

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

ДОНАЕВ САРДОР БУРХАНОВИЧ

**КИЧИК ЭНЕРГИЯЛИ ИОНЛАР БИЛАН ИМПЛАНТАЦИЯ ҚИЛИНГАН БИНАР
МАТЕРИАЛЛАР (Pd–Ba, CoSi₂ ВА GaAs) СИРТНИНГ ЭЛЕКТРОН
СПЕКТРОСКОПИЯСИ ВА МИКРОСКОПИЯСИ**

01.04.04 – Физик электроника

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

Тошкент – 2017

УДК: 537.533.7.8

**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
mathematical sciences**

Донаев Сардор Бурханович

Кичик энергияли ионлар билан имплантация қилинган бинар материаллар
(Pd–Ba, CoSi₂ ва GaAs) сиртининг электрон спектроскопияси ва
микроскопияси 3

Донаев Сардор Бурханович

Электронная спектроскопия и микроскопия поверхности бинарных
материалов (Pd–Ba, CoSi₂ и GaAs), имплантированных ионами низких
энергии 20

Donaev Sardor Burkhanovich

Electronic spectroscopy and microscopy of the surface of binary materials (Pd–Ba,
CoSi₂ and GaAs) implanted with low-energy ions 39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works 43

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси
мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация
комиссиясида В2017.1. PhD/FM22 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Тошкент давлат техника университетида бажарилган.

Диссертация автореферати икки тилда (ўзбек, рус) веб-саҳифанинг fti-kengash.uz ҳамда «ZiyoNet» ахборот-таълим портали www.ziyo.net манзилларига жойлаштирилган.

Илмий раҳбар: Умирзаков Балтоходжа Ерматович физика-математика фанлари
 доктори, профессор

Расмий оппонентлар: Ашуров Хотам Бахронович
 техника фанлари доктори

Расулов Акбарали Махамадиевич
 физика-математика фанлари доктори, профессор

Етакчи ташкилот: Ўзбекистон Миллий Университети

Диссертация ҳимояси Физика-техника институти, Ион-плазма ва лазер технологиялари институти, Самарқанд давлат университети ҳузуридаги DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2017 йил «___» _____ соат _____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100084, Тошкент ш., Бодомзор йўли кўчаси, 26-уй. Тел./факс: (99871) 235-42-91, e-mail: lutp@uzsci.net, Физика-техника институти мажлислар зали.)

Диссертация билан Физика-техника институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (_____ рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 100084, Тошкент ш., Бодомзор йўли кўчаси, 26-уй. Тел./факс: (99871) 235-42-91.

Диссертация автореферати 2017 йил «___» _____ куни тарқатилди.

(2017 йил «___» _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси).

С.Л. Лутпуллаев
 Илмий даражалар берувчи илмий
 кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., профессор

А.В. Каримов

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

С.А. Бахрамов

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

3

Кириш (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Дунёда бугунги кунда жадал ривожланаётган физик электроника сохида истиқболли йўналишлардан бири наноўлчамли кўп қатламли тизимларда физик жараёнларнинг тадқиқот ишлари ҳиобланади. Шу билан биргаликда наноўлчамли нанокластер фазалар ва кўп қатламли тузилишларни олиш, Si ва GaAs асосида яратилган юпқа пленкалар, гетероструктуралар ҳамда янги дискрет ва интеграл қурилмаларни яратиш, микроэлектрониканинг замонавий конструктив-технологик ечимлари интеграл схемалар асосий элементларининг геометрик ўлчамларини доимо камайитириш, ҳатто наноўлчамли тузилишгача ўтиш ва эксплуатацион параметрларини яхшилаш муҳим муаммолардн бири ҳисобланади.

Мустақиллик йилларида мамлакатимизда физик электроника соҳасини ривожлантириш борасида янги наноўлчамли тузилишлар ва кўп қатламли квант ўлчамли гетеро композицияларни олиш учун кичик энергияли ионли бомбардирлаш билан биргаликда МНЭ методлрига лоҳида эътибор қаратилди. Бу борада кўп қатламли квант ўлчамли гетероструктура кўринишидаги янги материаллар ва уларга наноконтактларни олиш, ярим ўтказгичли труктуралар асосида янги турдаги сифатли асбоблар ва интеграл схемалар, хусусан, қисқа тўлқинли ва ионлвчи нурланишларнинг планар интеграл детекторлари, УБ нурланишли детекторлар, баллистик транзисторлар, интеграл схемалар ишлаб чиқишда муҳим натижаларга эришилмоқда. Ўзбекистон Республикаси янада ривожлнтириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси асосида физик электрониканинг гетероэпитаксиал тизимлар ва наноўлчамли пленкаларни олиш ҳамда уларнинг шаклланиши ва қайта ишлаш жараёнида кечаётган физик жараёнларни ўрганиш, уларнинг ишчи функцияларини кенгайтириш масалаларини ҳал қилишда муҳим аҳамиятга эга.

Ҳозирги кунда жаҳонда ионлар имплантация қилинган бинар материалларни олиш технологиясини мукаммаллаштириш, янги ҳусусиятли структуралар олиш, уларни ишлаш самарадорлиниги ошириш имконини

беради. Бу борада мақсадли илмий тадқиқотларни, жумладан қуйидаги йўналишлардаги илмий изланишларни амалга ошириш: Ar^+ ионлари билан бомбардирлаш натижасида турли табиатли (металл қотишмалар ва ярим ўтказгичлар) турли кимёвий боғланишли (интерметалл, ковалентли, ионли) бинар материаллар сиртида бир компонентли наноўлчамли тузилмалар шаклланишининг асосий механизмларини аниқлаш; Al^+ ионларини имплантация қилиб GaAs сиртида ҳосил қилинган наноўлчамли фазаларнинг электрон ва кристалл тузилишини ўрганиш, кўп компонентли нанокристаллар ва нанопленкалар олиш учун ионлар имплантацияси ва кейинги қиздириш оптимал режимларини аниқлаш; ионлар билан бомбардирлаш натижасида CoSi_2 ва GaAs сиртида ҳосил қилинган наноўлчамли структураларнинг электрон структураси (энергетик зоналар параметрлари ва валент электронларнинг зичлик ҳолати)ни тадқиқ қилиш. Бу

4

йўналишда олиб борилаётган илмий-тадқиқотлар ушбу диссертация мавзусининг долзарблигини изоҳлайди.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2010 йил 15 декабрдаги ПҚ–1442-сон «2011–2015 йилларда Ўзбекистон Республикаси саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги Қарори ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон «Фанлар академияси фаолияти, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарори ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланиши устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг III. «Энергетика, энергоресурс тежамкорлиги, транспорт, машина ва асбобсозлик, замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника ва электрон асбобсозлиги ривожланиши»нинг устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Бугунги кунга қадар илмий тадқиқотчилар ва корхона олимларининг этибори бинар материаллар асосидаги нанопленкалар ва кўп қатламли гетеротизимлар микро-, опто- ва наноэлектроника асбоблари хусусиятларини ўрганишга қаратилган. Инглиз олимлари Р. Дингл, В. Вигманн ва С.Х. Генрилар Si (100) сиртидаги CoSi_2 МЛЭ пленкаси $10 \div 15$ нм қалинликгача оролчали тавсифга эга бўлиши кўрсатган, ўта юпқа қатламли (квант ўра) GaAs га эга ярим ўтказгичли GaAs AlGaAs гетероструктурасининг оптик спектрлар ютилишининг поғонали тузилишга хос кўринишда ўлчамли квантланиш эффекти пайдо бўлишини академик Ж.И. Альферов томонидан гетероструктуралар, хусусан иккиталиклари, квантли ўралар, симлар (quantum wire) ва нуқталар (quantum dots) ни ўз ичига олувчи электронли энергетик спектр, заряд ташувчиларнинг ҳаракатланиши ва эффектив массалар, тақиқланган зона кенгликлари каби

ярим ўтказгичли кристалларнинг фундаментал параметларини бошқариш бўйича тадқиқотлар олиб борилган.

Проф. Б.Е. Умирзоқов ва унинг шогирдлари томонидан кичик энергияли ион имплантация методи билан Si сиртда ўта юпка ($\theta = 5 \div 10$ нм) металл силициди пленкаси ва GaAs сиртда $Ga_{1-x}Ba_xAs$ пленкаси олинди. Нанопленкалар ва алоҳида кластерли фазаларнинг геометрик ўлчамлари, кристалл ва электрон тузилиши, элемент ва кимёвий таркиби, ҳамда қайта ишлашда уларнинг ўзгариши динамикаси тадқиқ қилинди.

Бироқ, ионли бомбардирлаш усули билан қуйидаги имкониятлар амалда тадқиқ этилмаган: -икки компонентли МНЭ пленкалари сиртида бир компонентли пленкалар ва наноўлчамли фазалар; -Si/CoSi₂/Si ва $Ga_{1-x}Al_xAs$ /GaAs/Ge типдаги кўпқатламли тизимлар ҳамда олинган гетероэпитаксиал тузилишларнинг таркиби, тузилиши ва хусусиятларига ташқи таъсирларнинг таъсир этиши.

5

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Тошкент давлат техника университетида илмий-тадқиқот ишлари режсининг 14–002-сон «Ярим ўтказгичли пленкалар асосида микро ва оптик электроника асбоблари учун тақиқланган зона кенглиги бошқариладиган наноматериаллар олиш технологиясини ишлаб чиқиш» (2009–2011); 14–007-сон «Элементар ва бинар ярим ўтказгичлар асосида наноструктуралар олишнинг арзон технологиясини танлаш ва ишлаб чиқиш» (2009–2011); К–4–001-сон «Кремний асосида кўп қатламли наноўлчамли МДЯ ва ЯДЯ гетероструктураларни олиш технологиясини ишлаб чиқиш» (2009–2014); Ф2–41-сон «Турли табиатли материаллар (металлар, яримўтказгичлар ва диэлектриклар)да ионлар имплантациясидаги кучланган қатламлар ва наноўлчамли тузилишлар ҳосил бўлиши, атомларни киритиш, сочилиш жараёларини назарий ва тажриба тадқиқ қилиш» (2012–2016) лойиҳалари ҳамда ЁФ–2–12-сон «W, Pd ва PdBa нинг эмиссион хусусияти ва ишчи характеристикаларига наноўлчамли структуралар ҳосил бўлишининг таъсири» (2016–2017) лойиҳаси доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади Pd–Ba, CoSi₂ ва GaAs юза қатламларининг кичик энергияли ионлар имплантацияси ва кейинги термик ва лазерли ишлов беришда модификацияланган механизмларнинг ҳамда наноўлчамли тузилмалар ҳосил бўлишининг ўзига хос хусусиятларини комплекс ўрганишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

турли усуллар билан (ионли бомбардимон қилиш, лазерли ишлов бериш) ишлов беришда Pd–Ba қотишмалари сиртида наноўлчамли тузилишлар шаклланиш жараёнларини ўрганиш.

нурланиш дозаси ва энергиясини ўзгартириб Ba ионлари билан бомбардимон қилинган Pd ва Pd–Ba нинг таркиби, сирт морфологияси ва

эмиссион хусусиятлари ўзгаришини ўрганиш ва цилиндр шаклидаги магнетрон катодлари сирт қатламларига Ва ионларини бир жинсли имплантациялаш усулини ишлаб чиқиш;

CoSi₂/Si сиртида энергияси $E_0=0,5\div5$ кэВ ва нурланиш дозаси $D=5\cdot 10^{13}\div 10^{17}$ см⁻² Ar⁺ ва O₂⁺ ионлари билан бомбардирлаш натижасида наноўлчамли тузилишларнинг шаклланиш жараёнларини (элементли ва кимёвий, таркиби, морфологияси, электрон ва кристалл тузилиши) ўрганиш, сиртида Si нанокристаллари бўлган CoSi₂/Si моделини ишлаб чиқиш;

Ar⁺ ионлари билан бомбардирлаш натижасида турли табиатли (металл қотишмалар ва ярим ўтказгичлар) турли кимёвий боғланишли (интерметалл, ковалентли, ионли) бинар материаллар сиртида бир компонентли наноўлчамли тузилмалар шаклланишининг асосий механизмларини аниқлаш;

Al⁺ ионларини имплантация қилиб GaAs сиртида ҳосил қилинган

наноўлчамли фазаларнинг электрон ва кристалл тузилишини ўрганиш. Ga_{1-x}Al_xAs типигаги нанокристаллар ва нанопленкалар олиш учун ионлар имплантацияси ва кейинги қиздириш оптимал режимларини аниқлаш;

6

ионлар билан бомбардирлаш натижасида CoSi₂ ва GaAs сиртида ҳосил қилинган наноўлчамли структураларнинг электрон структураси (энергетик зоналар параметрлари ва валент электронларнинг зичлик ҳолати)ни ўрганиш;

кўп қатламли гетероструктуралар олиш учун ион бомбардировкаси ва қиздиришнинг оптимал шароитини аниқлаш; электрон техника қурилмалари ва турли асбобларни яратишда олинган натижаларни қўллаш бўйича илмий асосланган тавсиялар ишлаб чиқиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида PdBa, (Ba–1,5÷4 ат.%) қотишмаларининг поликристалл пленкалари; CoSi₂/Si ва GaAs/Ge монокристалл МНЭ пленкалардан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг предмети Pd, Pd–Ba поликристалл намуналари ва CoSi₂, GaAs монокристалл плёнкалари сиртида бир ва кўп компонентли нанотузилмаларнинг шаклланиши ҳисобланади.

Тадқиқотнинг усуллари. Диссертацияда ультрабинафша нурланишнинг фотоэлектрон спектроскопияси (УФЭС), катта энергияли электронлар дифракцияси (КЭЭД), растрли электрон микроскопия (РЭМ), оже-электрон спектроскопия (ОЭС), эластик қайтган электронлар спектроскопияси (ЭҚЭС), характерли энергиясини йўқотган электронлар спектроскопияси (ХЭЙЭС), атом кучланишли микроскопия (АКМ) каби тадқиқот усуллари қўлланган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги куйидагилардан иборат:

узоқ вақт эксплуатация қилиш жараёнида Pd–Ba асосида ишлаб чиқилган стандарт катодларнинг ишдан чиқишининг физик механизмлари очиб берилган ва уларнинг сиртини Ва⁺ ионлари билан имплантация

қилишга асосланган бир текис фаоллаштириш усули ишлаб чиқилган;

Pd ва Pd–Ba сиртида ҳосил бўлган нанокристалл фазаларнинг шакли ва ўлчамларининг сирт микрорельефига, ионлар энергияси ва дозасига боғлиқлиги аниқланган: катта дозада имплантация қилинганда кристалл тузилишли майдонларнинг ҳосил бўлиш механизми юқори эҳтимоллик билан ионлар таъсирида материалнинг эриб кетишига олиб келувчи иссиқлик чўққиси (пики) вужудга келиши аниқланган;

ионли бомбардирлаш (Ar^+ ва O^+) ҳамда кейинги қиздириш усули билан $CoSi_2/Si$ (111) сиртида бир хил тартибда жойлашган $CoSiO$ ва Si нинг бир жинсли наноўлчамли фазалари ва эпитаксиал нанопленкалари олинган ҳамда нанокристалли фазалар ўлчамларининг ионлар энергияси ва дозасига боғлиқлиги аниқланган;

Ar^+ -ионлари билан бомбардирлаш натижасида турли кимёвий боғланишга (интерметалл, ковалент ва ион-ковалент) ва табиатга эга бўлган (Pd_2Ba металл қотишма, $CoSi_2$ ва $GaAs$ яримўтказгичлар) материалларнинг сиртида бир компонентли наноўлчамли тузилмалар шаклланишининг асосий механизмлари аниқланган;

7

$GaAs$ ни Al^+ -ионлари билан имплантация қилиш ва кетма-кет $T=850-900$ К гача қиздириш натижасида $\theta=20 \div 30$ Å қалинликдаги тақиқланган зона кенглиги бошқариладиган ($E_g=1,4 \div 2,4$ эВ) $Ga_{1-x}Al_xAs$ ($x=0 \div 0,5$) нанопленкасини олиш услуби ишлаб чиқилган;

$Si-CoSi_2-Si$, $CoSiO-CoSi_2-Si$, $Ga-GaAs-Ge$, $GaAlAs-GaAs$ кўп қатламли тузилишларини олишнинг ионли бомбардирлаш ва кейинги қиздиришнинг оптимал шароитлари аниқланган ва уларнинг энергетик-зона диаграммалари қурилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат: Pd–Ba ни ионли ва лазерли барқарорлаштирилган фаоллаштириш магнетронларнинг катод узелидаги юқори ҳароратли қиздириш тизимини олиб ташлаш имконини беради, уларнинг барқарор юқори самарали ишлаши ва эксплуатация вақтини 100 ва ундан кўпроқ соатга оширишни таъминлаган; тақиқланган зона кенглиги бошқариладиган $Ga_{1-x}Al_xAs$ наноструктураларни олишнинг оптимал шароитлари (ионли бомбардирлаш, қиздириш) $Si/CoSi_2/Si$ намунасининг наноэпитаксиал гетероструктуралари металл базали транзисторларни ишлаб чиқиш имконини беради. **Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** замонавий илмий ва тажриба методларни қўллаш, тажриба бошқа комплекс усуллар билан олинган маълумотларни зарурий статистик экспериментлар асосида қайта ишлаш ҳамда юпқа пленкалар ва ярим ўтказгичлар физикаси маълумотлари ва замонавий

назарий тасаввурлар билан олинган натижаларнинг мувофиқлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти шундаки, берилган физик тавсифларга эга бўлган юпка пленкали тизимларни яратишнинг илмий-амалий асослари, юпка пленкаларнинг ўсиш механизмларини янги талқини билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти яратилган технологик ишланмалар ЎЮЧ электроника ва микроэлектроника асбоблари учун зарур бўлган МДЯ, ЯМЯ типдаги янги кўп қатламли гетеро тузилишли пленкаларни ҳосил қилиш ва ишлаб чиқишда ишлатиш мумкин.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Кичик энергияли ионлар билан бинар материаллар сиртини бомбардимон қилиш ва уларнинг физик-кимёвий хусусиятларини ўрганиш асосида:

тақиқланган зона энергетик кенглигини бошқариш имконини берадиган Ga1-xMexAs наноструктурасини олишнинг эффектив технологияси ва галлий арсениди асосида уч компонентли наноструктураларни олиш усулига Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлигининг ихтирога патенти (№IAP 05370, 28.04.2017) олинди. Ишлаб чиқилган усул GaAs нанокристаллига Al ионларини имплантация қилиш ва кейинги қиздириш орқали Ga1-xAlxAs плёнкаси олинган ва x нинг қийматини 0,1–0,5 оралиқда ўзгартириш йўли билан уч компонентли тизимнинг энергетик зонаси кенглигини 1,4–1,9 эВ гача ўзгартириш имконини берган;

8

ион имплантация усули билан материалларнинг электрон, эмиссион ва оптик хусусиятларини керакли йўналишда ўзгартириш бўйича олинган натижалар Ф2–ФА–Ф161 «Ион имплантацияси усули билан кристаллар (W, WOn, TiN, CdTe, SiO2) сиртида ҳосил қилинган эркин юпка плёнкалар (Al, Cu, Ag ва Me–Si) ва наноўлчамли гетероструктураларнинг шаклланиш механизмлари ҳамда уларнинг физик-кимёвий хоссаларини ўрганиш» ва Ф–2–31 «Наноўлчамли металл силицид плёнкалари структураси ва физик хоссаларини тадқиқ этиш ҳамда термосезгир структуралар ишлаб чиқиш» давлат грантларини бажариш жараёнида фойдаланилган (Фан ва технологияларни ривожлантиришни мувофиқлаштириш кўмитасининг 2017 йил 9 февралдаги ФТК–0313/146-сон маълумотномаси). Яратилган технологик ишланмалар микро- ва наноэлектроника асбоблари учун зарур бўлган металл-диэлектрик-яримўтказгич, яримўтказгич-металл-яримўтказгич типдаги янги кўп қатламли гетеротузилишли плёнкаларни яратиш ва наноконтактлар ҳосил қилиш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари 14 та халқаро ва 3 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича 30 та илмий иш, жумладан, 1 та монография, 1 та патент, Ўзбекистон

Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 10 та мақола, шу жумладан 5 та мақола халқаро рўйхатдан ўтган хорижий журналларда ва 17 та мақола анжуманлар тўпламларида нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг ҳажми 47 та расм ва 9 та жадвални ўз ичига олган ҳолда 120 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

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

Диссертациянинг «**Ионли бомбардирлаш методи билан материалларнинг сиртида наноўлчамли тузилишларни яратиш ва хоссаларини модификациялаштириш бўйича адабиёт маълумотлари қисқача таҳлили**» деб номланган биринчи бобида фаоллаштиришда металл қотишма эмиссион хоссалари ва асосий қонуниятларини ўрганишга бағишланган адабиётлар маълумотлари шарҳи, GaAs сиртида уч компонентли пленкалар, металллар силицидларининг шаклланиши, кристалли ва электрон тузилишнинг хусусиятлари ҳамда улар материалларининг электрофизик ва оптик хоссаларига таъсири келтирилган.

Ушбу ишни ўтказиш ва тадқиқ қилиш учун қуйидагилар асосий хулосалар ҳисобланади: инерт газлар ионлари билан бомбардирлашда бинар материаллар сиртида наноўлчамли тузилишлар ҳосил бўлиш жараёналари, уларнинг фазали ҳолати, тузилиши ва хоссалари етарли ўрганилмаган; кичик энергияли ионли бомбардирлаш методидан фойдаланиб яратилган $\text{Si-CoSi}_2\text{-Si}$ типигаги наноўлчамли кўп қатламли тизимлар ушбу тадқиқот иши бошлангунига қадар ўрганилмаган.

Ўтказилган таҳлилдан келиб чиқиб диссертация ишининг мақсади ва вазифалари шакллантирилди.

Диссертациянинг «**Эксперимент методикаси ва техникаси**» деб номланган иккинчи бобида яратилган ва фойдаланилган тажриба қурилмаларнинг баёни, қаттиқ жисмлар сирти тадқиқотлари ва қайта ишлаш методикасига бағишланган. Тадқиқот ишида иккита юқори вакуумли технологик қурилмалардан фойдаланилган. Стандарт (LAS-2200B) ҳисобланган биринчи қурилмада кремний сиртида металллар пленкасини ўтказиш, термик қайта ишлов бериш ҳамда ТЭД методи билан пленка кристалл тузилиши тадқиқ қилинди, пленка қалинлиги ўлчанди. Иккинчи тажриба қурилмада ИЭС ва ФЭС методлари мажмуасидан фойдаланиш йўли билан пленкаларнинг физик-кимёвий хоссалари тадқиқ этилди. Кристалл панжара параметрларини яна ҳам аниқроқ аниқлаш ва сирт микрорельефи ҳақида маълумот олиш учун «Самеса» растрли электрон микроскопи, ЭМР-102 электронографи, ХИА-200 атом-кучланишли микроскопи каби стандарт қурилмалардан фойдаланилди.

Диссертациянинг «**Ионли бомбардирлаш ва термик фаоллаштириш натижасида Pd–Ba қотишмаси сирт қисмида наноўлчамли**

10

тузилишларни шакллантириш» деб номланган учинчи бобида Ba^+ ва Ag^+ ионлари билан бомбардирлаш ва қиздириш билан фаоллаштириш натижасида Pd–Ba (Ba – 1,5%) сирти электрон хоссалари ва таркиби, топографиясининг ўзгариши тадқиқ этилган. Pd–Ba ни $T=800\text{ K}$ ҳароратда $\langle \text{H}_2 \rangle$ атмосферасида фаоллаштириш натижасида Pd–Ba нинг сирти ва сирт ости соҳасидаги ҳолатга юқори вакуумда фақатгина $T=1100\text{ K}$ да қиздиришдан кейингина эришилиши кўрсатилди.

Дозаси $D=4 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-2}$ ва $E_0=1\text{ кэВ}$ бўлган Ba^+ ионларининг имплантацияси натижасида σ_m қиймати $4,5 \div 5$ гача ошади, $e\phi$ қиймати $\sim 2,2\text{ эВ}$ ни ташкил этади ва мос равишда водород муҳитида фаоллаштириш натижасида олинган $e\phi$ дан сезиларли фарқ қилмайди. Бу ҳолат σ_m нинг кескин ошиши ҳам сиртдан C ва S атомларининг сочилиши, ҳам Pd ва Ba атомлари орасида кимёвий боғланишнинг сирт ости қисмида ҳосил бўлиши билан тушунтирилади.

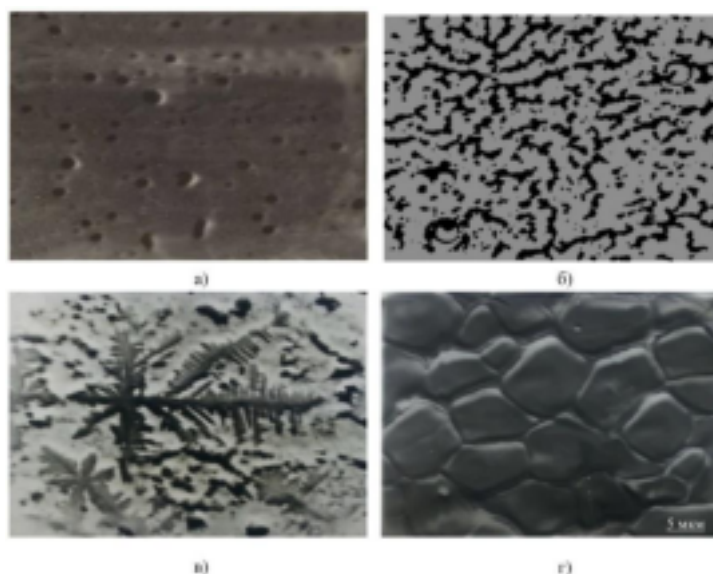
$1 \div 3$ дақиқа давомида 10^{-4} Торр парциаль босим билан кислород атмосферасида фаоллаштириш жараёнидаги намуналарни ушлаб туриш (чидаши) сезиларли даражада $e\phi$ нинг камайиши ва σ_m нинг ошишига олиб

келди. ОЭС маълумотларига таяниб шундай тахмин қилиш мумкинки, қўйиб юборишнинг бошланғич босқичида ($t \approx 1$ мин) сиртдаги кислороднинг ҳар бир атоми Ва нинг тўрт атоми орасида жойлашади ва бунда Ba_2O намунасидаги бирикма ҳосил бўлади, қўйиб юбориш вақтини 3 минутгача оширганда эса кислород атомлари Ва атомлари орасида жойлашади ва BaO типидagi бирикма ҳосил бўлади.

1-расмда Ba^+ ионлари билан $E_0 = 0,5$ кэВ да ҳамда турли дозада имплантация қилинган Pd ва Pd–Ba сирти РЭМ-тасвири берилган: $D \approx 6 \cdot 10^{14}$ см^{-2} дозасида Pd сиртида $0,2 \div 0,5$ мкм диаметрли алоҳида кластерли фазалар пайдо бўлади, $D = 5 \cdot 10^{15}$ см^{-2} да эса турли шакл ва ўлчамли кластерли фазалар ҳосил бўлади. Худди шундай энергия ва доза билан Pd–Ba да Ba^+ ионлари имплантацияси ҳолатида кластерли фазалар билан бир қаторда барий атоми билан бойитилган $2 \div 3$ мкм кенглик билан тармоқли чизиклар ҳосил бўлади. Pd–Ba ҳолатида механик ишлов беришнинг мавжудлиги ионли бомбардирлаш жараёнида аралашмаларнинг тақсимланишига олиб келиши кўринади. Pd–Ba да бўлганидек Pd да ҳолатида ҳам $6 \cdot 10^{16}$ см^{-2} гача дозаларни оширишда кристалли пленкалар учун хос $5 \div 10$ мкм ўлчамли ва аниқ қирралар билан йирик доначали майдонлар пайдо бўлади. Доначалар сиртининг тўлқинлилиги катта ички кучланишдан далолат беради. ОЭС спектрларининг таҳлили Pd_2Ba ва PdBa типидagi бирикмаларни ўз ичига олган атомларнинг йиғилиши ушбу участкаларга мувофиқ келади, деб тахмин қилишга имкон беради. Бу бирикмаларнинг ҳосил бўлиши валент зона E_v яқинида ҳолат зичлигининг интенсив максимуми пайдо бўлиши ҳисобига ички иккиламчи электронлар миқдори ўсишига олиб келади. Бу билан $e\phi$ сиртининг бир хил қийматларида активировкаланган Pd–Ba қотишмасига нисбатан Pd–Ba нинг ионли легирланган ҳолатида σ_m нинг (5 гача) сезиларли ўсиши тушунтирилади.

11

Pd_2Ba нанопленкасини $E_0 = 1 \div 3$ кэВ бўлган Ag^+ ионлари билан бомбардирлашда $D = 5 \cdot 10^{14}$ см^{-2} дан бошлаб унинг таркибий бўлақларга ажралиши ва сиртни Ва атомлари билан бойиши рўй беради. $D = 5 \cdot 10^{16}$ см^{-2} да Ва пленкаси қалинлиги $2 \div 3$ моноқатламни ташкил этади. D нинг навбатдаги ошиши сиртда Ва нинг жадал буғланишига олиб келади. Электрон бомбардирлаш натижасида $j_e = 5 \div 6$ $\text{mA} \cdot \text{см}^{-2}$ дан бошлаб Ва нинг буғланиши кузатилган. Бу пленкалар 100 ва ундан ортиқ соат давомида $T = 700 \div 800$ К гача ҳароратли кучланишга чидаган.



а) $6 \cdot 10^{14}$; б, в) $5 \cdot 10^{15}$; г) $6 \cdot 10^{16}$.

1-расм. $E=1$ кэВ ва турли дозаларда ($D, \text{см}^{-2}$) Ba^+ ионлари билан имплантация қилинган РЭМ тасвирлар

Pd-Ba стандарт катодларининг узок вақт ($t \geq 500$ с.) эксплуатация қилинганда уларнинг ишдан чиқиш асосий механизмлари аниқланди. Бу катодларнинг сиртида $15 \div 20$ нм ўлчам билан пуфакчалар кўринишида алоҳида нуқсонли участкалар пайдо бўлишини кўрсатди. Ушбу участкаларда С ва S атомлари концентрациясининг 15 ат.% гача ошиши топилди ва таглик (Mo) атомлари пайдо бўлди.

Диссертациянинг «**Бинар материаллар сиртида ҳосил қилинган бир ва кўп компонентли наноўлчамли структуралар сиртининг морфологияси, таркиби, электрон ва кристалл структураси**» деб номланган тўртинчи бобида CoSi_2/Si нано пленкаси тузилиши ва таркибига Ar^+ ва $^+ \text{O}_2$ ионларини; GaAs тузилиши ва таркибига Al^+ ва Ar^+ ионларини бомбардирлаш таъсири бўйича тажриба тадқиқотлар натижалари келтирилган. Турли қалинликдаги CoSi_2/Si (111) МНЭ нано пленкасининг зона-энергетик, эмиссион ва электрофизик параметрлари аниқланди. CoSi_2 пленкаси $h=10 \div 15$ нм гача оролсимон тавсифга эга бўлиши кўрсатилди: кремний ва силициднинг ХИЭ чиқиш зонаси чуқурлиги бир-биридан жуда кам фарқланади ва $80-100 \text{ \AA}$ чегарада жойлашади, бироқ ρ қиймати кескин фарқ қилади.

Ar^+ ионлари билан бомбардирлаш натижасида CoSi_2/Si (111) сирти электрон ҳолати ўзгариши ХЭЙЭ спектрлари шаклида яхши акс этади (2-расм). Тоза CoSi_2 спектрида 6; 9; 13,8 ва 17 эВ энергиясида ХЭЙЭ чўққиси топилади. $E=9$; 13,8; ва 17 эВ энергиялари билан чўққининг мавжудлиги сирт $\hbar\omega_s$, ҳажмли $\hbar\omega_v$ ва икки каррали сирт $2\hbar\omega_s$ валент электронлар плазмали

тебранишига мувофиқ тушунтирилади. CoSi_2 валент зонаси Si нинг 3s ва 3p орбиталидан ва Co нинг 3d орбиталидан шаклланган. Шунинг учун 3 ва 6 эВ энергиялар чўққисининг мавжудлигини валент электронлар ҳолатининг максимум зичлигидан электронлар хаяжонланиши билан тушунтириш мумкин. $D=4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ да спектрда Si учун хос ХЭЙЭ нинг деярли барча чўққилари аниқланади, хусусан, $E=11, 18$ ва 23 эВ даги чўққилар валент

		электрон	қайта
		ларнинг	тақсимланишига
		хаяжонланиши	олиб келиши
		билан юзага	керак. Co атоми
		келади (2-расм,	концентрацияси
		3-эгрилик).	ни ионли
3		Катта дозадаги	бомбардирлашда
		ионлар ($D \geq 10^{16}$	н кейин сирт
	$\hbar\omega_s,$	см^{-2}) билан	қатламларида
	CoSi_2	бомбардировкал	нолгача
2 1	$\hbar\omega_v,$	анганда сирт	камаяди, Si–
	CoSi_2	тўлиқ Si	CoSi_2 ва
	$\frac{dN}{dE}$	атомлари билан	CoSi_2 –Si
	$\hbar\omega_v(\text{Si})$	бир хил	чегарасида эса у
	$\hbar\omega_s(\text{Si})$	қопланади, деб	кескин ошади
		ҳисоблаш	(3-расм).
		мумкин. Бу	Тарқалганидан
$2\hbar\omega_s$		CoSi_2/Si	кейин Si атоми
		тизимлари сирт	Co
		ости	
	Si	соҳаларида Co	
	коллектив	атомларини	
	тебранаётган		

$\Delta E, \text{ эВ } 20 \ 10 \ 0$

1) 0; 2) $8 \cdot 10^{14}$; 3) $6 \cdot 10^{16}$.

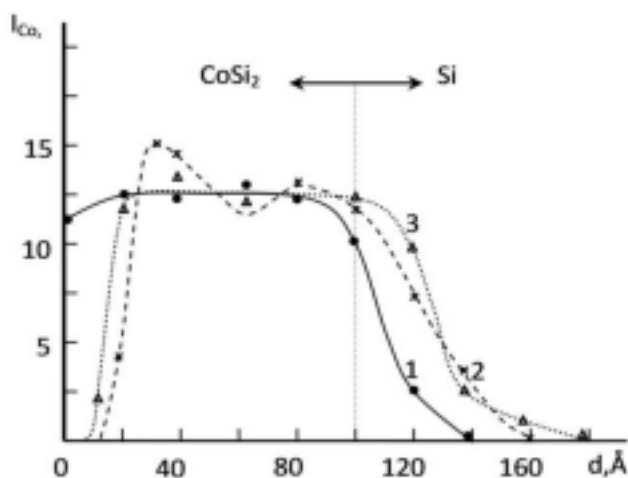
2-расм. $E_0=1$ кэВ ва турли дозаларда ($D, \text{ см}^{-2}$) Ag^+ ионлари билан бомбардировкаланган $\text{CoSi}_2/\text{Si}(111)$ пленкаси учун $E_p=100$ эВ да олинган ХЭЙЭ спектрлар боғланмаган атомлари ва бўш

бойитилган юпқа ўтиш қатлами ҳосил бўлади, Co атомининг бир қисми эса CoSi_2/Si чегарасида диффузияланади ва Si (111) матрицаси қисмига ўтади. Барча жараёнлар тизим сирт ости қатламларининг кучли тартибсизлантирилгани билан кузатилади (4-б расм). $T \approx 550 \div 600 \text{ K}$ дан бошлаб 30 мин давомида постимплантацион қиздириш бўлим чегарасида Co атоми концентрацияси ўзгариши, Si атоми билан Co диффузияланган атомлари бирикмаси ҳосил бўлиши ва тартибланган тузилиш пайдо

ўринни қолдириб сиртни диффузиялаши кўзга ташланади. Кремнинг сирт қатлами қалинлиги $15 \div 20 \text{ Å}$ ни ташкил этади. Co атомининг катта қисми бу бўш ўринни тўлдириб тарқалади ва Si/ CoSi_2 чегарасида кобальт билан

бўлишига олиб келди. $T=850$ К да тизимнинг аморфланган тизимида тўлиқ кристалланиш бўлиб ўтади (4-в расм) ва Si/CoSi₂/Si (111) гетероэпитаксиал пленкали тузилиши ҳосил бўлади.

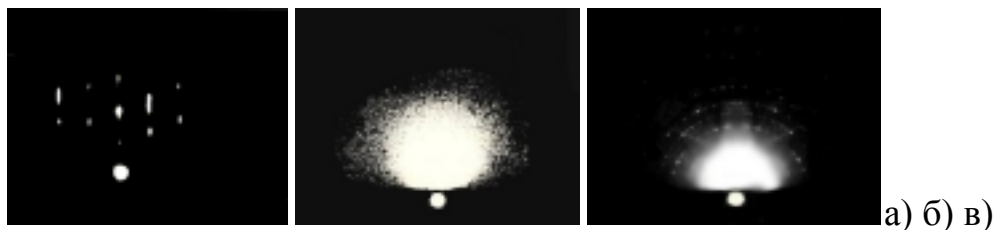
13



- 1) ионли бомбардирлашгача; 2) $D=6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ даги Ag^+ с $E_0=1$ кэВ ионлари билан бомбардировкадан кейин; 3) $t=30$ дақиқа давомида $T=900$ К да қиздирилганидан кейин.

3-расм. CoSi₂/Si пленкаси чуқурлиги бўйича Co атомлари тақсимланиш профили

Ag^+ ионлари энергиясини $3\div 4$ кэВ гача ошириб $25\text{--}30$ Å қалинликдаги Si пленкаси олинди. Ионлар энергиясининг кейинги ошиши Co диффузияси ва сирти тарқалиши нафақат нишон чуқурлигида, балки сиртда ҳам катталашшига олиб келди. Сирт ости қисмида юқори дозали ($D=D_{\text{тўй}}=4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) O_2^+ ионлар билан бомбардирлаш ҳолатида Co–Si, Co–O, Si–O, Co–Si–O типигадаги бирикмалар ҳамда Co, Si ва O боғланмаган атомлари ҳосил бўлади. $T \approx 900$ К даги қиздиришдан кейин $20\text{--}50$ нм ўлчамли алоҳида блоклардан тузилган CoSiO намунасидаги уч компонентли поликристалл пленка шаклланди. Блоклар орасида диаметри $10\text{--}20$ нм ва чуқурлиги $4\text{--}5$ нм бўлган наноковаклар мавжуд.



- а) тоза сирт; б) $D=6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, $E_0=1$ кэВ даги Ag^+ ионлари билан бомбардировкалагандан кейин; в) ионли-нурланган пленка $T=900$ К да қиздирилганидан кейин.

4-расм. CoSi₂/Si (111) сирт электронограммаси

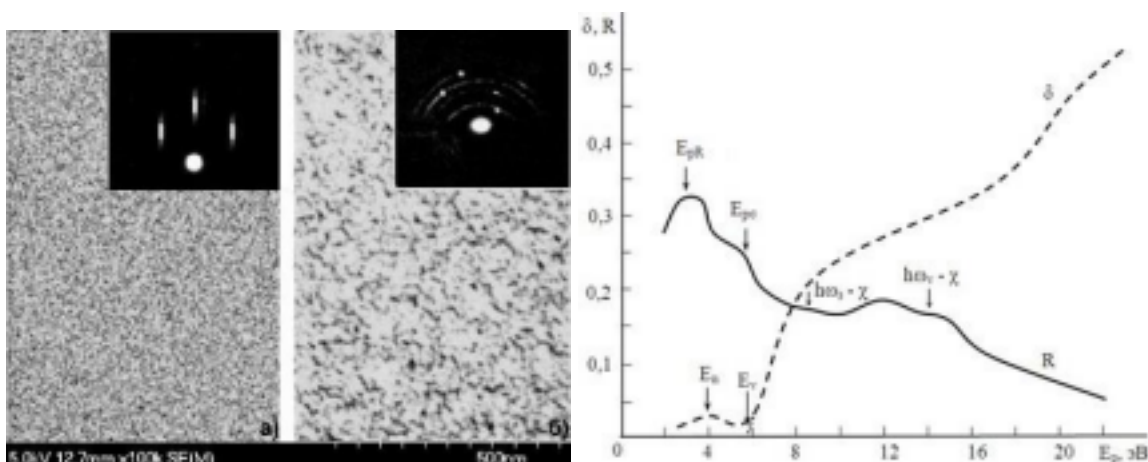
5-расмда CoSiO/CoSi₂ пленкаси учун $R(E_p)$ ва $\delta(E_p)$ боғлиқлигининг кичик энергияли қисми келтирилган (111). R нинг бошланғич кескин

камаиши E_C ўтказувчанлик зонасига E_V валентли зонаси энг юқори қисмидан электронлар ўтиши билан белгиланади, яъни $E_{pR}=E_V-E_C=E_g=2,4$ эВ. $E_{p\delta}$ қиймати E_V дан E_B (яъни вакуум)га электронлар ўтиши билан мос келади: $E_{p\delta}=\Phi=E_V=5,9$ эВ. Бунда δ нинг кескин бошланғич ўсиши кузатилади. Электронларга мойиллик қиймати $\chi=E_{p\delta}-E_{pR}=3,5$ эВ. Кузатилаётган $E_p=E_n$

14

даги ўзига хос хусусият киришмали сатҳлардан электронларнинг ҳаяжонланиши билан белгиланиши мумкин. $E_p=8,5$ ва $13,6$ эВ энергияда майдон қиялиги топилади, у плазмонларда секинлашган электронларнинг резонасли эгилувчан тарқалиши билан тушунтирилади. Ҳақиқатан, бу энергиянинг электронга мойиллигини ҳисобга олиб CoSiO пленкасида валент электронлар плазмали тебранишининг ҳаяжонланиши мос келади: $\hbar\omega_s=12$ эВ ва $\hbar\omega_v=17$ эВ.

Al^+ ионлари имплантацияси ва кетма-кет қиздириш (лазерли + ҳароратли) билан биргаликда GaAs сирт қисмида яратилган $Ga_{1-x}Al_xAs$ нанопленкаси ва нанокристалларининг электрон хусусиятлари ва тузилиши ўрганилди. $E_0=1$ кэВ ва $D=6\cdot 10^{16}$ см⁻² бўлганда ҳамда $T\approx 900$ К да қиздирилгандан кейин нисбатан силлиқ сиртга эга $Ga_{0,5}Al_{0,5}As$ эпитаксиал пленкаси олинди (6-расм).



δ) ҳақиқий иккиламчи электронлар коэффиценти; R) эластик қайтган электронлар коэффиценти.

5-расм. 35–40 Å қалинликдаги CoSiO/CoSi₂(111) пленкаси учун R(E_p) ва δ(E_p) боғлиқлиги.

а) GaAs(111), б) GaAs ни қиздириш, $E_0=1$ кэВ ва $D=4\cdot 10^{16}$ см⁻² билан Al^+ ионларини имплантациялаш натижасида олинган $Ga_{0,5}Al_{0,5}As$.

6-расм. РЭМ ва ТЭД сирт тасвири

$Ga_{0,5}Al_{0,5}As$ пленкаси қалинлиги $\sim 35\text{--}40$ Å ни ташкил этади, Al концентрацияси 25 ат.% дан 0 гача монотон камайганда ўтиш қатлами қалинлиги эса $50\text{--}60$ Å ни ташкил этади.

7-расмда тоза GaAs ҳамда $Ga_{0,5}Al_{0,5}As$ нанокристаллари ва нанопленкаларига эга GaAs нинг фотоэлектрон спектрлари берилган. Уч

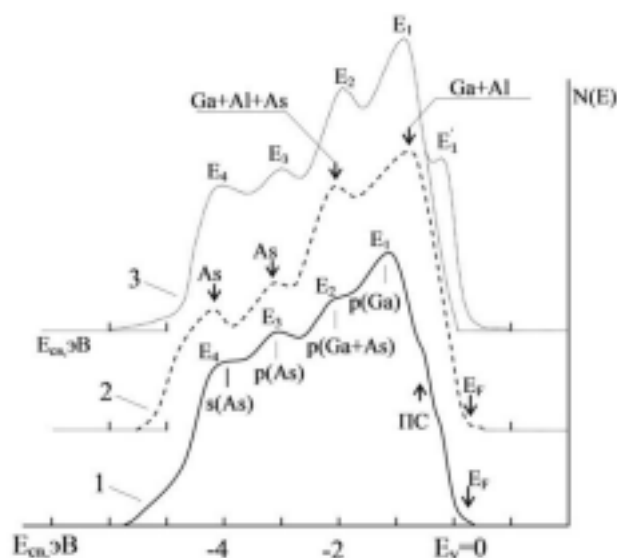
компонентли бирикма нанопленкасининг ҳосил бўлиши қуйидаги ўзгаришларга олиб келди:

спектр кенглиги 0,3–0,4 эВ га кичраяди, яъни E_V нинг ҳолати E_B га нисбатан 0,3–0,4 эВга ошади;

E_1 чўққиси жойлашуви катта энергия томонга аралашади ва унинг кенглиги сезиларли ($\sim 1,5$ марта) катталашади, бу чўққининг шаклланишида $4p - Ga$ электронлари ва $3p - Al$ электронлари катнашади;

15

E_2 чўққисининг жойлашуви p ҳолатда Ga , Al ва As ажралиб кетиши, $0,1 \div 0,2$ эВ га аралашуви ва унинг жадаллиги ошиши билан тушунтирилади; мишьяк чўққилари жойлашуви E_3 ва E_4 да деярли ўзгармайди, уларнинг интенсивлигида баъзи ўзга-ришлар бўлиб ўтади.



1) соф GaAs/Ge(111) пленкаси;

2) $\theta=40^\circ$ бўлган $Ga_{0,5}Al_{0,5}As/GaAs$ нанопленкаси; 3- $d=15-20$ нм, $h\nu=10,8$ эВ $Ga_{0,5}Al_{0,5}As$ нанокристаллига эга GaAs пленкаси.

7-расм. Фотоэлектрон спектрлар

$Ga_{0,5}Al_{0,5}As$ нанокристаллари ва нанопленкалари электрон-зонали параметрлари уларнинг қалинлигига боғлиқ (1-жадвал). $\theta \geq 35-40^\circ$ қалинликдаги $Ga_{0,5}Al_{0,5}As$ нанопленкаси учун E_g қиймати $\sim 2,1$ эВни ташкил этади, бу массив пленка E_g сига жуда яқин. $\theta=20-25^\circ$ да E_g қиймати 2,3 эВ гача катталашади. Бу пленкалар учун ўлчам эффектлари $\theta=20-25^\circ$ дан пайдо бўла бошлайди, деб тахмин қилиш мумкин. $Ga_{0,5}Al_{0,5}As$ нанокристалл фазаларида квантли эффектларнинг кўпроқ сезиларли пайдо бўлиши кузатилади. Бунинг натижасида E_g қиймати 2,9 эВ гача катталашади.

1-жадвал

GaAs (111) ва $Ga_{0,5}Al_{0,5}As$ учун E_V , E_g , χ баҳолаш қийматлари

Тадқиқ қилинаётган объект	Қалинлиги θ , Å	E_V , эВ	E_g , эВ	χ , эВ
n тип GaAs (111) пленкаси	500	5,1	1,4	3,7
Ga _{0,5} Al _{0,5} As нанопленкаси	20–25	5,4	2,3	3,1
	35–40	5,3	2,1	3,2
	50–60	5,3	2,1	3,2
Ga _{0,5} Al _{0,5} As нанокристалли d=15–20 нм	35–40	5,6	2,9	2,7

Ионли бомбардирлашда бинар бирикмалардаги наноўлчамли тузилишлар шаклланишининг тажриба натижалари таҳлили ва назарий

16

баҳолаш берилган. Маълумки, бинар материалларни ионли бомбардирлашда А ва В атомлари кристаллининг панжара тугунидан чиқиб кетади ҳамда тугунлар ораси атомлари ва бўш жой ҳосил бўлади. Охиргиси кристаллар бўйича кўчиради, қайтадан комбинациялайди ёки оқим орқали қоплаб олинади (дислокация ёки кристалл сирти билан).

Ионли нурланишда бўш жойлар ва тугунлар ораси атомлар ҳосил бўлади. Шу билан бир вақтда уларнинг қисман қайтадан комбинацияланиши бўлиб ўтади. Бунда А навидаги атом бўш жойли А атоми каби қайта комбинацияланади, бу эса нуқсонларни йўқотишга олиб келади, бўш жойли В атоми ҳам А_в антиструктурали нуқсоннинг пайдо бўлишига олиб келади.

Тажриба натижалари таҳлиliga кўра бинар бирикмаларни кичик энергияли ($E_0=0,5-5$ кэВ) ионли бомбардирлашда ионлар ва асос типи қандай бўлишидан қатъи назар, атом орасидаги бўлиниш ва уларнинг алоҳида компонентлари ёйилишига олиб келади. Десорбция ва диффузия устунлиги (сиртга ёки ҳажмга) натижасида материал сирти компонентларидан бири бошқа компонент атоми билан бойитилади. Паст дозада ($D \leq 5 \cdot 10^{14}$ см⁻²) асос сиртида 2–5 нм диаметрли алоҳида нуқтали участкалар (кластерли фазалар) пайдо бўлади, шу билан бирга доза ортиши билан фазаларнинг сирт ўлчамлари катталашади ва $D \approx (5-10) \cdot 10^{14}$ см⁻²да 20–30 нм ни ташкил этади. Юқори дозаларда ($D > 4 \cdot 10^{16}$ см⁻²) алоҳида кластерли фазалар чегарасининг қопланиши бўлиб ўтади ва яхлит пленка ҳосил бўлади. Бир хил шароитдаги бомбардирлашда сирт хусусиятлари ва таркибининг нисбий ўзгаришлари асос материалига (бинар бирикмалар атом оғирликларининг атомлар орасидаги алоқа энергияси ва типига) боғлиқ.

Тадқиқ қилинаётган материаллар сирт ҳолати ўзгаришининг имконий механизмлари ўрганилди. Pd–Ba атомлари орасидаги масофага қараганда

Pd_2Ba қотишмасидаги барий атоми диаметри каттароқ, шунинг учун ионли бомбардирлаш жараёнидаги Ва диффузияси, асосан, сиртга йўналтирилган. Бироқ бунда уларнинг сиртдан сезиларли буғланиши бўлиб ўтмайди, демак, сирт Ва атомлар билан бойитилади. Ва-Ва боғланиши энергияси Pd-Ba боғланиши энергиясига қараганда озгина пастроқ. Пленка қалинлиги ошиши билан Ва-Ва боғланиши энергияси камаяди. Шунинг учун Ва пленкаси қалинлиги $E_0=0,5\div 1$ кэВ да 2–3 моноқатлам ва $E_0=3\div 5$ кэВ да 1 моноқатламдан ортиқ бўлмайди.

Ag^+ ионлари билан GaAs ни бомбардирлаш қуйидагиларга олиб келади: паст доза ($D\leq 10^{15}$ см⁻²) да As атоми билан бойитилган участканинг шаклланиши; юқори доза ($D\geq 5\cdot 10^{15}$ см⁻²) да Ga атоми билан бойитилган оролчалар ёки нанопленкаларнинг шаклланиши. Бироқ иккала ҳолатда ҳам Ga ва As массаси бўйича кичкина фарқ эвазига компонентлардан бирининг тўлиқ буғланиши кузатилмайди.

Ушбу бобнинг охирида микро, нано ва опто электроник тузилишларнинг истиқболли асбобларини яратиш учун олинган натижаларни қўллаш бўйича тавсиялар берилган: Si/CoSi₂/Si тузилишидан металл базали транзисторлар ва тез ишловчи ўтказувчан транзисторлар ишлаб чиқаришда фойдаланиш мумкин; GaAlAs/GaAs намунасидаги

17

гетероструктураларидан квантли диодлар ва транзисторлар яратишда; Ва–PdBa тузилишидан ЎЮЧ электроника асбобларида фойдаланиш мумкин.

ХУЛОСА

Pd-Ba , CoSi₂ ва GaAs юза қатламларининг кичик энергияли ионлар имплантацияси ва кейинги термик ва лазерли ишлов беришда модификацияланган механизмларнинг ҳамда наноўлчамли тузилмалар ҳосил бўлишининг ўзига хос хусусиятларини комплекс тадқиқ қилиш натижасида қуйидаги хулосалар қилинди:

1. Pd ва Pd–Ba га Ba^+ ионлари $E_0=0,5\text{--}5$ кэВ энергияда ва $D=10^{15}$ см⁻² дозада имплантация қилинганда намуна сиртининг микрорельефига боғлиқ ҳолда турли шаклдаги ва ўлчамдаги нанокластерли фазаларнинг шаклланишига олиб келиши аниқланди. Хусусан, Pd–Ba га механик ишлов бериш изларининг мавжудлиги кенглиги 2–3 мкм бўлган Ва атомлари билан бойитилган тармоқланган чизикларнинг ҳосил бўлишига олиб келиши, $D=D_{\text{нас.}}=6\cdot 10^{16}$ см⁻² дозада Pd–Ba ва Pdларнинг сирти аниқ қирралар ва ўлчамлари 5–10 мкм дан ташкил топган катта донали PdBa ва Pd₂Ba типидagi боғланишли блоклардан иборатлиги кўрсатилган.

2. Лазерли фаоллаштиришда Pd–Ba сирти тозалигини водород киритмасдан юқорироқ даражага етказиш ва иккиламчи электронлар эмиссияси коэффицентининг максимумларига ошириш мумкинлиги кўрсатилиб, Юқори вакуумда ва кислород атмосферасида фаоллаштирилган

Pd–Ba сирти ҳамда профили бўйича Ba, O ва Pd атомлари жойлашиши модели ишлаб чиқилган.

3. Pd–Ba стандарт катодлари узок вақт ($t \geq 500$ соат) эксплуатация қилинганда уларнинг ишдан чиқишига сабаб бўлувчи асосий механизмлари аниқланиб, бу катодларнинг сиртида 15–20 нм ўлчамли пуфакчалар кўринишидаги алоҳида нуқсонли участкалар пайдо бўлиши кўрсатилган ва бу участкаларда C ва S атомлари концентрациясининг 10–15 ат.% гача ошиши ва асос атомларининг (Mo) пайдо бўлиши таъкидланган.

4. Турли қалинликдаги ($\theta = 10\text{--}100$ нм) CoSi_2/Si (111) нанопленкалари учун E_g , λ , σ_m ва ρ ларнинг қийматлари аниқланиб, CoSi_2 пленкасининг ХИЭ чиқиш зонаси чуқурлиги $\lambda \sim 80\text{--}100$ Å ни ташкил этиши ва $\text{Si}\text{--}\text{CoSi}_2\text{--}\text{Si}$ нанопленкали тизимини шакллантириш учун ионли бомбардирлаш ва кейинги қиздиришнинг оптимал режимлари аниқланган.

5. Ag^+ ионлари билан бомбардирлаш натижасида турли табиатли ва кимёвий боғланишли (Pd_2Ba металл қотишмаси, CoSi_2 , GaAs ярим ўтказгичлари) пленкалар сиртида бир компонентли наноўлчамли структуралар шаклланиш механизмлари ишлаб чиқилган.

6. Нурланишнинг паст дозасида ($D \leq 10^{15}$ см⁻²) нанокристалл фазалар, катта дозасида ($D \geq 2 \cdot 10^{16}$ см⁻²) эса $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$ турдаги нанопленка ҳосил бўлиши ва имплантациядан кейин 850–1000 К ораликда қиздириш ҳисобига хнинг қийматини 0,5 дан 0,2 гача ўзгартириш мумкинлиги таъкидланган.

18

7. Ионлар билан бомбардимон қилиш орқали яримўтказгичлар сиртида ҳосил қилинган бир ва уч компонентли наноўлчамли структураларнинг тақиқланган зона кенглиги ва валент электронларнинг зичлик ҳолати баҳоланди, хусусан, нанокристаллар сирт ўлчамларининг $\sim 50\div 60$ нм дан $10\div 15$ нм гача камайиши натижасида Si тақиқланган зонаси кенглиги 1,2 дан 1,5 эВ гача, CoSiO – 2,4 дан 2,8 эВ гача, $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ – 2,4 дан 2,9 эВ гача ортиши кўрсатилган.

8. Тақиқланган зона кенглиги бошқариладиган $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ наноструктураларни олишнинг оптимал шароитлари (ионли бомбардирлаш, қиздириш) $\text{Si}/\text{CoSi}_2/\text{Si}$ намунасининг наноэпитаксиал гетероструктуралари металл базали транзисторларни ишлаб чиқишга имкон берган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.27.06.2017. FM./T.34.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ПРИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ,
ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,
САМАРКАНДСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ
ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

ДОНАЕВ САРДОР БУРХАНОВИЧ

**ЭЛЕКТРОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ И МИКРОСКОПИЯ ПОВЕРХНОСТИ
БИНАРНЫХ МАТЕРИАЛОВ (Pd-Ba, CoSi₂ И GaAs), ИМПЛАНТИРОВАННЫХ
ИОНАМИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ**

01.04.04 – Физика электроника

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

Ташкент-2017

20

**Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам
зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров
Республики Узбекистан за B2017.1.PhD/FM22**

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете.

Автореферат диссертации на двух языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице по адресу fti-kengash.uz и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» по адресу www.ziyonet.uz.

Научный руководитель: Умирзаков Балтоходжа Ерматович, доктор
физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: Ашуров Хотам Бахронович
доктор технических наук

Расулов Акбарали Махамадиевич
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: Национальный Университет Узбекистана

Защита диссертации состоится «__» _____ 2017 года в ____ часов на заседании Научного совета 27.06.2017. FM./T.34.01 при Физико-техническом институте, ионно плазменных и лазерных технологий. Адрес: 100084, г. Ташкент, ул. Бодомзор йули, дом 26. Административное здание Физико-технического института, зал конференций. Тел./Факс: (+99871) 235–30–41; e-mail: lutp@uzsci.net.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Физико-технического института (зарегистрирована за № ____), по адресу: 100084, г. Ташкент, ул. Бодомзор йули, дом 26. Административное здание Физико-технического института, зал конференций. Тел./Факс: (+99871) 235–30–41.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2017 г.
(протокол рассылки № _____ от «__» _____ 2017 г.)

С.Л. Лутпуллаев,
председатель Научного совета по присуждению
ученых степеней, док. ф.-м. н., профессор

А.В. Каримов,
ученый секретарь Научного совета по присуждению
ученых степеней, док. ф.-м. н., профессор

С.А. Бахрамов,
председатель научного семинара при Научном
совете по присуждению ученых степеней,
док. ф.-м. н., профессор

сегодня в бурно развивающемся направлении области физической электроники одним из перспективных направлений является исследование физических процессов в наноразмерных многослойных структурах. Вместе с тем, получение нанокластерных фаз и наноразмерных многослойных структур, тонкие пленки и гетероструктуры полученные на основе Si и GaAs, создание интегральных схем, вплоть до перехода на наноразмерные структуры и улучшения эксплуатационных характеристик является одной из важных проблем.

В годы независимости в республике развитию области физической электроники особое внимание уделено получению новых наноразмерных структур и многослойных квантово-размерных гетерокомпозиций методом МЛЭ в сочетании с низкоэнергетической ионной бомбардировкой. В этом аспекте по получению новых материалов в виде многослойных квантово-размерных гетероструктур и наноконтактов к ним, новых типов полупроводниковых приборов и интегральных схем, в частности, планарных интегральных детекторов коротковолновых и ионизирующих излучений, детекторов УФ-излучений, баллистических транзисторов, интегральных схем достигнуты существенные результаты. На основе Стратегии действий дальнейшего развития Республики Узбекистан в области физической электроники получение гетерозонных структур и наноразмерных пленок, а также их формирование и изучение в процессе преобразования физических процессов имеет важное значение при решении вопросов расширения их функциональных возможностей.

На сегодня в мире усовершенствование технологии получения бинарных материалов ионной имплантацией, получение структур с новыми свойствами позволит повысить эффективность их работы. В этом плане целевые исследования, в том числе осуществление ниже приведенных научных исследований: определение основных механизмов формирования однокомпонентных наноразмерных структур на поверхности бинарных материалов различной природы (металлосплавов и полупроводников) и различной химической связи (интерметаллической, ковалентной и ионной) при бомбардировке ионами Ar^+ ; изучение электронной и кристаллической структуры наноразмерных фаз, созданных на поверхности GaAs имплантацией ионов Al^+ ; изучение электронной структуры (параметры энергетических зон и плотность состояния валентных электронов) наноразмерных структур, созданных на поверхности CoSi₂ и GaAs ионной бомбардировкой. Проводимые в этих направлениях научные исследования указывают на актуальность темы данной диссертации.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Постановлении Президента Республики Узбекистан ПП-1442 «О приоритетных направлениях развития индустрии Республики Узбекистан на 2011-2015 гг.» от 15 декабря 2015 года

Академии наук, организаций, управления и финансирования научно исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере. **Связь исследований с приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике** Диссертация выполнена в рамках приоритетных направлений развития науки и технологий Республики Узбекистан III. «Энергетика, энергоресурс сбережение, транспорт, машино- и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. На сегодня внимание ученых и разработчиков направлены изучению свойств микро-, опто- и нанoeлектронных приборов. Английские ученые Р.Дингл, В. Вигман и С.Х. Генри показали, что пленки CoSi_2 полученные МЛЭ на поверхности Si (100) до толщин $10\div 15$ нм имеют островковый характер, проявление эффекта размерного квантования в виде характерной ступенчатой структуры оптических спектров поглощения полупроводниковой гетероструктуры GaAs–AlGaAs со сверхтонким слоем GaAs (квантовой ямой) впервые наблюдали ученые Р.Дингл, В.Вигманн и С.Х. Генри. Академиком Ж.И. Альферовом показано, что гетероструктуры, в особенности двойные, включая квантовые ямы, проволоки (quantum wire) и точки (quantum dots), позволяют управлять такими фундаментальными параметрами полупроводниковых кристаллов как ширина запрещенной зоны, эффективные массы и подвижности носителей заряда, электронный энергетический спектр.

Професором Б.Е. Умирзаковым и его учениками методом низкоэнергетической ионной имплантации получены сверхтонкие ($\theta = 5 - 10$ нм) пленки силицидов металлов на поверхности Si и пленки $\text{Ga}_{1-x}\text{Ba}_x\text{As}$ на поверхности GaAs. Исследованы элементный и химический составы, кристаллическая и электронная структура, геометрические размеры отдельной кластерной фазы и нанопленок, а также динамика их изменения при отжиге.

Однако, практически не проводились исследования возможности создания ионной бомбардировкой: - однокомпонентных наноразмерных фаз и пленок на поверхности двухкомпонентных МЛЭ-пленок; - многослойных наносистем типа $\text{Si}/\text{CoSi}_2/\text{Si}$, и $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/\text{GaAs}/\text{Ge}$, а также влияние внешних воздействий на состав, структуру и свойства полученных гетероэпитаксиальных структур.

Связь диссертационного исследования с планами научно исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертационная работа. Работа выполнена в Ташкентском государственном техническом университете в рамках Государственной программы научно-исследовательских работ № 14-002 «Разработка технологии получения наноматериалов с регулируемой шириной запрещенной зоны для приборов микро- и оптоэлектроники на основе

полупроводниковых пленок» (2009–2011); № 14-007 «Разработка и выбор дешевой технологии получения наноструктур на основе элементарных и бинарных полупроводников» (2009–2011); № К-4-001 «Разработка технологии получения многослойных наноразмерных МДП и ПДП гетероструктур на основе кремния» (2012–2014); № Ф2-41 «Теоретические и экспериментальные исследования процессов распыления, внедрения атомов, образования наноразмерных структур и напряженных слоев при имплантации ионов в материалы различной природы (металлы, полупроводники и диэлектрики)» (2012–2016); а также проекта № ЁФ-2-12 «Влияние образования наноразмерных структур на эмиссионные свойства и рабочие характеристики W, Pd и PdBa» (2016–2017).

Целью исследования является комплексное изучение механизмов модификации и особенностей образования наноразмерных структур в поверхностных слоях PdBa, CoSi₂ и GaAs при низкоэнергетической ионной бомбардировке с последующей термической и лазерной обработкой.

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

изучить процессы формирования наноразмерных структур Pd-Ba и Pd Ba-O на поверхности сплавов Pd-Ba при активировке различными способами (ионная бомбардировка, температурная активировка в высоком вакууме и в атмосфере различных газов, лазерная обработка);

изучить изменения состава, морфологии поверхности и эмиссионных свойств Pd и Pd-Ba при бомбардировке ионами Ba с вариацией энергии и дозы облучения. Разработка методики однородной имплантации ионов Ba в поверхностные слои магнетронных катодов цилиндрической формы;

изучить процессы формирования (элементный и химический состав, морфология, электронная и кристаллическая структура) наноразмерных структур на поверхности CoSi₂/Si при бомбардировке ионами Ar⁺ и O₂⁺ с энергиями ($E_0 = 0,5 - 5$ кэВ) и дозами облучения ($D = 5 \cdot 10^{13} - 10^{17}$ см⁻²), разработать модель поверхности CoSi₂/Si с нанокристаллами Si;

выявить основные механизмы формирования однокомпонентных наноразмерных структур на поверхности бинарных материалов различной природы (металлосплавов и полупроводников) и различной химической связи (интерметаллической, ковалентной и ионной) при бомбардировке ионами Ar⁺;

изучить электронную и кристаллическую структуру наноразмерных фаз, созданных на поверхности GaAs имплантацией ионов Al⁺. Определить оптимальные режимы ионной имплантации и отжига для получения нанокристаллов и нанопленок типа Ga_{1-x}Al_xAs;

изучить электронную структуру (параметры энергетических зон и плотность состояния валентных электронов) наноразмерных структур, созданные на поверхности CoSi₂ и GaAs ионной бомбардировкой;

определить оптимальные условия ионной бомбардировки и отжига для получения многослойных гетероструктур и разработать научно обоснованные рекомендации по применению экспериментальных

24

результатов при создании различных приборов и устройств электронной техники.

Объектами исследования являются поликристаллические пленки сплавов PdBa, (Ba – 1,5 ч 4 ат. %); монокристаллические МЛЭ пленки CoSi₂/Si и GaAs/Ge.

Предметом исследования являются процессы формирования одно- и многокомпонентных наноструктур на поверхности поликристаллических образцов Pd, Pd-Ba и монокристаллических пленок CoSi₂, GaAs.

Методы исследований. Ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия (УФЭС), дифракция быстрых электронов (ДБЭ), оже электронная спектроскопия (ОЭС), растровая электронная микроскопия (РЭМ), спектроскопия упруго отраженных электронов (СУОЭ), спектроскопия характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ), атомно-силовая микроскопия (АСМ).

Научная новизна исследования заключается в следующем: предложена структурная модель поверхности Pd-Ba, активированного в высоком вакууме и в атмосфере кислорода и разработана методика равномерной активировки поверхности сплавов Pd-Ba цилиндрической формы методами лазерной абляции и имплантации ионов Ba⁺; показано, что форма и размеры нанокристаллических фаз образующихся на поверхности Pd и Pd-Ba при дозах облучения $D \leq 10^{15} \text{ см}^{-2}$ в основном зависит от микрорельефа поверхности, а при высоких дозах $D \geq 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ не зависит; наиболее вероятным механизмом образования участков с кристаллической структурой под действием имплантации больших доз ионов является разогрев мишени в области теплового пика, приводящий к расплавлению материала;

методом ионной бомбардировки (Ar⁺ и O⁺) в сочетании с отжигом получены однородные регулярно расположенные наноразмерные фазы и эпитаксиальные нанопленки Si и CoSiO на поверхности CoSi₂/Si (111), а также определены зависимости размеров нанокристаллических фаз от энергии и дозы ионов;

разработаны механизмы формирования однокомпонентных наноразмерных структур на поверхности материалов различной природы (металлосплав Pd₂Ba, полупроводники CoSi₂ и GaAs) и типа химической связи (интерметаллический, ковалентный и ионно-ковалентный) при бомбардировке ионами Ar⁺;

определены оптимальные условия ионной бомбардировки и последующего отжига получения многослойных структур Si-CoSi₂-Si, CoSiO CoSi₂-Si, Ga-GaAs-Ge, GaAlAs-GaAs и построены их энергетические

зонные диаграммы.

Практические результаты исследования заключается в следующем: ионно- и лазерно-стимулированная активировка Pd-Ba позволяет исключить из катодного узла магнетронов систему высокотемпературного отжига, что обеспечивает их стабильную высокоэффективную работу и увеличивает время эксплуатации на 100 и более часов;

25

определенные оптимальные условия (ионная бомбардировка, отжиг) получения наноструктур типа $Ga_{1-x}Al_xAs$ с регулируемой шириной запрещенной зоны, наноэпитаксиальных гетероструктур типа $Si/CoSi_2/Si$ могут быть использованы при разработке транзисторов с металлической базой.

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 современным теоретическим представлением и данными физики полупроводников и тонких пленок.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования определяется тем, что разработаны научно-практические основы создания тонкопленочных систем с заданными физическими характеристиками.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что разработанные многослойные гетероструктурные пленки типа МДП, ПМП, необходимых для приборов микро- и СВЧ-электроники можно использовать при разработке и производстве нового типа пленок многолойных гетероструктур.

Внедрение результатов исследования. На основе результатов изучения электронной спектроскопии и микроскопии поверхности бинарных материалов, имплантированных ионами низких энергий:

получен патент на изобретение Агентства по Интеллектуальной собственности Республики Узбекистан “Способ получения трехкомпонентных наноструктур на основе арсенида галлия” (№ IAP 05370, 28.04.2017, Бюл. №4). Разработанный способ позволяет проводить имплантацию ионов Al в нанокристаллы GaAs и в последующем отжиге получить нанопленки $Ga_{1-x}Al_xAs$ и за счет регулирования значения x в пределах 0.1-0.5 управлять шириной запрещенной зоны трехкомпонентной структуры от 1.4 – 1.9 эВ;

полученные результаты по регулируемому изменению электронных, эмиссионных и оптических свойств использованы в научных проектах Ф2-ФА-Ф161 «Механизмы формирования свободных тонких пленок (Al, Cu, Ag и Me-Si) и наноразмерных гетероструктур, созданных на поверхности кристаллов (W, WO_n , TiN, CdTe, SiO_2) методом ионной имплантации и изучение их физико-химических свойств» и Ф-2-31 «Исследование

структуры и физических свойств наноразмерных пленок силицидов металлов и разработка термочувствительных структур» (Справка ФТК-0313/146 Комитета по координации развития науки и технологий Республики Узбекистан от 2017 года 9 февраля). Созданные технологические разработки позволили создать необходимые для микро- и наноэлектронных приборов наноконтакты и нового типа многослойные гетероструктурные пленки металл-диэлектрик-полупроводник.

26

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования были представлены и обсуждены на 14 международных и 3 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследований. По материалам диссертации опубликованы 29 научных трудов, из них 1 монография, 1 патент, 10 статей, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, в том числе, 5 статей в зарубежных международных реферируемых журналах и 17 работ в сборниках трудов научных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Текст диссертации изложен на 120 страницах, включая 47 рисунков и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике, приведены обзор международных научных исследований по теме диссертации, степень изученности проблемы, сформулированы цели и задачи, выявлены 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 **«Краткий анализ литературных данных по**

модификации свойств и созданию наноразмерных структур на поверхности материалов методом ионной бомбардировки» приводится обзор литературных данных, посвященных изучению основных закономерностей и эмиссионных свойств металло-сплавов при активировке, формирования силицидов металлов, трехкомпонентных пленок на поверхности GaAs, особенности кристаллической и электронной структуры и их влияния на электрофизические и оптические свойства материалов.

Основным выводами для постановки исследований и проведения настоящей работы являются: процессы образования наноразмерных структур на поверхности бинарных материалов при бомбардировке ионами инертных газов, их фазовые состояния, структура и свойства изучены недостаточно; наноразмерные многослойные системы типа $\text{Si} - \text{CoSi}_2 - \text{Si}$, $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As} - \text{GaAs}$, созданные с использованием метода низкоэнергетической ионной бомбардировки, до начала настоящей работы практический не изучены.

Исходя из проведенного анализа, сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава **«Техника и методика эксперимента»** посвящена описанию созданных и использованных экспериментальных установок, методики обработки и исследований поверхности твердых тел. В работе использованы две высоковакуумные технологические установки. В первой установке, которая являлась стандартной (типа LAS-2200) производилось осаждение пленок металлов на поверхность кремния, термическая обработка, а также исследование кристаллической структуры пленок методом ДБЭ, измерение толщины пленок. Во второй экспериментальной установке проводилось исследование физико-химических свойств пленок с использованием комплекса методов ВЭС и ФЭС. Для получения информации о микрорельефе поверхности и более точного определения параметров кристаллической решетки использованы стандартные установки: растровый электронный микроскоп "Самес", электронограф ЭМР-102, атомно-силовая микроскопия ХИА-200.

Третья глава **«Формирование наноразмерных структур в поверхностной области сплавов Pd-Ba при термической активировке и ионной бомбардировке»** посвящена исследованию изменения топографии,

28

состава и электронных свойств поверхности Pd-Ba (Ba-1,5%) при активировке прогревом и бомбардировкой ионами Ba^+ и Ag^+ . Показано, что при активировке Pd-Ba в атмосфере $\langle \text{H}_2 \rangle$ при $T = 800 \text{ K}$ достигается такое состояние поверхности и приповерхностной области Pd-Ba, которая в высоком вакууме устанавливается лишь после прогрева при $T = 1100 \text{ K}$.

При имплантации ионов Ba^+ с $E_0 = 1 \text{ кэВ}$ при дозе $D = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ значение σ_m увеличивается до $4,5 \div 5$, а значение $e\phi$ составляет $\sim 2,2 \text{ эВ}$, что существенно не отличается от $e\phi$, полученного при активировке в водородной среде. В этом случае резкое увеличение σ_m объясняется как распылением

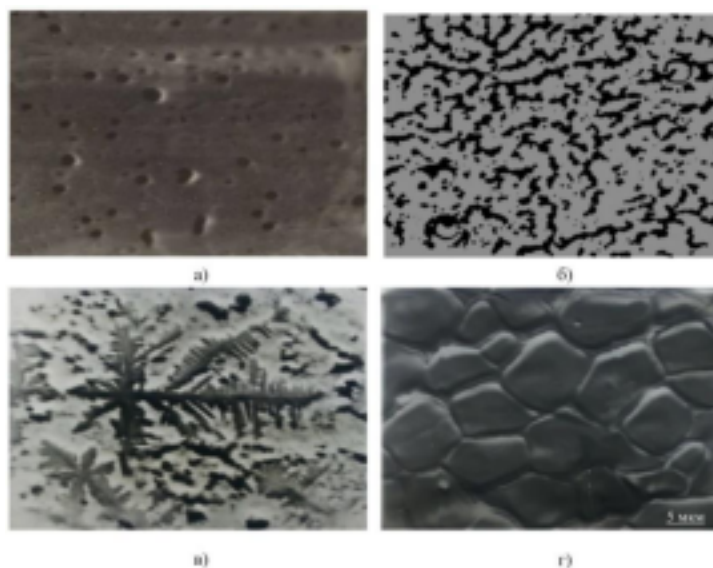
атомов С и S с поверхности, так и образованием в приповерхностной области химической связи между атомами Pd и Ba.

Выдержка образцов в процессе активировки в атмосфере кислорода с парциальным давлением 10^{-4} Торр в течение $1 \div 3$ мин приводила к заметному уменьшению $e\phi$ и увеличению σ_m . Опираясь на данные ОЭС можно предполагать, что на начальном этапе напуска ($t \approx 1$ мин) на поверхности каждый атом кислорода располагается между четырьмя атомами Ba и при этом образуются соединения типа Ba_2O , а при увеличении времени напуска до 3 мин атомы кислорода располагаются между атомами Ba и образуются соединения типа BaO.

На рис. 1 приведены РЭМ – изображения поверхности Pd и Pd-Ba, имплантированных ионами Ba^+ с $E_0 = 0,5$ кэВ разными дозами: при дозе $D \approx 6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ на поверхности Pd появляются отдельные кластерные фазы с диаметром $0,2 \div 0,5$ мкм, а при $D = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ – образовались кластерные фазы различной формы и размеров. В случае имплантации ионов Ba^+ с такой же энергией и дозой в Pd-Ba, наряду с кластерными фазами образовались разветвленные линии с шириной $2 \div 3$ мкм, обогащенные атомами бария. По видимому, в случае Pd-Ba наличие следов механической обработки приводит к перераспределению примесей в процессе ионной бомбардировки. При увеличении дозы до $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ как в случае Pd-Ba, так и Pd появляются крупнозернистые участки с четкими гранями и размерами $5 \div 10$ мкм, характерные для кристаллических пленок. Поверхность зерен волнистая, что говорит о достаточно больших внутренних напряжениях. Анализ спектров ОЭС позволяет предположить, что этим участкам соответствуют скопления атомов, включающие соединения типа Pd_2Ba и $PdBa$. Образование этих соединений приводит к возрастанию количества внутренних вторичных электронов за счет появления интенсивного максимума плотности состояния вблизи E_v в валентной зоне. Этим и объясняется заметный рост σ_m (до 5) в случае ионно-легированного Pd-Ba, относительно активированного сплава Pd-Ba при одинаковых значениях $e\phi$ поверхности.

При бомбардировке нанопленок Pd_2Ba ионами Ar^+ с $E_0 = 1 \div 3$ кэВ, начиная с $D = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, происходит ее разложение на составляющие и обогащение поверхности атомами Ba. При $D = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ толщина пленки Ba составляет $2 \div 3$ монослоя. Дальнейшее увеличение D приводит к интенсивному испарению Ba с поверхности. При электронной

бомбардировке испарение Ba наблюдалось начиная с $j_e = 5 \div 6 \text{ mA} \cdot \text{см}^{-2}$. Эти пленки выдерживали температурные нагрузки до $T = 700 \div 800 \text{ K}$ в течении 100 и более часа.



а) $6 \cdot 10^{14}$; б, в) $5 \cdot 10^{15}$; г) $6 \cdot 10^{16}$

Рис. 1. РЭМ-изображения поверхности Pd (а, б) и Pd-Ba (в, г), имплантированных ионами Ba^+ с $E = 1$ кэВ и разными дозами D , см^{-2}

Выявлены основные механизмы отказа стандартных катодов Pd-Ba в процессе их длительной ($t \geq 500$ час) эксплуатации. Показано, что на поверхности этих катодов появляются отдельные дефектные участки в виде пузырьков с размерами $15 \div 20$ нм. Также на этих участках обнаружено увеличение концентрации атомов C и S до 15 ат.% и появление атомов подложки (Mo).

В четвертой главе «Морфология, состав, электронная и кристаллическая структура поверхности одно- и трехкомпонентных наноразмерных структур созданные на поверхности бинарных материалов» приводятся результаты экспериментальных исследований по влиянию бомбардировки: ионов Ar^+ и O_2 на состав и структуру нанопленок CoSi_2/Si ; а также ионов Al^+ и Ar^+ на состав и структуру GaAs. Были определены зонно-энергетические, эмиссионные и электрофизические параметры МЛЭ нанопленок CoSi_2/Si (111) разной толщины. Показано, что до $h = 10 \div 15$ нм пленки CoSi_2 имеют островковый характер; глубины зоны выхода ИВЭ кремния и силицида мало отличаются друг от друга и лежат в пределах $80\text{--}100 \text{ \AA}$, однако значение ρ – резко отличается.

Изменения электронных состояний поверхности CoSi_2/Si (111) при бомбардировке ионами Ar^+ хорошо отражались на форме спектров ХПЭЭ (рис. 2). В спектре чистого CoSi_2 обнаруживаются пики ХПЭЭ при энергиях 6; 9; 13.8 и 17 эВ. Наличие пиков с энергиями $E = 9$; 13.8; и 17 эВ объясняется возбуждением поверхностного $\hbar\omega_s$, объемного $\hbar\omega_v$ и двухкратного поверхностного $2\hbar\omega_s$ плазменных колебаний валентных электронов,

соответственно. Валентная зона CoSi_2 сформирована из 3s и 3p орбиталей Si и 3d орбиталей Co. Поэтому наличие пиков с энергией 3 и 6 эВ можно объяснить возбуждением электронов из максимумов плотности состояний валентных электронов. При $D = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ на спектре устанавливаются практически все пики ХПЭЭ, характерные для Si, в частности пики с $E = 11$, 18 и 23 эВ, обусловленные возбуждением коллективных колебаний

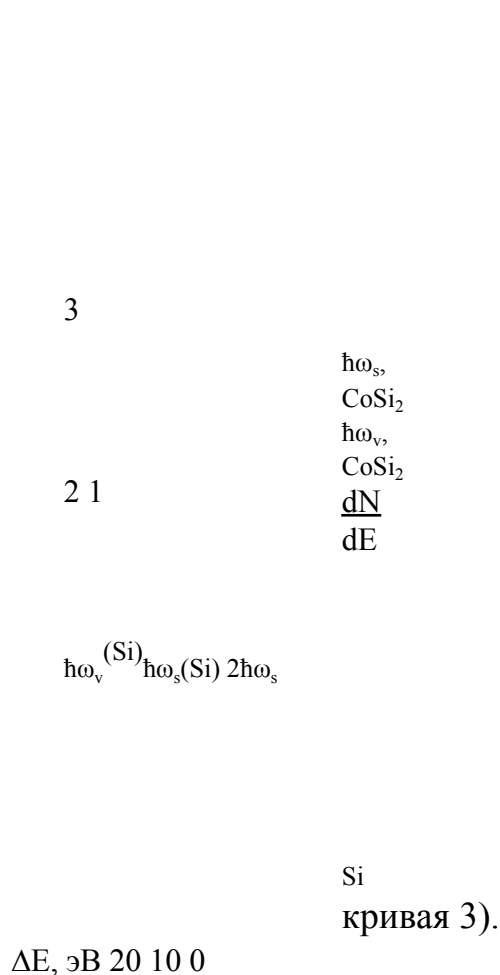
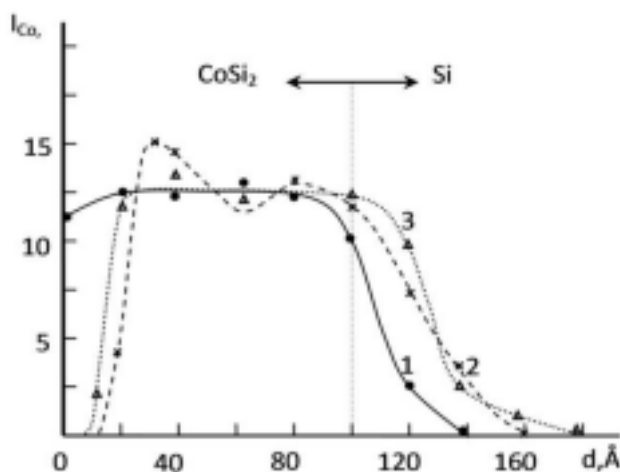


Рис. 2. Спектры ХПЭЭ, полученные при $E_p = 100$ эВ для пленки CoSi_2/Si (111), бомбардированной ионами Ar^+ с $E_0 = 1$ кэВ, и разными дозами D , см^{-2}

образуется тонкий переходной слой обогащенный кобальтом, а часть атомов Co диффундирует к границе CoSi_2/Si и переходит в область матрицы Si (111). Все эти процессы сопровождаются сильным разупорядочением приповерхностных слоев системы (рис. 4, б). Постимплантационный отжиг в течение 30 мин начиная с $T \approx 550 \div 600$ К приводил к изменению концентрации атомов Co на границах раздела, образованию соединений диффундирующих атомов Co с атомами Si и появлению упорядоченных структур. При $T = 850$ К происходит полная кристаллизация аморфизированной области системы (рис. 4, в) и образуется

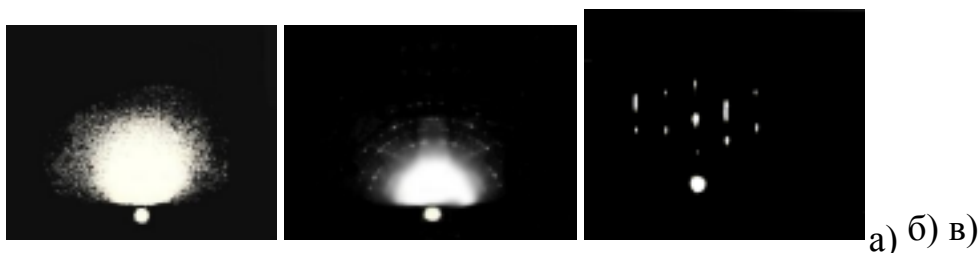
валентных электронов (рис. 2, Можно полагать, концентрация что при атомов Co в больших дозах поверхностных ионов ($D \geq 10^{16} \text{ см}^{-2}$) вся уменьшается до бомбардированной нулю, а на ая поверхность границах однородно Si-CoSi_2 и покрывается $\text{CoSi}_2\text{-Si}$ она атомами Si. резко Это должно увеличивается приводить к (рис. 3). По перераспределен видимому, после ию атомов Co в разложения приповерхностных атомы Si ой области диффундируют к системы CoSi_2/Si . После ионной бомбардировки поверхности, оставляя вакансии и несвязанные атомы Co. Толщина поверхностного слоя кремния составляет $15 \div 20$ Å. Большая часть атомов Co перераспределяется заполняя эти вакансии, и на границе Si/CoSi_2



- 1) до ионной бомбардировки;
 2) после бомбардировки ионами Ar⁺ с $E_0 = 1$ кэВ при $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$; 3) после прогрева при $T = 900$ К в течение $t = 30$ мин

Рис. 3. Профили распределения атомов Co по глубине пленки CoSi₂/Si

Увеличивая энергию ионов Ar⁺ до 3 ÷ 4 кэВ получена пленка Si толщиной 25-30 Å. Дальнейший рост энергии ионов приводил к увеличению распыления поверхности и диффузии Co не только вглубь мишени, но и к поверхности. В случае бомбардировки CoSi₂ ионами O₂⁺ с высокой дозой ($D = D_{\text{нас}} = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) в приповерхностной области образовались соединения типа Co – Si, Co – O, Si – O, Co – Si – O, а также несвязанные атомы Co, Si и O. Только после прогрева при $T \approx 900$ К формировалась трехкомпонентная поликристаллическая пленка типа CoSiO, состоящая из отдельных блоков с размерами 20–50 нм. Между блоками имеются нанопоры с диаметром 10–20 нм и глубиной 4–5 нм.



- а) чистая поверхность; б) после бомбардировки ионами Ar⁺ с $E_0 = 1$ кэВ при $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$; в) после прогрева при $T = 900$ К ионно-облученной пленки

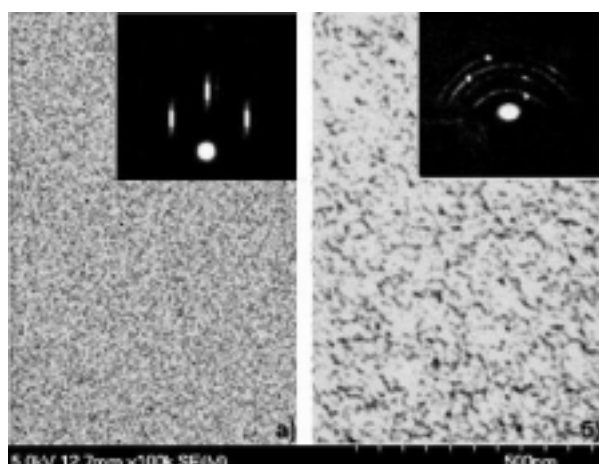
Рис. 4. Электронограммы поверхности CoSi₂/Si (111)

На рис. 5 приведена низкоэнергетическая часть зависимости $R(E_p)$ и $\delta(E_p)$ для пленки $\text{CoSiO}/\text{CoSi}_2$ (111). Начальное резкое уменьшение R обусловлено переходом электронов с потолка валентной зоны E_V на зоны проводимости E_C , т.е. $E_{pR} = E_V - E_C = E_g = 2,4$ эВ. Значение $E_{p\delta}$ соответствует переходу электронов из E_V в E_B (т.е. в вакуум): $E_{p\delta} = \Phi = E_V = 5,9$ эВ. При этом наблюдается резкий начальный рост δ . Значение сродства к электрону $\chi = E_{p\delta} - E_{pR} = 3,5$ эВ. Особенность, наблюдаемая при $E_p = E_n$, может быть

32

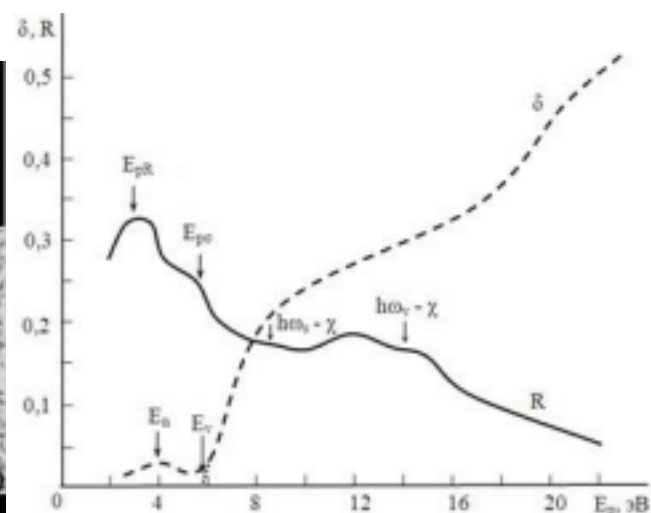
обусловлена возбуждением электронов из примесных уровней. При энергиях $E_p = 8,5$ и $13,6$ эВ обнаруживаются пологие участки, что объясняется резонансным упругим рассеянием медленных электронов на плазмонах. Действительно, с учетом сродства к электрону эти энергии соответствуют возбуждению плазменных колебаний валентных электронов в пленке CoSiO : $\hbar\omega_s = 12$ эВ и $\hbar\omega_v = 17$ эВ.

Изучены структура и электронные свойства нанокристаллов и нанопленок $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$, созданных в поверхностной области GaAs имплантацией ионов Al^+ в сочетании с отжигом (лазерный + температурный). При $E_0 = 1$ кэВ и $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ после отжига при $T \approx 900$ К получены эпитаксиальные пленки $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$ с относительно гладкой поверхностью (рис. 6).



а) коэффициент истинно-вторичных электронов; R) коэффициент упруго отраженных электронов

Рис. 5. Зависимости $R(E_p)$ и $\delta(E_p)$ для пленки $\text{CoSiO}/\text{CoSi}_2$ (111) с толщиной 35–40 Å



а) $\text{GaAs}(111)$, б) $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$ полученный прогревом GaAs , имплантацией ионов Al^+ с $E_0 = 1$ кэВ при $D = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$

Рис. 6. РЭМ и ДБЭ – изображения поверхности

Толщина пленки $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$ составляет $\sim 35\text{--}40 \text{ Å}$, а толщина

переходного слоя, где концентрация Al монотонно уменьшается от 25 ат.% до 0, составляет 50–60 Å.

На рис. 7 приведены фотоэлектронные спектры чистого GaAs, и GaAs с нанопленкой и с нанокристаллами $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$. Образование нанопленки трехкомпонентного соединения приводило к следующим изменениям:

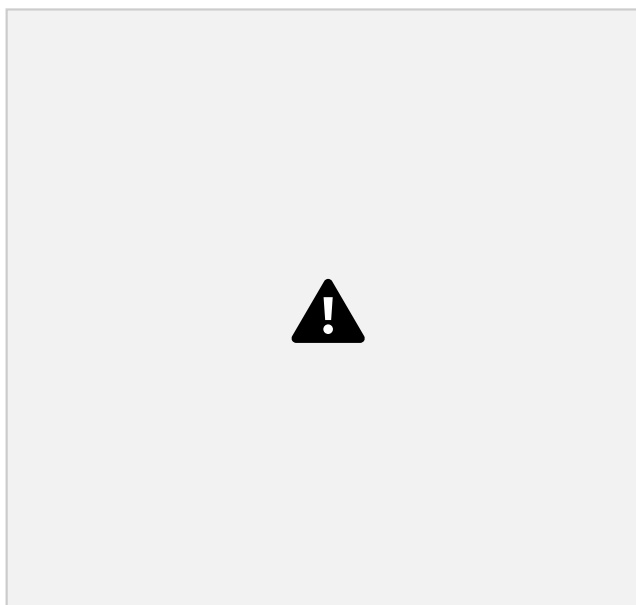
ширина спектра уменьшается на 0,3–0,4 эВ, т.е. положение E_V относительно E_B увеличивается на 0,3–0,4 эВ;

положение пика E_1 смещается в сторону больших энергий и его ширина существенно ($\sim 1,5$ раза) увеличивается, в формировании этого пика участвуют 4p-электроны Ga и 3p-электроны Al;

положение пика E_2 , обусловленного расщеплением p-состояний Ga, Al и As, смещается на $0,1 \div 0,2$ эВ и увеличивается его интенсивность;

33

положения пиков мышьяка E_3 и E_4 практически не изменяются, происходит некоторое изменение их интенсивностей.



- 1) пленки чистого GaAs/Ge (111);
- 2) нанопленки $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}/\text{GaAs}$ с $\theta = 40\text{Å}$;
- 3) – пленки GaAs с нанокристаллами $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$ с $d = 15\text{--}20$ нм, $h\nu = 10,8$ эВ

Рис. 7. Фотоэлектронные спектры

Электронно-зонные параметры нанопленок и нанокристаллов $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$ зависят от их толщины (Таблица 1). Значение E_g для нанопленок $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$ с $\theta \geq 35\text{--}40$ Å составляет $\sim 2,1$ эВ, что очень близко к E_g для массивных пленок. При $\theta = 20\text{--}25$ Å значение E_g увеличивается до 2,3 эВ. Можно полагать, что размерные эффекты для этих пленок начинают проявляться с $\theta = 20\text{--}25$ Å. Более существенное проявление квантовых эффектов наблюдается в нанокристаллических фазах $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$, при этом значение E_g увеличивается до 2,9 эВ.

Таблица 1.

Оценочные значения E_V , E_g , χ для GaAs (111) и $Ga_{0,5}Al_{0,5}As$

Исследуемый объект	Толщина θ , Å	E_V , эВ	E_g , эВ	χ , эВ
n – тип GaAs (111) пленка	500	5,1	1,4	3,7
$Ga_{0,5}Al_{0,5}As$ нанопленка	20 – 25	5,4	2,3	3,1
	35 – 40	5,3	2,1	3,2
	50 – 60	5,3	2,1	3,2
$Ga_{0,5}Al_{0,5}As$ нанокристаллы $d = 15 – 20$ нм	35 – 40	5,6	2,9	2,7

Даны теоретические оценки и анализ экспериментальных результатов формирования наноразмерных структур в бинарных соединениях при ионной

34

бомбардировке. Известно, что при ионной бомбардировке бинарных материалов атомы А и В кристалла выбиваются из узлов решетки и образуются междоузельные атомы и вакансии. Последние мигрируют по кристаллу, рекомбинируют или захватываются стоками (дислокациями или поверхностью кристалла).

При ионном облучении создаются вакансии и междоузельные атомы. Одновременно происходит частичная их рекомбинация. При этом атом сорта А рекомбинирует как с вакансиями атома А, что приводит к уничтожению дефектов, так и с вакансиями атома В, что приводит к возникновению антиструктурного дефекта A_b .

Анализ полученных экспериментальных результатов показывает, что независимо от типа подложки и ионов низкоэнергетическая ($E_0 = 0,5 – 5$ кэВ) ионная бомбардировка бинарных соединений приводит: к разрыву связи между атомами и разложению их отдельных компонентов. Вследствие преимущественной диффузии (к поверхности или объему) и десорбции один из компонентов поверхности материала обогащается атомами другого компонента. При низких дозах ($D \leq 5 \cdot 10^{14}$ см⁻²) появляются отдельные точечные участки (кластерные фазы) на поверхности подложек с диаметром 2–5 нм, причем с ростом дозы поверхностные размеры фаз увеличились и при $D \approx (5–10) \cdot 10^{14}$ см⁻² составляли 20–30 нм. При высоких дозах ($D > 4 \cdot 10^{16}$ см⁻²) происходит перекрывание границ отдельных кластерных фаз, и образуется сплошная пленка. Относительные изменения состава и свойств

поверхности при бомбардировке в одинаковых условиях зависят от материала подложки (типа и энергии связи между атомами, от соотношения масс атомов бинарного соединения).

Изучены возможные механизмы изменения состояния поверхности исследуемых материалов. Показано, что диаметр атомов бария в сплаве Pd_2Ba больше, чем расстояние между атомами Pd-Ba , поэтому диффузия Ba в процессе ионной бомбардировки, в основном, направлена к поверхности, однако при этом не происходит заметное испарение их с поверхности следовательно, поверхность обогащается атомами Ba. Энергия связи Ba – Ba немного ниже, чем энергия связи Pd-Ba . С ростом толщины пленки энергия связи Ba – Ba уменьшается. Поэтому толщина пленки Ba не может быть больше, чем 2–3 монослоя (при $E_0 = 0,5 \div 1$ кэВ) и одного монослоя ($E_0 = 3 \div 5$ кэВ).

Бомбардировка GaAs ионами Ar^+ приводит: при низких дозах ($D \leq 10^{15} \text{ см}^{-2}$) к формированию участков обогащенных атомами As, а при высоких дозах ($D \geq 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) – островков или нанопленок, обогащенных атомами Ga. Однако, в обоих случаях, вследствие малого различия масс Ga и As не имело место полное испарение одного из компонентов.

В конце главы даны рекомендации по применению полученных результатов для создания перспективных приборов микро-, нано- и оптоэлектроники: структура $\text{Si/CoSi}_2/\text{Si}$ может использоваться при разработке быстродействующих транзисторов с проникаемой базой и транзисторов с металлической базой; гетероструктуры типа GaAlAs/GaAs –

35

для создания квантовых диодов и транзисторов; структуры Ba-PdBa – в приборах СВЧ-электроники.

На основе комплексного изучения механизмов модификации и особенностей образования наноразмерных структур в поверхностных слоях PdBa, CoSi₂ и GaAs при низкоэнергетической ионной бомбардировке с последующей термической и лазерной обработкой сделаны следующие выводы:

1. Установлено, что имплантация ионов Ba⁺ с $E_0 = 0,5 \div 5$ кэВ при $D = 10^{15}$ см⁻² в Pd и Pd–Ba в зависимости от микрорельефа поверхности образцов приводит к формированию нанокластерных фаз различной формы и размеров, в частности, в случае Pd–Ba наличие следов механической обработки приводит к образованию разветвленных линий с шириной 2–3 мкм, обогащенных атомами Ba. При $D = D_{\text{нас.}} = 6 \cdot 10^{16}$ см⁻² поверхность Pd–Ba и Pd состоит из крупнозернистых блоков соединений типа PdBa и Pd₂Ba с четкими гранями и размерами 5–10 мкм, характерные для кристаллических пленок.

2. Показано, что при лазерной активировке можно достигнуть наибольшей степени чистоты поверхности, следовательно, максимального увеличения коэффициента вторичных электронов Pd–Ba без напуска водорода, разработана модель расположения атомов Ba, O и Pd на поверхности и по профилю Pd–Ba, активированного в высоком вакууме и в атмосфере кислорода.

3. Выявлены основные механизмы отказа стандартных катодов Pd–Ba в процессе их длительной ($t \geq 500$ час) эксплуатации и появление на поверхности этих катодов отдельных дефектных участков в виде пузырьков с размерами 15–20 нм и обнаружено увеличение концентрации атомов C и S до 10–15 ат.% и появление атомов подложки (Mo).

4. Определены значения E_g , λ , σ_m и ρ нанопленок CoSi₂/Si (111) разной толщины ($\theta = 10 - 100$ нм), в которых глубина зоны выхода истинно вторичных электронов λ пленок CoSi₂ составляет $\sim 80-100$ Å и определены оптимальные режимы ионной бомбардировки и последующего отжига для формирования нанопленочной системы Si – CoSi₂ – Si.

5. Выявлены основные механизмы формирования однокомпонентных наноразмерных структур на поверхности пленок различной природы и типа химической связи (металлосплав Pd₂Ba, полупроводники CoSi₂, GaAs) при бомбардировке их ионами Ag⁺.

6. Получены наноструктуры трехкомпонентных соединений Ga_{1-x}Al_xAs с толщиной $\theta = 20 - 70$ Å в поверхностной области GaAs имплантацией ионов Al⁺ с энергиями от 0,5 до 5 кэВ в сочетании с отжигом. При низких дозах облучения ($D \leq 10^{15}$ см⁻²) формировались нанокристаллические фазы, а при больших дозах ($D \geq 2 \cdot 10^{16}$ см⁻²) – нанопленки типа Ga_{0,5}Al_{0,5}As. Изменяя температуру постимплантационного отжига в интервале 850–1000 К значение x можно регулировать в пределах от 0,5 до 0,2. При этом ширина запрещенной зоны трехкомпонентной пленки уменьшается от 2,4 эВ до 1,6

эВ. Показано, что ширина запрещенной зоны E_g нанокристаллической фазы $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$ с поверхностными размерами 25–30 нм составляет 2,8–2,9 эВ, а для нанопленки с толщиной 20–25 нм $\sim 2,3$ эВ.

7. Проведена оценка ширины запрещенной зоны и плотности состояния валентных электронов одно- и трехкомпонентных наноразмерных структур, созданных на поверхности полупроводников ионной бомбардировкой, в частности, в результате уменьшения поверхностных размеров нанокристаллов с $\sim 50 - 60$ нм до ~ 10 нм ширина запрещенной зоны Si увеличивается от 1,2 до 1,5 эВ, CoSiO – от 2,4 до 2,8 эВ, $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$ – от 2,4 до 2,9 эВ.

8. Оптимальные условия получения наноструктур $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ с управляемой шириной запрещенной зоны представляют интерес для создания наноэпитаксиальной структуры $\text{Si}/\text{CoSi}_2/\text{Si}$ для СВЧ транзисторов с проницаемой и металлической базой.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES
DSC.27.06.2017.FM/T.34.01 PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE,
INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES,
SAMARKAND STATE UNIVERSITY
TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

DONAEV SARDOR BURKHANOVICH

**ELECTRONIC SPECTROSCOPY AND MICROSCOPY OF THE
SURFACE OF BINARY MATERIALS (Pd–Ba, CoSi₂ AND GaAs)
IMPLANTED WITH LOW-ENERGY IONS**

01.04.04- Physical electronics

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

TASHKENT-2017

39

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 the Republic of Uzbekistan under number B2017.1.PhD/FM22.

Dissertation has been prepared at Tashkent state technical university.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (uzbek, russian, english (resume)) on the website (fti-kengash.uz) and the “Ziyonet” Information and educational portal (www.ziyonet.uz).

Scientific supervisor: Umirzakov Baltokhodja Ermatovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Official opponents: Ashurov Hotam Bakhronovich

Doctor of Technical Sciences

Rasulov Akbarali Mahamadiyevich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Leading organization: National University of Uzbekistan

Defense will take place «____» _____ 2017 at _____ at the meeting of Scientific Council number DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 Physical-technical institute, institute of ion-plasma and laser technologies, Samarkand state university. (Address: 100084, Uzbekistan, Tashkent, 2B Bodomzor yuli street. Phone/fax: (+99871) 235-42-91, e-mail: lutp@uzsci.net).

Dissertation is possible to review in Information-resource centre at Physical-technical institute (is registered №____) (Address: 100084, Uzbekistan, Tashkent, 2B Bodomzor yuli street. Phone/fax: (+99871) 235-42-91, e-mail: lutp@uzsci.net).

Abstract of dissertation sent out on «____» _____ 2017 year
(Mailing report № _____ on «____» _____ 2017 year)

S.L. Lutpullayev

Chairman of scientific council
on award of scientific degrees,
D.F.-M.S., professor

A.V. Karimov

Scientific secretary of scientific council
on award of scientific degrees,
D.F.-M.S., professor

S.A. Bakhramov

Chairman of scientific Seminar under Scientific
Council on award of scientific degrees,
D.F.-M.S., professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis).

The aim of the research work. Comprehensive study modification

mechanisms and features forming nano-dimensional structures in the surface layers PdBa, CoSi₂ and GaAs at low energy ion bombardment, followed by heat and laser treatment.

The object of the research work. Polycrystalline films of PdBa alloys, (Ba - 1.5 h 4 at.%); - single crystal MBE films CoSi₂/Si and GaAs/Ge. **Scientific novelty of the research work.** A structural model of the surface of Pd-Ba activated in high vacuum and in an oxygen atmosphere was proposed and a technique for uniformly activating the surface of Pd-Ba alloys of a cylindrical shape by laser ablation and implantation of Ba⁺ ions was developed; It was shown that the shape and size of the nanocrystalline phases formed on the surface of Pd and Pd-Ba at irradiation densities $D \leq 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ depends mainly on the surface microrelief, and does not depend on $D \geq 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ at high doses; The most likely mechanism for the formation of areas with a crystalline structure under the effect of implantation of large doses of ions is the heating of the target in the region of the thermal peak, leading to melting of the material; homogeneous regularly located nanoscale phases and epitaxial nanofilms of Si and CoSiO on the surface of CoSi₂/Si (111) were obtained by the ion bombardment method (Ar⁺ and O⁺) in combination with annealing, and also the dependences of nanocrystalline phase dimensions on energy and ion dose were determined;

mechanisms for the formation of one-component nanoscale structures on the surface of materials of various types (metal alloy Pd₂Ba, semiconductors CoSi₂ and GaAs) and the type of chemical bond (intermetallic, covalent and ionic-covalent) in the bombardment with Ar⁺ ions;

Optimal conditions for ion bombardment and subsequent annealing of the Si CoSi₂-Si, CoSiO-CoSi₂-Si, Ga-GaAs-Ge, GaAlAs-GaAs multilayer structures were determined and their energy band diagrams were constructed.

Implementation of the research results. Based on the results of the study of electron spectroscopy and microscopy of the surface of binary materials implanted by low-energy ions:

patent for the invention of the Agency for Intellectual Property of the Republic of Uzbekistan "Method for obtaining three-component nanostructures based on gallium arsenide" (No. IAP 05370, April 28, 2017, Bulletin No.4). The developed method made it possible to implant Al ions in GaAs nanocrystals and in subsequent annealing to obtain Ga_{1-x}Al_xAs nanofilms and by controlling the value of x within 0.1-0.5 to control the width of the band gap of the three-component structure from 1.4 to 1.9 eV;

The results obtained for the controlled change in the electronic, emission and optical properties were used in the F2-FA-F161 scientific projects "Mechanisms for the formation of free thin films (Al, Cu, Ag and Me-Si) and nanoscale heterostructures created on the surface of crystals (W, WOn, TiN, CdTe, SiO₂) by ion implantation and the study of their physic-chemical properties" and F-2-31

films and the development of heat-sensitive structures" (Reference FTK-0313/146 of the Development Coordination Committee of science and technologies of the Republic of Uzbekistan from 2017 on February 9). The created technological developments made it possible to create nanocontacts and a new type of multilayer heterostructural metal-insulator-semiconductor films necessary for micro- and nanoelectronic devices.

The structure and the volume of the thesis. The thesis consists of an introduction, four chapters, conclusion, a list of references. The text of the thesis is presented on 120 pages of typewritten text, including 47 figures and 9 tables.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙИХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть, part I)

1. Монография: С.Б. Донаев, Б.Е. Умирзаков, Д.А. Ташмухамедова. Наноразмерные структуры в ионно-имплантированных пленках Si и GaAs. LAP Lambert Academic Publishing. 2016, - 193 с.
2. С.Б. Донаев, Б.Е. Умирзаков, Д.А. Ташмухамедова. Способ получения трехкомпонентных наноструктур на основе арсенида галлия. №IAP 05370, 28.04.2017, Бюл. №4.
3. S.B. Donaev, B.E. Umirzakov, D.A. Tashmukhamedova. Electronic Structure of $Ga_{1-x}Al_xAs$ Nanostructures Grown on the GaAs Surface by Ion Implantation. Technical Physics, 2015, Vol. 60, No. 10, pp. 1563–1566. (№11. Springer, IF: 0,632).
4. S.B. Donaev, A.K. Tashatov, B.E. Umirzakov. Effect of Ar^+ Ion Bombardment on the Composition and Structure of the Surface of $CoSi_2/Si(111)$ Nanofilms. Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2015, Vol. 9, No. 2, pp. 406–409. (№11. Springer, IF: 0,359).
5. S.B. Donaev, F. Djurabekova, B.E. Umirzakov, D.A. Tashmukhamedova. Formation of nanodimensional structures on surface of GaAs and Si by means of ion implantation. Physica status solidi (c) (2015), No.1-2, p.89-93. (№3. Scopus, IF: 0,82).
6. Б.Е. Умирзаков, С.Б. Донаев, С.Т. Гулямова. Исследование наноразмерных структур, созданных в поверхностной области пленок Si и GaAs. Вестник ТГТУ, 2015, №3, С. 18-22. (05.00.00. №16).
7. С.Б. Донаев. Оптимальные режимы ионной имплантации и отжига для получения наноструктур на основе Si и GaAs. Узбекский физический журнал. № 4, 2015, С. 229-233. (01.00.00. №5).
8. С.Б. Донаев, Б.Е. Умирзаков, С.Ж. Тураходжаев. Основные характеристики пленок $CoSi_2/Si(111)$, выращенных методами молекулярно-лучевой и твердофазной эпитаксии. Вестник ТГТУ, 2015, №2, С. 46-50. (05.00.00. №16)
9. D.A. Tashmukhamedova, M.K. Ruzibaeva, A.K. Tashatov, B.E. Umirzakov, S.B. Donaev, B.B. Mavlyanov. Analysis of the Structure and Properties of Heterostructured Nanofilms Prepared by Epitaxy and Ion Implantation Methods. Journal of Technical Physics, 2013, Vol. 58, No. 9., p. 1383–1386. (№11. Springer, IF: 0,632).
10. Б.Е. Умирзаков, С.Ж. Ниматов, С.Б. Донаев. Модификация электрофизических параметров кремниевых пленок, применяемых в солнечных элементах и диодных структурах при низкоэнергетическом ионном облучении. Вестник ТГТУ, 2013, №4, с. 38-42. (05.00.00. №16).
11. Б.Е. Умирзаков., Д.А. Ташмухамедова., С.Б. Донаев, Д.М. Мурадкабилов.

электронов нанопленок силицидов. Доклады Академии наук Республики Узбекистан (ISSN 1019-8954) 4-2011 г., с. 22-25. (01.00.00. №7).

II бўлим (II часть, part II)

12. Б.Е. Умирзаков, С.Б. Донаев. Модификация поверхности Pd и Pd-Ba ионной бомбардировкой. Электронная техника, сер. 1, СВЧ-техника. 2014. вып. 2 (521), с.65–72.
13. B.E. Umirzakov, S.B. Donaev. Electronic properties of nanofilms CoSiO received on surface CoSi₂ by the method implantation of ions O₂⁺. Nanopatterning 2017: 9th International Workshop on Nanoscale Pattern Formation at Surfaces. FOR3NANO: Formation of 3D Nanostructures by Ion Beams. Helsinki, Finland, June 26-30, 2017. p.104-105.
14. Б.Е. Умирзаков, С.Б. Донаев, Ш.Ш. Содикова. Изучение эмиссионных свойств сплава Pd–Ba при активировки лазерным облучением. “Замонавий физиканинг долзарб муаммолари” VII – илмий-назарий анжуман материаллари, 19 – 20 май 2017 йил Термиз, с.41-42.
15. Б.Е. Умирзаков, С.Б. Донаев, А.К. Ташатов. Образование наноразмерных пленок CoSiO на поверхности CoSi₂ методом ионной имплантации. Фундаментальные и прикладные вопросы физики. Труды международной конференции. Секция-II: Физика полупроводников и твердого тела, их прикладные аспекты. Ташкент – 2017 г., 13 - 14 июня, с.71-74.
16. Д.А. Ташмухамедова, С.Б. Донаев, М.Б. Юсупжанова, А.К. Ташатов, Б.Е. Умирзаков. Изучение влияния отжига на состав и кристаллическую структуру поверхности CoSi₂ с нанокристаллами Si. Актуальные проблемы молекулярной спектроскопии конденсированных сред. V международная конференция. 22-24 сентябр, Самарканд, 2016. С.79-80.
17. Б.Е. Умирзаков, С.Б. Донаев, Х.Х. Болтаев, Л.Х. Рузиева. Влияние ионной бомбардировки на эмиссионные и оптические свойства GaAs. Тезисы докладов XLVI международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва. 31 мая – 2 июня, 2016, с.160.
18. С.Б. Донаев, Д.А. Ташмухамедова, А. Ташатов, Д. Мурадкobilов. Влияние имплантации ионов кислорода на состав и электронную структуру пленок CoSi₂/Si(111). Сборник тезисов докладов международной конференции. Фундаментальные и прикладные вопросы физики. 5 - 6 ноября, 2015, Ташкент, С.298-300.
19. С.Б. Донаев, Э. Раббимов, А.К. Ташатов, Д.А. Ташмухамедова. Формирования трехкомпонентных нанопленок на поверхности GaAs при бомбардировке низкоэнергетическими ионами Na⁺ и Al⁺. XXII Международная конференция “Взаимодействие ионов с поверхностью”,

том. 3, 20-24 августа 2015 г., Москва, Россия. с.80-82.

20. С.Б. Донаев, А.К. Ташатов. Определение оптимального режима ионной имплантации для получения наноструктур на основе GaAs. Материалы III

44

Республиканской научно-практической конференции. Актуальные проблемы современной физики и астрофизики. Карши, 23 май. 2015 г. с.102-103.

21. Б.Е.Умирзаков, Д.А.Ташмухамедова, С.Турахаджаев, С.Б.Донаев. Электронная структура наноразмерных структур созданных на поверхности GaAs методом ионной имплантации. III Международная конференция по «Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах», 14-15 ноябрь 2014, Фергана, с. 178-180.
22. X.X.Boltaev, D.A.Tashmuhamedova, S.B. Donaev, B.E.Umirzakov. Influence of bombardment of ions Ar⁺ on property and structure of surface nanofilms CoSi₂/Si (111). SIMS-2014, Munster, Germany, p. 125.
23. B.E. Umirzakov, S.B. Donaev. Investigation of the processes of nanodimensional structure formation in the surface area Pd and PdBa under ionic bombing. EMRS 2014 Spring Meeting, May 26th-30th - Lille 2014, p. EP2-12.
24. S.B. Donaev, A.K. Tashatov, B.E. Umirzakov. Formation of nanodimensional structures on the surface of GaAs by ion implantation. EMRS 2014 Spring Meeting, May 26th-30th - Lille 2014, p. EP2-17.
25. Б.Е. Умирзаков, С.Б. Донаев. Влияние ионной бомбардировки на состав и структуру пленок CoSi₂/Si(111). “Физика фанининг ривожиди истеъдодли ёшларнинг ўрни” Республика илмий-амалий конференцияси, 16-17 май, 2014 й. Тошкент, с.89-91.
26. Умирзаков Б.Е., Донаев С.Б., Миржалилова М.А., Тулаганова Г.К. Образование наноразмерных структур в поверхностной области Pd и Pd-Ba при ионной имплантации. 44-й международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, 27-29 май, 2014, Москва, с.151.
27. Д.А. Ташмухамедова, А.К. Ташатов, Б.Е. Умирзаков, С.Б. Донаев. Влияние имплантации ионов Ва на состав и физические свойства Мо, Pd и PdBa. Девятая международная конференция “Ядерная и радиационная физика”, Алматы, Казахстан. 24-27 сентября 2013г., с.91-92.
28. Б.Е. Умирзаков, А.К. Ташатов, С.Б. Донаев, В.Х. Холмухамедова. Структура поверхности эпитаксиальных пленок CoSi₂/Si, полученных методами МЛЭ и ионной имплантации. Тезисы докладов XLIII международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва. 28 мая – 30 мая 2013. с. 143.
29. Б.Е. Умирзаков, С.Ж. Ниматов, С.Б. Донаев. Исследование примесей в поверхностных и приповерхностных слоях полупроводниковых диодных

структур. Тезисы докладов XLIII международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва. 28 мая – 30 мая 2013. с. 146.

45

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари «
Тил ва адабиёт таълими» таҳририятида таҳрирдан ўтказилди.
(29.06.2017 йил)

Босишга рухсат этилди: 06.07.2017 йил

Бичими 60x84 1/8 , «Times New Roman» гарнитураси.

Офсет усулида босилди.

Шартли босма табағи 2.75 нашр босма табағи 2.5 Тиражи: 100.

Буюртма: № 8.

«Aloqachi» босмахонасида чоп этилди.

Тошкент шаҳри, А. Темур кучаси 108

