = 1200 K ҳароратда иситишдан олдин (а) ва ундан кейин (б)

3-жадвалдан кўриниб турибдики, металл силицидларнинг шаклланиши барча ҳолатларда тармоқли бўшлиқнинг кескин торайиши ва электрон яқинлигининг пасайиши, шунингдек панжара тури ва параметрларининг ўзгариши билан бирга келади. Ушбу плёнкаларнинг барчаси силицидга нисбатан гетероструктурадир. Бундан ташқари, ушбу силицидларнинг тақиқланган зонаси бир-биридан сезиларли даражада фарқ қилмайди. Шу билан бирга, $BaSi_2$ ҳолати Ферми сатҳи валент зонаси яқинида, Pd_2Si ҳолати эса, ўтказувчанлик зонасининг пастки қисмида жойлашган.

3-жадвал.

Силицидлар учун энергия зоналари ва кристалл панжараларининг параметрлари

Тадқиқот объекти	Зона параметрлари, эВ				Панжара тури	Панжара тури, Å
	E_V	E_F	E_g	χ		
Si(111), n-тип	5.1	4.2	1.1	4.0	Кубик	a=5,41
$BaSi_2$	4.0	3.9	0.7	3.3	кубик	a=6,20
Pd_2Si	4.1	3.9	0.3	3.8	гексогональ	a=6,50 c=3,45

Фото- ва эластиклик қайтган электронлар эгри чизиқдаги юпқа структуралари тузилишини таҳлил қилиш асосида ўрганилаётган материаллар юзасининг сифатли энергия диаграммасини тузиш мумкин. Ўтказувчанилик зонасида иккита чўққи мавжуд. Pd силицид учун бундай диаграмма биринчи марта олинган.

4-жадвалда $CoSi_2$/Si(111) наноплёнкалар ва нанокристаллар учун УБЭС усулида олинган спектрларини таҳлил қилиш натижасида олинган энергия зоналари параметрлари кўрсатилган.

4-жадвал шуни кўрсатадики, плёнка қалинлиги 100 дан 30 нм га камайиши билан таъқиқланган зона қалинлиги ~0,1 эВ га ошади. Нанокристаллар мисолида наноматериаллар физик хусусиятларининг унинг ўлчамларига боғлиқлиги кузатилган. Хусусан, наноплёкалардан нанокристалларга ўтишда таъқиқланган зона 0.3 – 0.4 эВ га ошади.

4-жадвал.

$CoSi_2$/Si нанокристаллари ва наноплёнкалар учун энергетик зоналар параметрлари

Пленка	Ф, эВ	E_g, эВ	χ, эВ
НК $CoSi_2$ (d = 25 нм, h = 3–4 нм)	5,4	0,9	4,5
$CoSi_2$ (h = 1000 Å)	4,5	0,5	4,0
$CoSi_2$ (h = 30 Å)	3,6	0,6	3,0

ХУЛОСА

Si сиртида юқори вакуумли чанглатиш ва ион имплантация усуллари ёрдамида яратилган наноструктураларнинг электрон ва оптик хусусиятларини экспериментал тадқиқотлари асосида қуйидаги хулосалар чиқарилди:

1. Тоза Si монокристали валент электронларининг зичлик ҳолати уларнинг кристаллографик йўналишига ва ўтказувчанлик турига боғлиқлиги аниқланди. Турли чегаралар учун электрон ҳолатлар зичлигининг баъзи бир максимумлар ҳолати тахминан бир-бирига тўғри келишини кўрсатди, аммо уларнинг шакли ва интенсивлиги кескин фарқ қилади.

2. Барий ва кислород атомларининг адсорбциясининг Si эгилиш зонаси ва эмиссия хусусиятларига таъсири аниқланди. Хусусан, Ba p-типидаги Si юзасига чанглатилганда, юзадаги донор сатҳлар концентрациясининг ортиши натижасида зонанинг эгилиши ортади. Шу сабабли барийни $\theta \leq 1$ билан ўтқазиш вақтида σ_m ва γ нинг ўсиши асосан еφ нинг пасайиши ва зоналар эгилишининг ортиши билан боғлиқ. $\theta \leq 1$ билан O_2 нинг Si сиртига адсорбциясида, зоналарнинг эгилиши тўғриланади. Кислород электрон қабул қилувчи деб тахмин қилиш мумкин. $\theta=1$ да кислород зоналар эгилишини тўлиқ текислайди ва тақиқланган ва валентли зоналардан сиртий электрон ҳолатини йўқотади.

3. Si га термодиффузия қилинган Pd ва Ba натижасида ҳосил бўлган Pd_2Si ва $BaSi_2$ плёнкалари шаклланишининг асосий қонуниятлари ўрнатилди. Хона ҳароратида ҳам Pd_3Si ва Pd_2Si аралашмалари Pd-Si чегарасида ҳосил бўлиши кўрсатилди. Si даги Pd_2Si, Pd_3Si орқали Pd нинг интенсив диффузияси $T \approx 700$ К дан бошланади. $T \approx 1050$-1100 К да яхлит, бир хил Pd_2Si плёнкаси ҳосил бўлади. Ba-Si тизимида $BaSi_2$ типидаги плёнка $T \approx 1100$ К да Ba нинг Si га ва Si нинг Ba га ўзаро диффузияси туфайли вужудга келади. Pd_2Si плёнкаси гексогонал панжарага эга ва Pd ва Si атомларида асосан ковалент боғланиш ҳосил бўлганлиги кўрсатилди. $BaSi_2$ плёнкаси кубик панжарали ва Ba атоми ва Si ўртасидаги боғланиш ион-ковалентдир (боғланишнинг ионлик даражаси ~25-30%). Валент зонаси электрон ҳолатларининг зичлиги, энергетик зона параметрлари ва силицид плёнкаларининг плазмон тебранишлари энергиясининг қийматлари аниқланди.

4. Металл силицидлардаги квант ўлчамли эффектлар плёнкаларда ≤25-30 Å қалинликда, нанокристалларда эса сиртда ≈25-30 нм ўлчамдаги ≤35-30 Å қалинликда пайдо бўлиши аниқланди. Бунинг натижасида N_S/N_V нисбат 0.10-0.15 га тенг эканлиги кўрсатилган. $NaSi_2$, $BaSi_2$, $CoSi_2$ нанокристалин фазалари ўлчамларининг нурни ютиш коэффициенти қийматига, силициднинг тақиқланган зоналари кенглигига таъсири ўрганилди.

5. Si га фаол металл ионларини паст дозаларда ($D \leq 5 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$) қиздириш билан биргаликда имплантация қилиш вақтида сиртда, алоҳида нанокристалл фазалар ҳосил бўлиши, юқори дозаларда ($D > 10^{16}$ см$^{-2}$) $MeSi_2$

типидаги эпитаксиал наноплёнкалар ҳосил бўлиши кўрсатилди. Нанокристалл фазаларининг таъқиқланган зонаси кенглиги ўлчами ~25-30 нм ва 0,8-0,9 эВ, плёнкада эса ~0.5-0.6 эВ ни ташкил этади.

6. $MeSi_2$ нинг тўлиқ кристалланиш ҳарорати билан энергия ва нурланиш дозаси ўртасида боғлиқлик ўрнатилди. E_0=1 кэВ билан Si га Co^+ ионларини имплантация қилишда $D=5\cdot10^{14}$ $см^{-2}$ дозада $T_к$ нинг қиймати ~850–900 К, $D=5\cdot10^{15}$ $см^{-2}$ дозада эса 1200 К ни ташкил қилади.

7. Энергия зоналарининг оптик хусусиятлари ва параметрларининг силицид нанофазалари ва плёнкалари ҳажмига боғлиқлиги аниқланди. Хусусан, hν=0.8 эВ да ~20 нм катталикдаги нанокристаллар иштирокида Si ёруғликнинг ютилиш интенсивлиги 30 % га, 30 нм да 65 % га, $CoSi_2$ яхлит плёнкаси эса 95-98 % гача камайиши кўрсатилди.

8. Si ни ион бомбардимон қилинганида киришма атомларнинг чуқурлик бўйича профилли тақсимланиши кескин ўзгариши аниқланди. Бундан ташқари, Si нинг кучли легирланган соҳасида киришма атомларнинг (масалан, O) концентрацияси кескин камайди ва $MeSi_2$-Si чегарасида эса ошди.

НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

БОЛТАЕВ ХУРШИД ХАМИДОВИЧ

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУР, СОЗДАННЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ Si МЕТОДАМИ ВЫСОКО ВАКУУМНОГО НАПЫЛЕНИЯ И ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

01.04.04 – Физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам

город Ташкент – 2021 год

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2018.2.PhD/FM243.

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете им.И.Каримова.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещён на веб-странице по адресу www.iplt.uz и на Информационно-образовательном портале «Ziyonet» по адресу www.ziyonet.uz.

Научный руководитель:	**Ташмухамедова Дилноза Артикбаевна,** доктор физико-математических наук, профессор
Официальные оппоненты:	**Исаханов Зинабиддин Абилпейзович** доктор физико-математических наук
	Рахманов Ганибой Тоджиевич кандидат физико-математических наук, доцент
Ведущая организация:	**Ургенчский государственный университет**

Защита диссертации состоится « 28 » 05 2021 г. в 16^{00} часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 по присуждению ученых степеней при Институте ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз (адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 33. Тел./Факс: (99871) 262–32–54, e-mail: info@iplt.uz.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ионно-плазменных и лазерных технологий (зарегистрирована за № 6). Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 33. Тел.: (99871) 262–31–69).

Автореферат диссертации разослан « 12 » 05 2021 года.

(Реестр протокола рассылки 6 от « 12 » 05 2021 года).

Х.Б.Ашуров
Председатель Научного совета по присуждению учёных степеней, д.т.н., профессор

И.Д.Ядгаров
Учёный секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней, д.ф-м.н., с.н.с.

Б.Е.Умирзаков,
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. В настоящее время интенсивно изучаются свойства наноразмерных структур на поверхности полупроводниковых и диэлектрических пленок. В наноразмерном диапазоне уменьшение размеров нанокристаллов может привести к заметному изменению их электронной и кристаллической структуры. В частности, ширина запрещенной зоны кремниевых квантовых точек вдвое превышает ширину запрещенной зоны кристаллического кремния. Определение взаимосвязи между изменениями этих параметров имеет научный и практический интерес. Одним из перспективных методов создания нанокристаллов и нанопленок является низкоэнергетическая ионная имплантация. В этом аспекте получение наноразмерных структур на основе кремния различными методами и изучение их состава, электронной и кристаллической структуры, электрических и оптических свойств является актуальной проблемой современной физической электроники.

В последнее время в Республике Узбекистан активно проводятся научно-исследовательские работы по актуальным проблемам физической электроники и физики поверхности, связанные с получением наноразмерных структур необходимых для разработки приборов микро- и наноэлектроники. Проведены всесторонние исследования изменения свойств поли- и монокристаллов Si при имплантации ионов активных металлов. Исследованы также закономерности и физические механизмы формирования наноразмерных слоев силицидов при термодиффузии Ba и Pd в Si.

Данная диссертационная работа в определенной степени соответствует задачам, предусмотренным Указом Президента Республики Узбекистан №УП-4947 «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 года[1].

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Постанавлении Ресбулики Узбекистан №ПП-1442 «О приоритетах развития промышленности Республики Узбекистан в 2011 - 2015 годах» от 15 декабря 2015 года, №УП-4947 «О мерах по дальнейшей реализации Стратегии действий по пяти приоритетным направлениям развития Республики Узбекистан в 2017-2021 годах» от 7 февраля 2017 года, №ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года и №ПП-4422 «Об ускоренных мерах по повышению энергоэффективности отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии» от 22 августа 2019 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в Республике за последние годы данной сферы.

[1] Указ Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 года № ПФ-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан».

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики. Диссертационная работа выполнено в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан– III. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение, транспорт, машино- и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. Над проблемой создания наноструктур с заданными физическими свойствами занимаются ведущие ученые мира. Ученые из США W.Theis и R.M.Tromp исследовали топографию поверхности Si(001) во время гомоэпитаксиального роста при 650 °C и определили профиль плотности зародышеобразования на вершине «базового» островка. Российские ученые Ситников С.В. и др., исследовали процессы зарождения двумерных островков на ультраплоской поверхности Si(111), А.М.Мизеров и др., экспериментально установили оптимальные начальные условия эпитаксии GaN на подложках Si(111).

Японские ученые K.Nakagawa, M.Miyao и Y.Shiraki исследовали зависимость ориентации подложки от поверхностной сегрегации атомов сурьмы и галлия при кремниевой молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Во время роста атомы легирующей примеси лишь частично включаются в растущий слой, а остатки разделяются на поверхностях, выращенных с использованием МЛЭ. Энергии активации для сурьмы и галлия составляют 0,75 эВ и 0,45 эВ соответственно. Коэффициенты включения на Si(111) примерно в десять раз больше, чем Si(100) для обоих атомов легирующей примеси, хотя они имеют одинаковую энергию активации. Эти результаты хорошо объясняются моделью, основанной на поверхностной миграции.

В последнее 10-15 лет, интенсивные исследования направленные к получению и изучению электронных свойств наноразмерных структур на основе материалов различной природы проводились в Ташкентском государственном техническом университете под руководством д.ф-м.н, профессора Б.Е.Умирзакова. В результате этих исследовании созданы наноразмерные кристаллы, фазы и пленки на поверхности и приповерхностной области Mo, Si, GaAs, CaF_2 и SiO_2 с использованием методов ионной имплантации, сверхвысоковакуумного осаждения и термодифузии.

Однако до настоящего времени не разработан эффективный способ получения многокомпонентных наноразмерных структур на основе Si, мало изученной является зависимость электронной структуры поверхности Si от её типа проводимости и кристаллографической ориентации, практически не изучены закономерности формирования силицидов палладия и бария при термодиффузии Pd и Ba в Si, не достаточно изучены критические размеры силицидных наноструктур при которых проявляется квантово-размерные эффекты. Эти актуальные проблемы современной физической электроники и электронного приборостроения определили цели и задачи данной диссертационной работы.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного или научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертационная работа. Работа выполнена в Ташкентском государственном техническом университете в рамках Государственной программы научно-исследовательских работ Республики Узбекистан и проектов № ЁФ2-02 «Определение состава и места локализации примесных атомов на поверхности монокристаллических материалов различной природы» (2012-2013); № ЁФ-2-6 «Изучение физических свойств и состава материалов применяемых для приготовления солнечных элементов, в частности сверхчувствительных фотоэлементов методом электронной спектроскопии» (2014-2015); № ОТ-Ф2-53 «Квантово-размерные эффекты и электронные свойства двухслойных наноразмерных структур, созданных на поверхности и в приповерхностной области пленок A^3B^5 и A^2B^6» (2017–2020).

Целью диссертационной работы является получение наноразмерных фаз и пленок на поверхности кремния методами высоковакуумного напыления, термодифузии и ионной имплантации, изучение их электронных и оптических свойств.

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

изучить влияние типа проводимости и кристаллографической ориентации на плотности состояния электронов валентной зоны кремния;

изучить закономерности формирования силицидов Pd и Ba при термодиффузии Pd и Ba в Si;

изучить морфологию, состава, кристаллическую структуру и электронные свойства силицидов металлов созданных ионной имплантацией в сочетание с отжигом;

изучить проявления квантово размерных эффектов в силицидных наноструктурах;

изучить влияние напыления атомов и ионной бомбардировки на профили распределения примесных атомов O и K по глубине Si, применяемых в солнечных элементах и диодных структурах.

Объектами исследования являлись монокристаллические образы Si и пленки Si и Al.

Предметом исследования являлись закономерности и физические механизмы формирование нанокристаллов и нанопленок на поверхности кремния при ионной имплантации и высоковакуумной термодифузии.

Методы исследования Оже–электронная спектроскопия (ОЭС), дифракция быстрых электронов (ДБЭ), растровая электронная микроскопия (РЭМ), ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия (УФЭС), спектроскопия упруго-отраженных электронов (СУОЭ), спектроскопия характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ).

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

показано, что положения и форма максимумов плотности состояния валентных электронов n- и p-тип кремния существенно отличаются друг от друга. Плотность состояния валентных электронов также зависит от кристаллографической ориентации монокристаллов. Показано, что при этом положения некоторых максимумов для разных граней примерно совпадают друг с другом;

показано, что при адсорбции Pd на поверхность Si на границе формируется сверхтонкая пленка низшего силицида. Термодиффузия Pd в Si происходит через эту силицидную пленку и при T=1050-1100 K формируется однородная монокристаллическая пленка Pd_2Si с гексагональной решеткой. В случае системы Ba-Si образование силицида Ba происходит вследствие взаимодиффузии Si в Ba и Ba в Si и установлено, что при T=1100 K формируется пленка $BaSi_2$ с кубической решеткой;

впервые изучены морфология поверхности, состав, а также кристаллическая и электронная структура нанокристаллов и нанопленок $MeSi_2$, созданных на поверхности монокристаллов Si. Определена связь между температурной полной кристаллизации $MeSi_2$ от энергии и дозы ионов;

предложен способ получения наноструктур силицида металла, определены толщины нанопленок и размеры нанокристаллических фаз, при которых проявляется квантово-размерные эффекты;

впервые изучены профиль примесных атомов кислорода по глубине системы $MeSi_2$- Si, созданных термодиффузией и ионной имплантацией.

Практическое применение результатов исследования разработан способ получения наноструктур силицида металла, включающий облучение поверхности кремния ионами металла энергией от 0,5 до 5 кэВ и последующий отжиг при температуре до 1200 К. Определены оптимальные условия получения наноразмерных пленок силицида металла с использованием методов термодиффузии и ионной имплантации.

Достоверность результатов исследований подтверждается применением современных научных и экспериментальных методов, необходимой статистикой экспериментов, использованием комплекса независимых методик измерения и обработки данных, а также соответствием полученных результатов для чистых пленок Si и $CoSi_2$ с данными других авторов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость: результаты исследования позволяют определить зависимость плотности состояния валентных электронов чистого монокристалла Si от граней и типа проводимости.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что разработанные методики получения наноразмерных слоистых структур типа Pd_2Si, $BaSi_2$ весьма важны при разработке различных МОП, МДП, ПДП-структур, контактных и барьерных слоев для приборов твердотельной электроники, в том числе солнечной энергетики.

Внедрение результатов исследования. На основе результатов изучения закономерностей и физических механизмов формирования нанокристаллов и нанопленок на поверхности и монокристаллических пленок Si, имплантированных ионами низких энергий:

получен патент на изобретение от Агентства по Интеллектуальной собственности Республики Узбекистан “Способ получения наноструктур силицида металла” (№ IAP 04874 - 2014). В результате можно было определить толщину, кристаллическую структуру и постоянные решетки силицидных пленок полученных на поверхности кремния;

результаты, полученные при определении параметров зон наноразмерных пленок металлического кремния, были использованы в фундаментальном проекте Ф-2-31 «Исследование структуры и физических свойств наноразмерных пленок силицидов металлов и разработка термочувствительных структур» (Справка № 89-03-4333 Министерство высшего и среднего специального образования РУз от 02.11.2020). Использование научных результатов позволило измерения электронной структуры и параметров зон силицидных пленок.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования были представлены и обсуждены на 10 международных научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 18 научных трудов, из них 5 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы, включая 51 рисунков и 8 таблиц. Объем диссертации включает 123 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследований с основными приоритетными направлениями развитии науки и технологий в республике, приведены обзор научных исследований по теме диссертации, степень изученности проблемы, сформулированы цели и задачи, определены объекты, предметы и методы исследования, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе «**Состав, структура и физические свойства наноструктур на основе кремния»** анализируются оригинальные данные исследований, посвященные получению и изучению свойств перспективных

наноструктур созданных на основе Si методами напыления, термодиффузии и ионной имплантации.

Управление процессами формирования наноструктур с заданными свойствами является актуальной задачей для современных нанотехнологий, основанных на методе молекулярно-пучковой эпитаксии. Для описания диффузии атомов по поверхности в электрическом поле необходимо учитывать несколько факторов. Во-первых, присутствие локализованных электронных состояний (состояния Тамма), которые влияют на проводимость вдоль поверхности. Во-вторых, наличие сверхструктурной реконструкции, которая в значительной степени определяет процесс диффузии адсорбированных частиц. В-третьих, присутствие атомных ступеней, которые, являясь источником и стоком для адсорбированных атомов, не только изменяют концентрацию адсорбированных атомов, но и сами перемещаются в процессе высокотемпературных отжигов или эпитаксиального роста.

Анализ результатов работ, приведенных в кратком обзоре исследований показывает, что в настоящее время хорошо изучены: состав и свойства островковых нанопленок, созданных на поверхности кремния; структура, электронные и оптические свойства многокомпонентных наноструктур на основе Si; состав, топография поверхности и структура наноразмерных фаз, сформированных в эпипленках кремния при ионной имплантации.

Однако до настоящего времени мало изученным является зависимость электронной структуры поверхности Si от её типа проводимости и кристаллографической ориентации, не изучены закономерности формирования силицидов палладия и бария при термодиффузии Pd и Ba в Si, не достаточно изучены критические размеры силицидных наноструктур при которых проявляется квантово-размерные эффекты.

Во второй главе **«Методика экспериментальных исследований»** была рассмотрена аппаратная часть методов напыления, термодиффузии и ионной имплантации и методов исследования состава, структуры, электронных и оптических свойств материалов. Исследования проводились с использованием методов: измерения энергетических зависимостей коэффициентов вторичной электронной эмиссии (ВЭЭ) и квантового выхода фотоэлектронов, оже-электронной спектроскопии (ОЭС), спектроскопии характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ), спектроскопии упруго-отраженных медленных электронов (СУОЭ), ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия (УФЭС), а также растровая электронная микроскопия (РЭМ) и дифракция быстрых электронов (ДБЭ).

В третьей главе **«Электронные и оптические свойства нанопленок, созданных на поверхности Si напылением атомов активных металлов в условиях высокого вакуума»** приводятся результаты всесторонних исследований изменения состава, морфологии, электронных и кристаллических структур, эмиссионных и оптических свойств монокристаллов Si при адсорбции атомов металлов в высоком вакууме и в

атмосфере кислорода. Исследованы также закономерности формирования наноразмерных слоев силицидов при термодиффузии Ba и Pd в Si. Спектры фотоэлектронов для хорошо очищенных образцов n- и p-типов Si(111) приведены на рис.1. По оси абцисс отложена энергия связи $E_{св}$ электронов (энергия отсчитывается от уровня Ферми чистого Pd). Из рис.1. видно, что эти кривые обладают явно выраженной структурой. Они приблизительно отражают распределение плотности состояний электронов валентной зоны. Дальнейшие исследования показали, что структуры кривых разных граней также существенно отличаются друг от друга, но в них имеется ряд особенностей, наблюдаемых при близких значениях энергии электронов. Поэтому можно предположить, что некоторые максимумы плотности энергетических состояний валентных электронов для разных граней примерно совпадают. Адсорбция атомов металлов и газов на поверхности всех исследованных нами образцов приводит к сильному изменению КЭР фотоэлектронов.

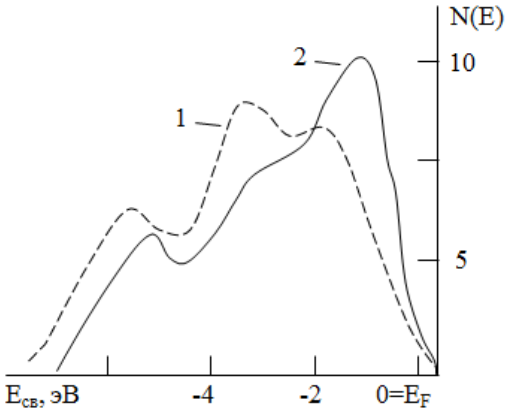


Рис. 1. Нормированое распределение электронов по энергиями для монокристаллов Si(111):
1 – n-тип; 2 – p-тип

На рис. 2 приведены ФЭС для Si(111), покрытого пленкой Ba разной толщины, полученные при энергии возбуждающих квантов hν = 10,2 эВ. Для наглядности кривые смещены по вертикали. При малых толщинах покрытий бария (θ=0,5–0,6), когда еще в основном эмиттируются электроны из кремния, на КЭР с ростом θ наблюдаются следующие изменения: более четко выделяются особенности, обусловленные поверхностными состояниями; начало спектра и пики, связанные с максимумами плотности состояний электронов в валентной зоне, смещаются в сторону меньших энергий; появляется новый пик в области $E_{св}$=-6 эВ характерный для Si (эмиссия электронов из s - состояний), увеличивается ширина КЭР, возрастает квантовый выход фотоэлектронов. Изменение положения низко-энергетического конца КЭР, очевидно, соответствует уменьшению φ, а величина смещения пика А равна изменению изгиба зон. Адсорбция Ba на

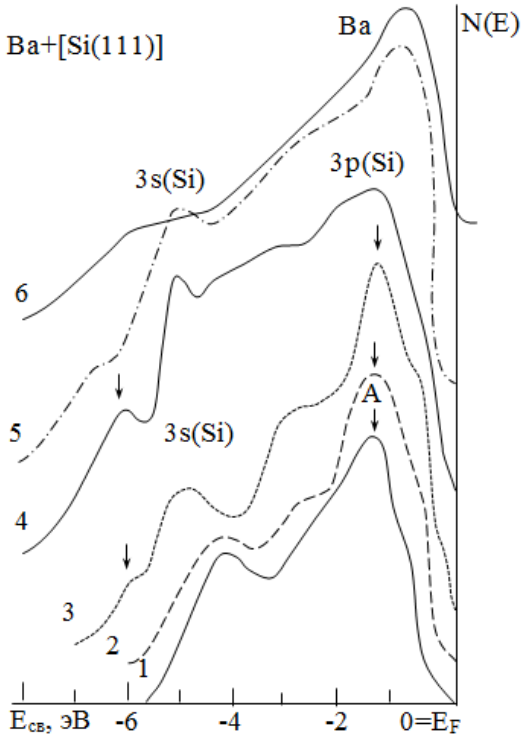


Рис. 2. ФЭС кремния с пленкой бария толщиной θ, монослоя:
1 – 0; 2 – 0,2; 3 – 0,4; 4 – 0,7; 5 – 1; 6 – 2. hν = 10,2 эВ

поверхности Si p - типа приводит к увеличению изгиба зон, что обусловлено повышением концентрации донорных уровней на поверхности. Рост Y же обусловлен, главным образом, уменьшением работы выхода и увеличением изгиба зон. При дальнейшем увеличении толщины слоя бария (рис. 2, кривые 4–6) интенсивность пиков, характерных для Si, монотонно уменьшается и начинает формироваться структура, отвечающая эмиссии из массивного бария.

На рис.3. приведены оже-электронные спектры чистого кремния и пленок $BaSi_2$ и Pd_2Si с толщинами ~400 Å. Видно, что спектры силицидных пленок существенно отличаются от спектров кремния. В частности, пик $L_{2,3}VV$ Si при образовании силицидов $BaSi_2$ и Pd_2Si изменяется не только по интенсивности, но и существенно изменяется по положению и форме. По этим изменениям мы оценили образования химических связей и типы образующихся соединений.

На рис.4. приведено изменение положений пика УОЭ L_{23} кремния при образовании $BaSi_2$ и Pd_2Si. Видно, что в случае $BaSi_2$ положение L_{23} пика кремния смещается на 3-4 эВ, а в случае Pd_2Si смещение пика составляет всего лишь 0,5÷1 эВ. Между Me и Si образуется связь имеющая ионно-ковалентный характер: в случае Ba-Si степень ионной связи больше, чем для Pd-Si. В обоих случях L_{23}-линии кремния смещаются в сторону меньших энергий. Это объясняется тем, что при образовании силицидов металлов электроны переходят от атомов металла к атомам Si, что приводит к уменьшению энергии связи электронов кремния.

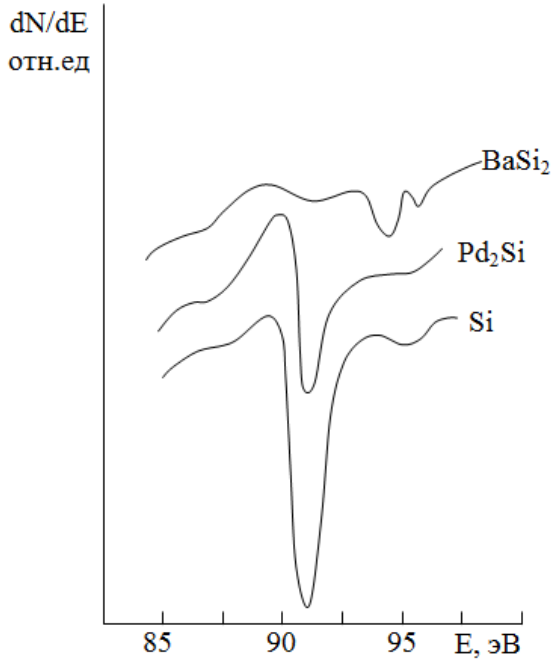


Рис.3. Оже-спектры Si, плёнки $BaSi_2$ и плёнки силицида Pd_2Si

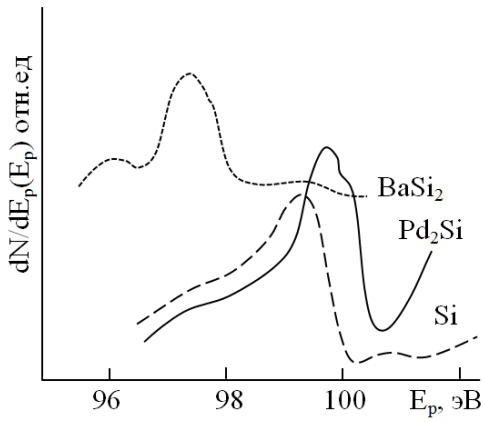


Рис. 4. Спектры УОЭ L_{23}–линии кремния в силицидах металлов

Расчёты выполненные по формуле Полинга показали, что в случае $BaSi_2$ степень ионности связи составляет 25-30 %, а в случае Pd_2Ba - ~10 %.

В работе также исследованы состав неконтролируемых примесей, их химические состояния и профиль распределения на границе системы Al-Si.

На рис.5 приведены профили распределения атомов Al, Si и O на границе контакта Al–Si. Видно, что вследствие взаимодиффузии атомов основных элементов (Al и Si) на границе формируется переходной слой толщиной ~150−200 nm. Что касается распределения атомов O, то его концентрация на границе раздела имеет максимум и достигает 10−12 ат.%.

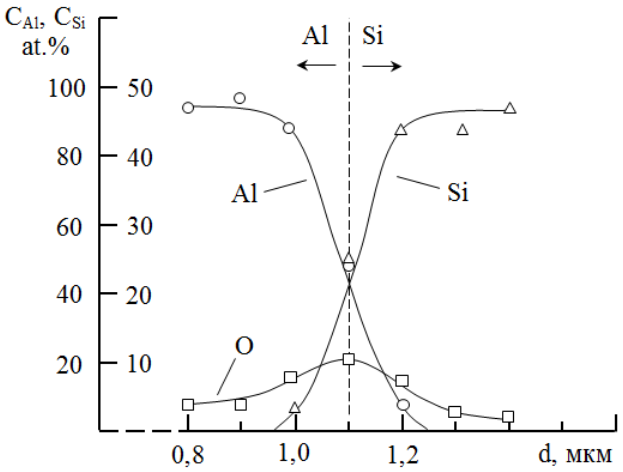


Рис. 5. Зависимости интенсивности оже-пиков Al (1396 eV) и Si (1619 eV) для системы Al-Si. Толщина алюминия ~1 μm.

Изучения с использованием ВИМС и ОЭС показали, что профиль распределения примесных элементов в приконтактной области Al–Si и их концентрация вблизи границы контакта металл–полупроводник резко возрастает.

В четвертой главе изучены **«Состав, структура и физические свойства наноструктур силицидов металлов, полученных методом имплантации ионов низких энергии (E_0=0,5-5 кэВ)».** Результаты экспериментов показали, что формирование совершенных нанокристаллических фаз зависит от степени гладкости и чистоты поверхности матрицы. В первом случае поверхность Si очищалась прогревом до T=1100 °C. На рис.6 а и б приведены РЭМ изображения пленки Si(111) имплантированного ионами Co^+ с E_0=1 кэВ при D=10^{15} $см^{-2}$.

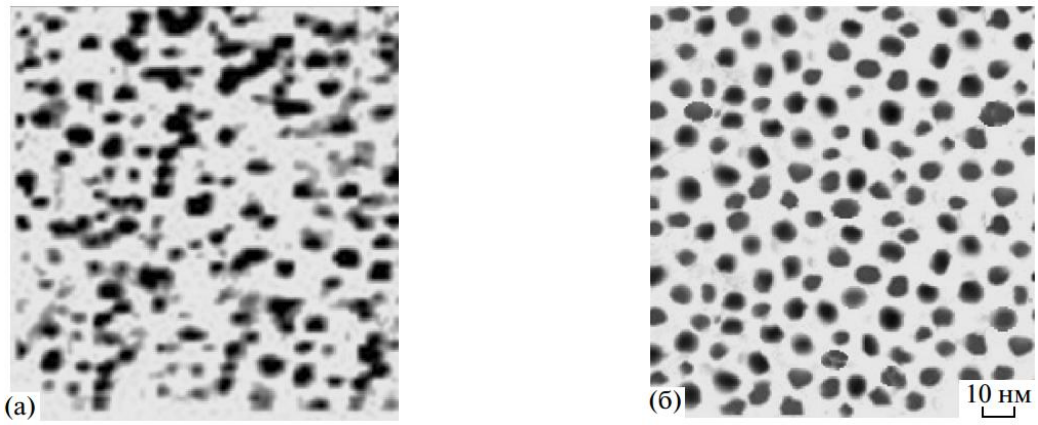


Рис. 6. РЭМ изображения пленки Si(111), имплантированной ионами Co с энергией E_0= 1 кэВ при дозе облучения D = 10^{15} $см^{-2}$: а – поверхность Si, очищенная только высокотемпературным прогревом; б – поверхность Si, очищенная прогревом в сочетании с ионным травлением

А во втором случае чистая поверхность Si получена травлением подложки ионами аргона с энергией до 600 эВ с последующим длительным

отжигом при Т= 700–800°С и кратковременным прогревом до Т=1200°С. В процессе имплантации пучок диаметром d=1 мм падал на поверхность, а РЭМ изображение получали от центра ионно имплантированного участка размером d~10 мкм. Из рис.6 видно, что упорядоченные нанокристаллы силицида формируются только на хорошо очищенной поверхности кремния. Диаметр этих нанокристаллов составляет 10–20 нм.

Известно, что энергетические зависимости коэффициентов σ и R в области малых энергии (E_p=1-30 эВ) дают богатую информацию о электронной структуре (об энергиях плазменных колебании и одночастичных возбуждений) поверхности материалов различной природы и очень чувствительны к изменению состава и структуры поверхности.

Изменение тонкой структуры кривых σ(E_p), R(E_p) и рост величины этих коэффициентов отчетливо проявляются при легировании монокристаллов Si ионами кислорода и бария (рис.7).

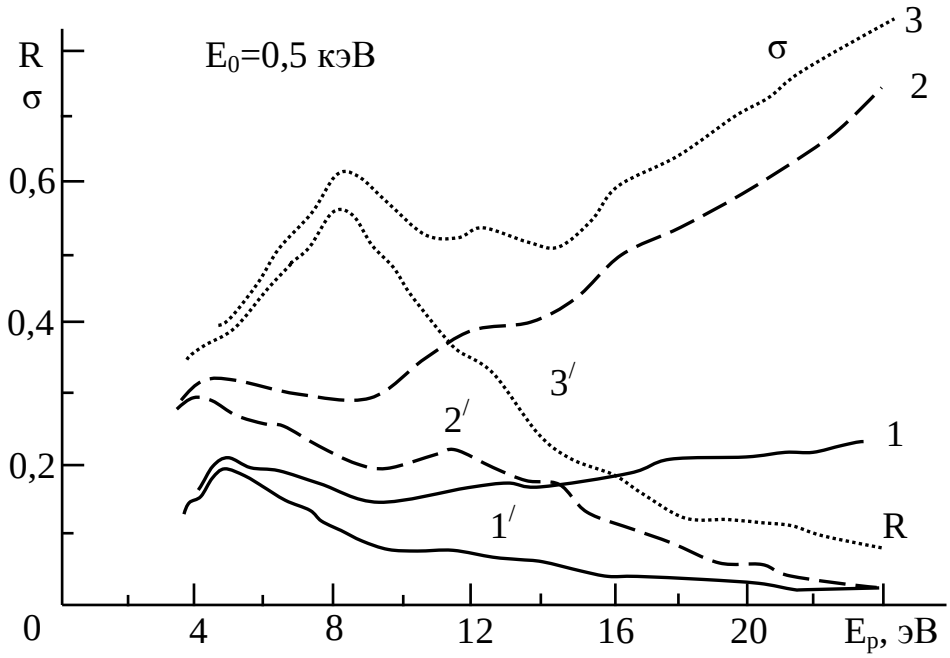


Рис.7. Зависимости σ, R от E_p для чистого кремния (1, 1′) и Si, легированного ионами Ba^+ (2, 2′) и O_2^+(3, 3′)

Характер этих зависимостей принципиально отличается друг от друга. Например, положение основного максимума кривой R(E_p) при имплантации ионов бария смещается в сторону меньших энергий, а при имплантации ионов O_2^+ – в сторону больших E_p. В случае O_2^+ значение R_m достигает ~0,6. Что касается работы выхода, то ее значение после легирования ионами O_2^+ немного увеличивается ($\Delta e\varphi \approx 0{,}5–1$ эВ), а при легировании барием уменьшается до 2 эВ. Таким образом, имплантация ионов с большой дозой приводит к существенному изменению плотности состояния валентных электронов и параметров зон Si вследствии, чего существенно изменяются процессы упругого и неупругого взаимодействия первичных электронов с твердым телом и условия выхода вторичных электронов в вакуум.

На рис.8 приведены спектры фотоэлектронов для Si(111), имплантированного ионами Ba^+ с E_0=0,5 кэВ при $D=D_H=6\cdot10^{16}$ $см^{-2}$, полученных до и после прогрева. Из кривой 1 видно, что на спектре ионно-имплантированного Si содержатся особенности характерные как для соединении Ba+Si, так и для свободных (избыточных) атомов Ba и Si. После прогрева при T=1100 K концентрация свободных атомов Ba и Si уменьшается до нуля и формируется сплошная монокристаллическая нанопленка $BaSi_2$ с толщиной ~25-30 Å. После прогрева при T=1400 K происходит полное испарение пленки $BaSi_2$ и структура спектра чистого Si(111) полностью восстанавливается.

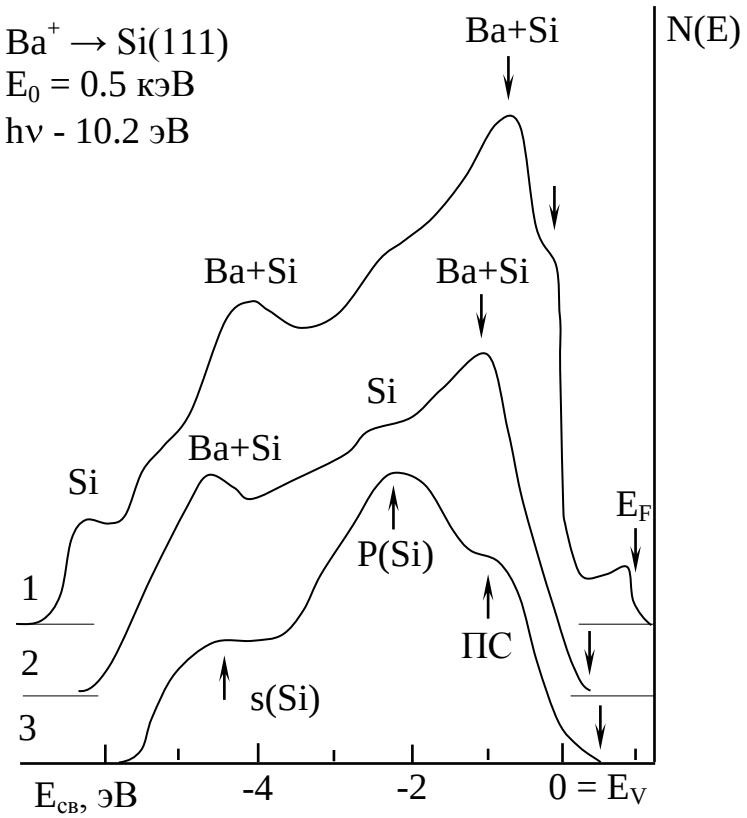


Рис. 8. Фотоэлектронные спектры кремния имплантированного ионами Ba^+ с E=0.5 кэВ при $D=6\cdot10^{16}$ $см^{-2}$, полученные после прогрева при Т, К: 1-300 (без прогрева), 2-1100, 3-1400

Изменяя дозы ионов в пределах $10^{14}\div5\cdot10^{15}$ $см^{-2}$ и проводя пост имплантационный отжиг получены отдельные нанокристаллически фазы силицидов металлов. Из таблицы 1 видно, что с случае НК фаз с d ≈ 15-20 нм и h = 3-4 нм значение E_g силицидов в 1,5 больше, чем E_g нанопленок данного силицида. По-видимому при малых размерах НК проявляются квантово-размерные эффекты.

Таблица 1.

Зависимость параметров энергетических зон от размеров силицидных нанофаз и нанопленок, созданных на поверхности кремния методом ионной имплантации в сочетании с отжигом

Силицид	d, нм	b, нм	h, нм	E_g, эВ	E_V, эВ	$\varkappa$, эВ
$CoSi_2$	15-20	50-60	3-4	0,92	5,4	4,5
	25-30	50-60	3-4	0,8	4,8	4
			3	0,6	-	-
	Сплошная пленка		100	0,5	4,5	4
$NaSi_2$	15-20		3,5-4	0,7		3,5
	30-40					
	Сплошная пленка		4-5	0,7	4,2	3,5
$BaSi_2$	20-25		4-4,5	0,7	4,1	3,4
	30-40					
	Сплошная пленка		3-4	0,6	4	3,4

На рис.9 приведен профиль распределения основных (Si, Ba) и примесных (O) атомов по глубине после контакта с воздухом образца кремния, легированного ионами Ba^+ с энергией 0.5 кэВ. Из рисунка видно, что график распределения атомов кислорода представляет собой монотонно убывающую кривую: концентрация на поверхности составляет 25–28 ат. %, а на глубине 30–35 Å – всего лишь ~1–2 ат. %. Это, по-видимому, можно объяснить следующим образом. Независимо от энергии имплантации при выдержке ионно-легированных образцов на воздухе на их поверхности адсорбируются не менее 3–5 монослоев атомов примесей. Некоторая часть этих атомов вследствие диффузии может проникать в глубь образца. При низкой энергии имплантации легирующие ионы локализуются, в основном, в приповерхностных слоях, увеличивая тем самым их плотность, что может резко уменьшить интенсивность диффузии атомов примеси в глубь образца. Кратковременный отжиг этой системы при T ~ 1000 K приводит к резкому

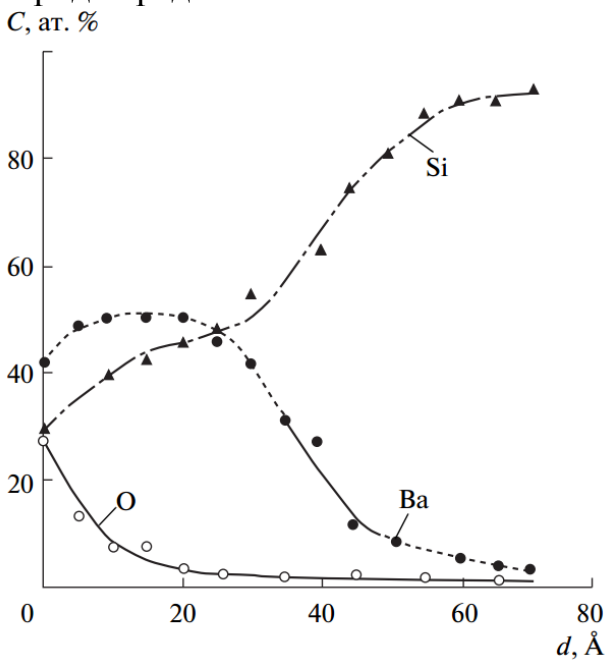


Рис. 9. Распределение основных (Si, Ba) и примесных (O) атомов по глубине образца кремния, легированного ионами Ba^+ с энергией E_0 = 0.5 кэВ

уменьшению (до 1–2 ат. %) концентрации атомов O в поверхностной области толщиной до 10-15 Å.

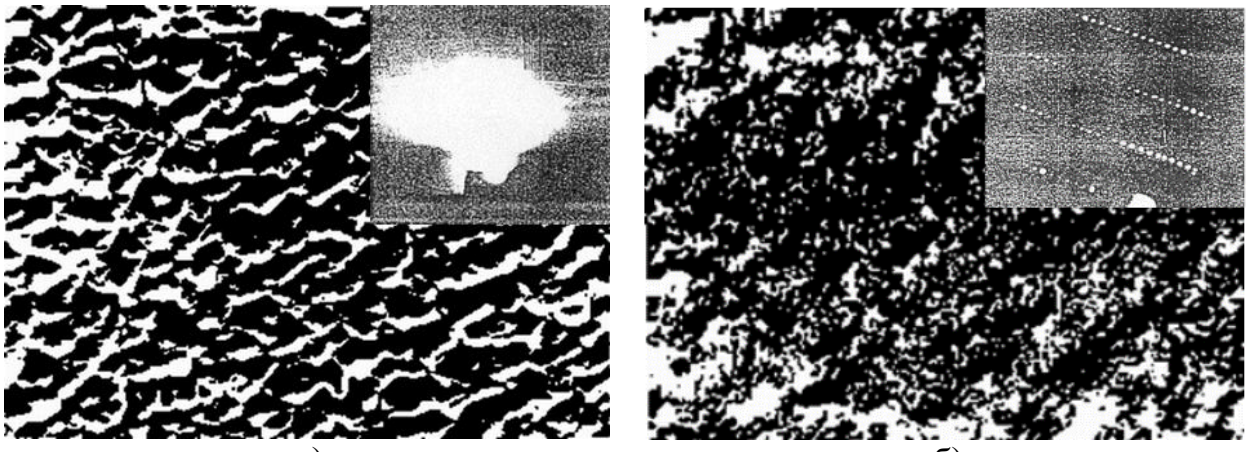
В таблице 2 приведены значения коэффициента отражения света *r* для чистой пленки Si и для Si, имплантированного ионами O^+ с E_0=1 кэВ при дозе насыщения ($D=6\cdot10^{16}$ см$^{-2}$) до и после отжига при T=900 K. Из таблицы видно, что после ионной имплантации резко уменьшается коэффициент отражения света, хотя толщина ионно-легированного слоя составляет всего лишь 50-100 Å.

Таблица 2.

Значения коэффициента отражения света R для поверхности Si и SiO_2

Пленка	Толщина пленки, нм	R, %		
		λ= 400 нм	λ= 600 нм	λ= 800 нм
S(111)	3000	55	38	35
$O_2^+ \rightarrow$Si(111) E_0=1 кэВ, $D=6\cdot10^{16}$ см$^{-2}$	5-10	22	15	15
SiO_2/Si(111)	5	40	25	28

Микрофотография поверхности Si(111) с поверхностной пленкой палладия толщиной θ≈200 Å. Видно, что пленка растет неравномерно в виде трехмерных слегка ограненных островков (рис.10). Высота неравномерности составляет ~50-100 Å, что определялось нами методом рентгеновской электронной микроскопии. При этом на дифракционной картине наблюдается большое белое пятно, характерное для аморфных материалов (вставка рис.10, а). После прогрева при T=1200 K (рис.10, б) происходит существенное улучшение морфологии поверхности и формирование монокристаллической пленки Pd_2Si.



а) б)

Рис. 10. Микрофотография поверхности системы Pd-Si(111) с θ=200 Å. до (а) и после (б) прогрева при T=1200 K

Из таблицы 3 видно, что образование силицидов металлов во всех случаях сопровождается резким сужением ширины запрещенной зоны и

некоторым уменьшением величины сродства к электрону, а также изменением типа и параметров решетки. Все эти пленки являются относительно кремния гетероструктурными. При этом ширина запрещенной зоны этих силицидов существенно не отличается друг от друга. Однако, уровень Ферми в случае $BaSi_2$ локализован вблизи валентной зоны, в случае Pd_2Si – вблизи дна зоны проводимости.

Таблица 3.

Параметры энергетических зон и кристаллической решетки для силицидов

Объект исследования	Параметры зон, эВ				Тип решетки	Параметры решетки, Å
	E_V	E_F	E_g	χ		
Si (111), n-тип	5.1	4.2	1.1	4.0	кубическая	a=5,41
$BaSi_2$	4.0	3.9	0.7	3.3	кубическая	a=6,20
Pd_2Si	4.1	3.9	0.3	3.8	гексогональ	a=6,50 c=3,45

На основе анализа тонкой структуры кривых фото- и упругоотраженных электронов можно построить качественную энергетическую диаграмму поверхности исследуемых материалов. В зоне проводимости два пика. Такая диаграмма для силицида Pd получена впервые

В таблице 4 приведены параметры энергетических зон для нанопленок и нанокристаллов $CoSi_2$/Si(111) полученных на основе анализа спектров УФЭС.

Из таблицы 4 видно, что при уменьшении толщины пленок от 100 до 30 нм ширина запрещенной зоны увеличивается на ~0,1 эВ. Более существенные зависимости физических свойств от размера наноматериалов наблюдались в случае нанокристаллов. В частности при переходе от нанопленок к нанокристаллам ширина запрещенной зоны увеличивается на 0,3 – 0,4 эВ.

Таблица 4.

Параметры энергетических зон для нанокристаллов и нанопленок $CoSi_2$/Si

Пленка	Ф, эВ	E_g, эВ	χ, эВ
НК $CoSi_2$ (d = 25 нм, h = 3 – 4 нм)	5,4	0,9	4,5
$CoSi_2$ (h = 1000 Å)	4,5	0,5	4,0
$CoSi_2$ (h = 30 Å)	3,6	0,6	3,0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе экспериментальных исследований электронных и оптических свойств наноструктур, созданных на поверхности Si методами высоковакуумного напыления и ионной имплантации сделаны следующие выводы:

1. Установлено, что плотность состояния валентных электронов чистых монокристаллов Si зависит от их кристаллографической ориентации и типа проводимости. При этом показано, что положения некоторых максимумов плотности электронных состояний для разных граней примерно совпадают, однако их форма и интенсивности резко отличаются.

2. Определено влияние адсорбции атомов бария и кислорода на значения изгиба зон и эмиссионные свойства Si. В частности, что при напылении Ba на поверхности Si p–типа происходит увеличение изгиба зон, что обусловлено повышением концентрации донорных уровней на поверхность. По этому рост σ_m и γ при напыление бария с $\theta \leq 1$ объясняется, в основном, уменьшением $e\varphi$ и увеличением изгиба зон. При адсорбции O_2 на поверхности Si с $\theta \leq 1$ наблюдается выпрямление изгиба зон. Можно полагать, что кислород является акцептором электронов. При $\theta = 1$ кислород полностью выпрямляет изгиб зон и удаляет поверхностные электронные состояния из запрещенной и валентной зоны.

3. Установлены основные закономерности формирования пленок Pd_2Si и $BaSi_2$ при термодиффузии Pd и Ba в Si. Показано, при уже при комнатной температуре на границе Pd-Si формируется соединение типа Pd_3Si и Pd_2Si. Интенсивная диффузия Pd в Si через пленки Pd_2Si, Pd_3Si начинается с $T \approx 700$ К. Сплошная, однородная пленка Pd_2Si формируется при $T \approx 1050$-1100 К. В случае системы Ba-Si пленка типа $BaSi_2$ формируется при $T \approx 1100$ К за счёт взаимодиффузии Ba в Si и Si в Ba. Показано, что пленка Pd_2Si имеет гексагональную решетку и между атомами Pd и Si образуется преимущественно ковалентная связь. Пленка $BaSi_2$ имеет кубическую решетку и связь между атомами Ba и Si имеет ионно-ковалентный характер (степень ионности связи ~25-30 %). Определены плотности электронных состоянии валентной зоны, параметры энергетических зон и значения энергии плазменных колебаний силицидных пленок.

4. Установлено, что квантово-размерные эффекты в силицидах металлов в случае пленок проявляется при толщинах $\leq$ 25-30 Å, а в случае нанокристаллов с поверхностными размерами $d \approx 25$-30 нм при толщине $\leq$ 35-40 Å. Показано, что при этом соотношении N_s/N_v составляет 0.10–0.15. Изучены влияния размеров нанокристаллических фаз $NaSi_2$, $BaSi_2$, $CoSi_2$ на значение коэффициента поглощения света, ширину запрещенной зоны силицида.

5. Показано, что при имплантации ионов активных металлов в Si в сочетании с отжигом при невысоких дозах ($D \leq 5 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$) на поверхности формируется отдельные нанокристаллические фазы, при высоких дозах ($D >$

10^{16} $см^{-2}$) эпитаксиальные нанопленки типа $MeSi_2$. Ширина запрешенной зоны нанокристаллических фаз с поверхностными размерами ~25-30 нм составляет 0,8-0,9 эВ, а пленок ~0,5-0,6 эВ.

6. Установлена связь между температурой полной кристаллизации $MeSi_2$ от энергий и дозы облучения. В случае имплантация ионов Co^+ в Si с E_0=1 кэВ при $D=5\cdot10^{14}$ $см^{-2}$ значение $T_к$ составляет ~850-900 К, а при $D=5\cdot10^{15}$ $см^{-2}$ – 1200 К.

7. Определена зависимость оптических свойств и параметров энергетических зон от размеров силицидных нанофаз и пленок. В частности показано, что при hν=0,8 эВ интенсивность поглощенного света Si при наличии нанокристаллов с размером ~20 нм уменьшается на 30 %, с – 30 нм = 65 %, а в случае сплошной пленки $CoSi_2$ – до 95-98 %.

8. Установлено, что при ионной бомбардировке Si профиль распределения по глубине примесных атомов резко изменяется. При этом в сильнолегированной области Si концентрация примесных атомов (например, O) резко уменьшается, а вблизи границы $MeSi_2$–Si увеличивается.

SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING OF SCIENTIFIC DEGREES DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES

TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY

BOLTAEV KHURSHID KHAMIDOVICH

ELECTRONIC AND OPTICAL PROPERTIES OF NANOSTRUCTURES CREATED ON THE Si SURFACE BY HIGH VACUUM DEPOSITION AND ION IMPLANTATION

01.04.04 – Physical electronics

ABSTRACT
of dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences

Tashkent city – 2021 year

The theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of Republic of Uzbekistan under number B2018.2.PhD/FM243.

Dissertation has been prepared at the Tashkent State Technical University named after I.Karimov.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (uzbek, russian, english (resume)) on the scientific council website (www.iplt.uz) and on the website of "Ziyonet" Information and educational portal www.ziyonet.uz.

Research supervisors:	**Tashmukhamedova Dilnoza Artikbaevna** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
Official opponents:	**Isakhanov Z.A.** Doctor of Physical and mathematical sciences, senior researcher
	Rakhmonov Ganibay Tadzhievich Candidate of Physical and Mathematical Sciences, docent
Leading organization:	**Urgench State University**

Defense will take place on « 12 » 05 2021 at 16^{00} at the meeting of scientific council number DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 at Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent city, str. Durmon yuli 33. Phone/fax: (+99871) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz).

The PhD dissertation is can be looked through in the Information-Resource centre of the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (is registered № 6) (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent city, str. Durmon yuli 33. Phone/fax: (+99871) 262-31-69).

Abstract of dissertation sent out on « 12 » 05 2021 year.

(Mailing report № 6 on « 12 » 05 2021 year)

Kh.B.Ashurov
Chairman of scientific council on award of scientific degrees, doctor of technical science, professor

I.D.Yadgarov
Scientific secretary of scientific council on award of scientific degrees, doctor physical and mathematical science, senior researcher

B.E.Umirzakov
Chairman of scientific seminar under scientific council on award of scientific degrees doctor of physical and mathematical science, professor

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The aim of the dissertation is to obtain nanoscale phases and films on the silicon surface by high-vacuum deposition, thermal diffusion and ion implantation, to study their electrical and optical properties.

The objects of study were single-crystal Si sample and Si and Al films.

The scientific novelty of the research consists in the following:

1. It is shown that the positions and shapes of the maxima of the density of state of valence electrons of n- and p-type silicon differ significantly from each other. The density of state of valence electrons also depends on the crystallographic orientation of the single crystals. However, in this case, the positions of some maxima for different faces approximately coincide with each other.

2. It is shown that, upon adsorption of Pd on the Si surface, an ultrathin lower silicide film is formed at the interface. Thermal diffusion of Pd in Si occurs through this silicide film and at T = 1050-1100 K a homogeneous single-crystal Pd_2Si film with a hexagonal lattice is formed. In the case of the Ba-Si system, the formation of the Ba silicide occurs due to the interdiffusion of Si in Ba and Ba in Si. At T = 1100 K, a $BaSi_2$ film with a cubic lattice is formed.

3. The surface morphology, composition, crystal and electronic structure of nanocrystals and $MeSi_2$ nanofilms formed on the surface of Si single crystals have been studied. The relationship between the temperature of complete crystallization of $MeSi_2$ on the energy and dose of ions has been determined.

4. A method for obtaining nanostructures of metal silicide is proposed, the thicknesses of nanofilms and the sizes of nanocrystalline phases at which quantum-size effects are manifested are determined.

5. The profile of impurity oxygen atoms over the depth of the $MeSi_2$-Si system, created by thermal diffusion and ion implantation, has been studied for the first time.

The implementation of research results. Based on the results of studying the regularities and physical mechanisms of the formation of nanocrystals and nanofilms on the surface and single-crystal Si films implanted with low-energy ions:

a patent for an invention was received from the Agency for Intellectual Property of the Republic of Uzbekistan “Method of obtaining nanostructures of metal silicide” (No. IAP 04874 30.04.2014);

The results obtained in determining the parameters of the zones of nanoscale films of metallic silicon were used in the fundamental project F-2-31" Investigation of the structure and physical properties of nanosized films of metal silicides and the development of temperature-sensitive structures (Reference No. 89-03-433 Ministry of Higher and Secondary Specialized Education of the Republic of Uzbekistan dated 11.02.2020);

The structure and scope of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, list of references. The volume of the thesis includes 123 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (част I; part I)

1. A.A.Abduvayitov, D.A.Tashmuxamedova, X.X.Boltayev. Qattiq jismlarni yuza qatlamlarining kimyoviy tarkibini va kirishmali atomlarni kristall panjarada joylashuv o‘rnini elektron spektroskopiya usullarida aniqlash. Monografiya. 150 bet. Toshkent: Infinity Group, 2013.

2. Б.Е.Умирзаков, Д.А.Ташмухамедова, М.А.Миржалилова, Д.М.Муродкобилов, Х.Х.Болтаев. Способ получения наноструктур силицида металла. Патент на изобретение Республики Узбекистан № IAP 04874, 30.04.2014.

3. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Болтаев Х.Х., Исроилов Ш.Ю. Оценка критических размеров нанопленок и нанокристаллов по формированию электронно-зонной структуры характерной для твердых тел. Вестник СамДУ. Самарканд (Узбекистан). 2011. №11. с.52-54. (01.00.00, №2)

4. Б.Е.Умирзаков, Д.А.Ташмухамедова, Д.М.Мурадкабилов, Х.Х.Болтаев. Электронная спектроскопия наноструктур, созданных в поверхностных слоях Si, GaAs и CaF_2 методом низкоэнергетической ионной имплантации. Журнал технической физики, 2013, том 83, вып.6. с.66-70. (01.00.00, №20)

5. Д.А.Ташмухамедова, Б.Е.Умирзаков, Э.Раббимов, Х.Х.Болтаев. Проявление квантоворазмерных эффектов в двукомпонентных полупроводниковых наноструктурах. Uzbek Journal of Physics, Vol.15(№1-2) 2013. pp.50-55 (01.00.00., №5)

6. Б.Е.Умирзаков, С.Ж.Ниматов, Х.Х.Болтаев. Влияние ионной бомбардировки на профиль распределения примесных атомов по глубине в Si, применяемого в солнечных элементах и диодных структурах. Поверхность. рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2014, № 9, с. 87-91. (01.00.00, №39)

7. D.A.Tashmukhamedova, B.E.Umirzakov, Kh.Kh.Boltaev. Structure and Electronic Properties of Nanoscale Phases and Nanofilms of Metal Silicides Produced by Ion Implantation in Combination with Annealing. Journal of Surface Investigation. XX-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2014, Vol. 8, No. 2, pp. 326–331. (№3. Scopus: IF = 0.8)

8. A.A.Abduvaitov, Kh.Kh.Boltaev. Composition of Uncontrolled Impurities and Their Chemical States and Depth Profiles at the Al–Si Interface. Technical Physics, 2015, Vol. 60, No. 4, pp. 621–623. (№3. Scopus: IF = 1.3)

9. А.А.Абдувайитов, Х.Х.Болтаев, Я.М.Рахимова. Оптические свойства Si с нанокристаллами и наноплёнками силицидов металлов. Сборник материалов международной научно-рецензируемой онлайн конференции “Тенденции развития современной физики полупроводников: проблемы, достижения и песпективы” Ташкент, 28.05.2020. с.341–346

II бўлим (част II; part II)

1. Umirzakov B.E. Tashmukhamedova D.A, Kh.Kh.Boltaev. Electronic structure nanofilms and nanocrystals $CoSi_2$, created on surface Si by ion-implantation. 7th European workshop on Secondary Ion Mass Spectrometry. Münster (Germany). 19–21 september 2010. P.84

2. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Болтаев Х.Х., Бойбутаев Ф.Х. Электронная спектроскопия поверхности нанокристаллов и нанопленок силицидов металлов. Материалы VIII международной конференции «КРЕМНИЙ – 2011». Москва. НИТУ «МИСиС». 05–08 июля 2011 г.

3. Умирзаков Б.Е. Ташмухамедова Д.А., Болтаев Х.Х., Усманов М., Якубов Ж.А. Изучение влияния длительного прогрева на состав нанофаз и нанопленок, созданных в приповерхностной области диэлектрических пленок ионной имплантацией. Материалы XX международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью. Том 1. Москва. 2011. С.150–152.

4. S.B.Donaev, Kh.Kh.Boltaev, D.A.Tashmuhamedova, B.E.Umirzakov. Influence of bombardment of ions Ar^+ on property and structure of surface nanofilms $CoSi_2$/Si(111). SIMS-2014, 7-9 september 2014, Munster, Gemany. p.125.

5. Tashmukhamedova D.A., Narmurodov M.T., Boltaev Kh.Kh. Study of the composition and structure of nanosilicide phases created on the Si by ion implantation with active metals. EMR-S. Spring Meeting. Lille, France. May 26th – 30th 2014. P.12

6. Абдувайитов А.А., Болтаев Х.Х. Изучение элементного и химического состава границы раздела Al-Si. Международная конференция «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» ФТИ НПО «Физика-Солнце» АН РУз. 5-6 ноябрь 2015 г. Ташкент, Узбекистан. С.155-157.

7. A.A.Abduvaitov, Kh.Kh.Boltaev. Composition of uncontrolled impurities at the Al–Si interface. SYMPOSIUM PROCEEDINGS IPS 2016. New Trends of Development Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements and Prospects 10-11 November 2016, Tashkent, Uzbekistan. p.180-182.

8. Б.Е.Умирзаков, Д.А.Ташмухамедова, М.Б.Юсупджанова, Х.Х.Болтаев, Ш.А.Суяркулов. Влияние разупорядочения тонких поверхностных слоев на электронные свойства Si(111). V Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» Часть 1, 12-15 февраль, Москва. ЛаПлаз-2019. С.176-177

9. Б.Е.Умирзаков, Д.М.Мурадкабилов, С.Т.Гулямова, Д.А.Ташмухамедова., Болтаев Х.Х. Кристаллическая и электронная структура поверхности нанопленок силицидов металлов. Тезисы докладов XLVIII международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва 29-31 мая 2019. Россия. с.40

Автореферат «Тил ва адабиёт таълими» журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди.

Босишга рухсат этилди: _____ 2021 йил.
Бичими 60x84 1/8 , «Times New Roman» гарнитурада рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табоғи 2,6. Адади: 100. Буюртма: № ___

Тел: (99) 832 99 79; (97) 815 44 54

«IMPRESS MEDIA» МЧЖ босмахонасида чоп этилди.
Манзил: Тошкент ш., Яккасарой тумани, Қушбеги кўчаси, 6 уй.