

**ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМЙ КЕНГАШ**

**И. КАРИМОВ НОМИДАГИ ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА
УНИВЕРСИТЕТИ**

ЭРГАШОВ ЁҚУБ СУВОНОВИЧ

**Nb, Si, CdTe ВА CaF₂ КРИСТАЛЛАРИНИНГ СИРТ ОСТИ
ҚАТЛАМЛАРИДА ИОН БОМБАРДИМОН УСУЛИДА ҲОСИЛ
ҚИЛИНГАН НАНОЎЛЧАМЛИ СТРУКТУРАЛАР
ШАКЛЛАНИШИНИНГ ФИЗИК-ТЕХНОЛОГИК АСОСЛАРИ ВА
ЭЛЕКТРОН-ОПТИК ХУСУСИЯТЛАРИ**

01.04.04 – Физик электроника

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

Тошкент – 2020

Докторлик (DSc) диссертацияси автореферати мундарижаси
Оглавление автореферата докторской (DSc) диссертации
Contents of the of Doctoral (DSc) Dissertation Abstract

Эргашов Ёкуб Сувонович

Nb, Si, CdTe ва CaF₂ кристалларининг сирт ости қатламларида ион бомбардимон усулида ҳосил қилинган наноўлчамли структуралар шаклланишининг физик-технологик асослари ва электрон-оптик хусусиятлари. 4

Эргашов Ёкуб Сувонович

Физико-технологические основы формирования и электронно-оптические свойства наноразмерных структур, созданных в приповерхностных слоях кристаллов Nb, Si, CdTe и CaF₂ ионной бомбардировкой 31

Ergashov Yokub Suvonovich

Physico-technological foundations of the formation and electronic-optical properties of nanoscale structures created in the near-surface layers of crystals Nb, Si, CdTe and CaF₂ by ion bombardment 58

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works 65

Докторлик диссертацияси мавзуси Ўзбекистан Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2020.4.DSc/FM.167 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация И.Каримов номидаги Тошкент давлат техника университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш вебсаҳифасида (<http://iplt.uz>) ҳамда «ZiyoNet» ахборот-таълим порталида (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи: **Умирзаков Болтаходжа Ерматович**
физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар: **Нормуродов Муродилла Тогаевич**
физика-математика фанлари доктори, профессор

Расулов Акбарали Махаматович
физика-математика фанлари доктори, профессор

Усманов Дилшадбек Турсунбаевич
физика-математика фанлари доктори,

Етакчи ташкилот: **Урганч давлат университети**

Диссертация ҳимояси Ион-плазма ва лазер технологиялари институти ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.30.12.2019.FM.65.01 рақамли Илмий кенгаш асосидаги бир марталик Илмий кенгашнинг 2020 йил «___» _____ соат ___ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100125, Тошкент шаҳар, Дўрмон йўли кўчаси, 33-уй. Тел./факс: (+99871) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz, Ион-плазма ва лазер технологиялари институти мажлислар зали).

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

Диссертация автореферати 2020 йил «___» _____ кун тарқатилди.

(2020 йил «___» _____ даги ___ рақамли реестр баённомаси)

Х.Б. Ашуров

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

И.Д. Ядгаров

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

Ш.Д.Пайзиев

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

КИРИШ (фан доктори (DSc) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг зарурати ва долзарблиги. Сўнги йилларда наноўлчамдаги кўп қатламли яримўтказгичли гетероструктуралар олиш ва хоссаларини ўрганишга бўлган қизиқиш кескин ортмоқда. Бу тузилмалар ўта юқори частотали транзисторлар, диодлар, оптик резонаторлар, электрон ва магнитли хотира қурилмалари, шунингдек наноўлчамли тузилмалар учун омик контактлар ва тўсиқ (барьер) қатламларини яратиш учун истиқболли ҳисобланади. Кичик энергияли ионларни бомбардимон қилиш турли табиатли материаллар сиртида ва сирт ости соҳаларида наноўлчамли тузилмаларни яратиш учун истиқболли усулларидан биридир. Металл силицидларнинг нанокристалл фазалари тақиқланган зона кенлиги E_g уларнинг ўлчамларига қараб 0.6–1 эВ оралиғида ўзгариши мумкинлиги аниқланган. Олинган тажриба натижалари шунини кўрсатдики, пленкаларнинг мукамаллиги ва хусусиятлари кўп жиҳатдан уларни синтез қилиш усулига, қалинлигига ва юза морфологиясига боғлиқ эканлигини кўрсатди. Гетероструктураларни ҳосил қилишда яримўтказгичларнинг чегарасида атомларнинг ўзаро диффузияси натижасида юқори қаршилили ўтиш қатлами вужудга келади. Бироқ, бу қатламнинг табиати ва таркиби ҳақида ҳали ҳам ҳар хил тушунчалар мавжуд. Кўпчилик тадқиқотчилар юқори қаршиликли қатламни қаттиқ эритма деб қарайди. Оралиқ қаттиқ эритманинг хоссалари асосан уни тайёрлаш учун танланган оптимал режимларга (таглик ҳарорати ва жараён давомийлиги) танлашга боғлиқ.

Турли табиатдаги материалларнинг сирт ости соҳаларининг турли чуқурликларида наноструктура ва наноқатламлар олиш ва физик-кимёвий хусусиятларини ўрганиш ҳамда улар асосида наноқатламли гетероструктуралар яратиш замонавий физик электрониканинг **долзарб илмий вазифасидир**. Соҳада олиб борилаётган ишларнинг амалиётга жорий этилаётган маълум электрофизик хоссаларга эга бўлган сифатли янги материаллар базасини мустаҳкамлаш ҳамда замонавий талаблар асосида кристалларга қўшимча элементлар киритиш йўли билан сифатини янада ошириш, уларнинг олиш технологияларини мукамаллаштириш борасида сезиларли натижаларга эришилмоқда. Физик электрониканинг нано- ва микроэлектроника соҳасида ишлаб чиқарилаётган элементлар базаси функцияларини кенгайтириш муаммоларини ҳал қилиш, уларни кенг қўламда қўлланишини таъминлаш учун муҳим аҳамият касб этади.

Амалий жиҳатдан ушбу тизимлар турли хил оптик ва электрон қурилмалар, қуёш батареялари ва ёруғликга сезгир қурилмаларини яратиш учун катта аҳамиятга эга. Бу борада мақсадли илмий тадқиқотларни, жумладан қуйидаги йўналишлардаги илмий изланишларни амалга ошириш: ҳар хил энергиялар ва дозаларда металл ионларини имплантация қилиш; металл ионлари билан бомбардимон қилиш ва кетма-кет қиздириш ёрдамида яримўтказгичларда наноўлчамли фазалар ҳосил бўлишининг асосий механизмлари ва қонуниятларини ўрганиш; юпқа оксид қатлами билан

копланган кремнийни қисман зарядланган металлар билан чанглатишнинг ўтиш қатламлари шаклланишига таъсирини тадқиқ қилиш. Бу йўналишда олиб борилаётган илмий-тадқиқот ишлари ушбу диссертация мавзусининг долзарблигини изоҳлайди. Ушбу ишда ион имплантацияси усули нанофазалар ва наноқатламлар олишнинг асосий усули сифатида ишлатилган.

Мазкур тадқиқот иши Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”, 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сонли “Фанлар академияси фаолияти, илмий-тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида”, 2019 йил 22 августдаги ПҚ-4422-сонли “Иқтисодиёт тармоқлари ва ижтимоий соҳанинг энергия самарадорлигини ошириш, энергия тежовчи технологияларни жорий этиш ва қайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантиришнинг тезкор чора-тадбирлари тўғрисида”ги қарор ва фармонларида, шунингдек, сўнгги йилларда республикада ушбу соҳада қабул қилинган норматив-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларга маълум даражада мос келади.

Тадқиқотларнинг республика фан ва технологияларини ривожлантиришнинг устувор йўналишларига мослиги. Диссертация иши Ўзбекистон Республикаси республика фан ва технологиялар ривожланишининг устувор йўналиши доирасида бажарилган: Ф.2. «Физика, астрономия, энергетика ва машинасозлик» ва ППИ-3. Энергетика, энергоресурс тежаш, транспорт, машинасозлик ва асбобсозлик, замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника ва электрон асбобсозлик.

Диссертация мавзуси бўйича халқаро тадқиқотларнинг шарҳи¹.

Ҳозирги кунда наноўлчамли тузилмаларнинг физик хусусиятларини олиш, ўрганиш ва уларни шаклланиш механизмларини аниқлаш билан шуғулланадиган дунёнинг етакчи мамлакатлари илмий-тадқиқот марказлари, институтлари ва университетлари: Atomic-Scale Surface Science Research Center and Department of Physics, Yonsei University, Seoul (южная Корея), Lehrstuhl für Festkörperphysik, Universität Erlangen-Nürnberg, Staudtstrasse Erlangen (Германия), Sektion Physik Universität München (Германия), Departamento de Física de la Materia Condensada, Universidad Autonoma de Madrid (Испания), Department Electrical and Computer Engineering, University of California (США), Watson Research Center, Yorktown Heights, NY (США), Centre de Recherche sur les Mecanismes de la Croissance Cristalline Campus de Luminy Marseille (Франция), Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo (Япония), Advanced Institute for Materials Research (WPI-AIMR), Tohoku University (Япония). Москва Давлат университетида, РФАсининг Физика-техника институтида ва бошқа муассасаларда

¹ Обзор международных научных исследований по теме диссертации проведен на основе: Atomic-Scale Surface Science Research Center and Department of Physics; Yonsei University; Lehrstuhl für Festkörperphysik, Universität Erlangen-Nürnberg; Física de la Materia Condensada, Universidad Autonoma de Madrid; Department Electrical and Computer Engineering, University of California; Watson Research Center, Yorktown Heights; Advanced Institute for Materials Research (WPI-AIMR), [Tohoku University](#);

экспериментал ва назарий тадқиқотлар олиб борилмоқда. хусусан каттик жисм юза ва юза ости соҳаларида наноўлчамли тузилмаларни МНЭ, ҚФЭ, ГФЭ, ион билан бомбардимон қилиш усуллари ёрдамида олинмоқда ва уларни муҳим илмий натижалари ва қонуниятлари ўрганилмоқда.

Диссертация иши йўналиши бўйича бир қатор долзарб муаммолар ҳал қилинди ва муҳим илмий натижалар қўлга киритилди: Газсимон муҳитда фаоллаштирилган NbMo қотишмаларининг ташқи таъсирга эмиссия самарадорлиги ва барқарорлигини оширишнинг асосий механизмлари экспериментал равишда аниқланди (Дюбуа ва бошқалар, “ИИЧТ Исток” АЖ, Фрязино ш.); CoSi₂/Si яримўтказгичли бирикмалар кристалл панжараси учун математикавий моделлаштириш ва тадқиқот усулларни қўллаган ҳолда, ички ва статик манфий дифференциал ўтказувчанликни минизонали ва электрон бўлмаган дисперсион қонуни ўртасидаги кучли ўзаро таъсир шароитида кўрсатилган (Ю.Ю. Романова ва бошқалар, Микро тузилмалар физикаси институти, РАС); Si/CaF₂ плёнкасининг вольт-ампер характеристикасини ўлчаш жараёнида манфий дифференциал қаршилиқ аниқланди (С. Менард ва бошқалар, Кристалл ўсиш механизмларини ўрганиш маркази, Марсел, Франция).

Хусусан, ҳозирги вақтда кремнийли КҚЯ технологиясида омик контактлар ва тўсиқ қатламларини яратишда SALICIDE (Self-Aligned-silicide) ўзаробирлашиш жараёни кенг қўлланилиб, транзисторнинг контакт тизими топологик чизмасини яратишда литография талаб этилмайди. SALICIDE технологик ёндашуви, шунингдек, SAN (Self-Aligned-Nanostructures) асбоб композициясини яратишда, масалан, CoSi₂ асосида ингичка (юпқа) диэлектрикли кремний оролчалари сиртида ҳосил бўлишида фойдаланиш мумкин. CaF₂/Si, Au/CaF₂/Si каби наноплёнка тизимларининг диэлектрикни тақиқланга тўсиғи орқали электрон ва тешикларни туннеллашнинг асосий механизмлари аниқланди ва ушбу тизимларни резонанс туннел диодларида, майдонли транзисторлар ва бошқаларда фойдаланиш бўйича илмий асосланган тавсиялар берилди.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Ҳозирги вақтга қадар кенг фойдаланилаётган ва истиқболдаги функционал электрониканинг янги қурилмаларини яратишда турли табиатли наноўлчамли тузилмаларнинг таркиби, тузилиши ва хусусиятларини ўрганишга бағишланган кўплаб ишлар олиб борилди. Ю.Ж.Тулешев ва бошқ. томонидан илк марта ион плазмали чанглатиш ва чўктириш йўли орқали Те нинг Cd, Cd даги Те нинг каттик эритмалари олинди. Қопламада Cd концентрацияси ортиши (ошиши) билан CdTe куб панжарасининг параметри ортиб (ошиб) бориши аниқланди, бу эса қопламаларни нанокристалл тузилмалар сифатида таснифлаш имконини беради.

Н.А.Герасименко ва бошқалар томонидан ион имплантацияси вақтида яримўтказгичларда нанозаррачали тузилмалар ҳосил бўлиш қонуниятлари ва механизми ўрганилди. Айниқса, S.Facsko, T.Dekorsy и С.Коердт томонидан ионли чанглатиш ёрдамида квант нуқталари олинган натижалар

қизиқарлидир. Улар томонидан диаметри 35 нм. бўлган квант нуқталаридан гексагональ кристалл тузилмани GaSb(100) сиртини Ar^+ ионлари билан бомбардимон қилиш орқали олинди. S.Menard, M.Liniger, Ю.А.Берашевич, В.Е.Борисенко ва бошқ. томонидан диэлектрикнинг локаллашган ҳолатида Si/CaF₂ даврий наноўлчамли тузилмалари заряд ташувчи кинетик модели таклиф қилинди. Ушбу модел асосида даврий наноўлчамли тузилмаларда манфий дифференциал қаршилик ва токки гистерезисни бошқарувчи заряд эффектлари тушунтирилади. CdTe кристалл заррачалар ўлчами 10-15 нм га тенг. бу эса қопламаларни нанокристал тизимлар деб тавсифлаш мумкин.

Профессорлар Б.Е.Умирзаков, М.Т.Нормурадов ва бошқаларнинг ишларида илк марта кичик энергетик ион бомбардимон қилиш усули билан металл, ярим ўтказгичлар ва диэлектрик плёнкалар сиртида бир ва кўп компонентли наноўлчамли кристалл фаза ва плёнкалар олинган. $d \leq 50-60 \text{ \AA}$ да наноплёнка қалинлигининг камайиши (пасайиши) билан тақиқланган зона ва «а» панжара доимийсининг қиймати ортиб бориши кўрсатилган. Кўпкомпонентли наноўлчамли тузилмаларни шакллантиришнинг асосий механизмлари аниқланди.

Мазкур ишни бошлашдан аввал ион имплантация усули ёрдамида юпқа сирт ости қатламида наноўлчамли гетеротузилма ва яримўтказгичли плёнкалар асосида икки ва уч қатламли гетероқатлам олиш амалда қўлланилмаган. Материалларнинг сирт ости қатламида яратилган наноўлчамли тузилмаларнинг ўлчамлари, таркиби, тузилиши, электрон хусусиятлари ва ҳосил бўлиш механизмлари ўрганилмаган.

Диссертация мавзусининг диссертация иши бажарилган ташкилот билан ўзаро алоқаси. Диссертация тадқиқоти Тошкент давлат техника университетида Ўзбекистон Республикаси илмий-тадқиқот давлат дастури доирасида ва ОТ-Ф2-53-сонли “ A^3B^5 ва A^2B^6 плёнкаларининг сирти ва сирт остида ҳосил бўлган икки қатламли наноўлчамли тузилманинг электрон хоссалари ва квант ўлчамли эффектлар” (2017-2020); А-4-7-сон “Микро ва оптоэлектроника асбоблари, шу жумладан, қуёш энергетикаси учун кремний ва арсенид галий монокристалл пленкалари сирт ости қатламларида гетероэпитаксиал наноўлчамли тузилмаларни синтез қилиш технологиясини ишлаб чиқиш” (2015–2017); “Такимиллаштирилган теплофизик хусусиятлар билан наноўлчамли силикат шиша шакллантиришнинг физик асосларини ишлаб чиқиш” (2019-2021).

Тадқиқотнинг мақсади ион бомбардимон қилиш ва вакуумли чанглатиш давомида Mo, Nb, Si, CdTe, CoSi₂ ва CaF₂ нинг сирт ва сирт ости соҳаларида наноўлчамли фаза ва қатламлар ҳосил бўлиш механизмларининг физик қонуниятларини ўрнатиш, уларнинг таркиби, тузилиши, электрон ва оптик хусусиятларини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

Қийин эрувчи ва актив металл ионлари билан бомбардимон қилинганда Nb нинг эмиссион ва оптик хусусиятлари ўзгариши механизмларини аниқлаш.

Mo и Nb сиртининг оксидланишининг ишқорий металл ионларининг сочилиш коэффициентига таъсирини назарий ва экспериментал ўрганиш.

Монокристалл Si нинг валент электронлари спектрига Ag^+ ионлари билан бомбардимон қилиш таъсирини экспериментал ўрганиш. Si валент электрон ҳолати максимал зичлиги ўзгариши билан Ag^+ нинг энергия ва нурланиш дозаси ўртасидаги ўзаро боғлиқлигини баҳолаш. Кузатилган ўзгаришларни назарий изоҳлаш.

Si нинг сирт ости соҳаси бир нечта қатламларида ҳосил бўлган наноўлчамли фаза ва $CoSi_2$ қатламлариининг кристалл ва электрон структурасини олиш ва ўрганиш. $SiO_2/Si/CoSi_2/Si$ шаклидаги кўп қатламли тизимнинг тузилиши, эмиссион ва оптик хусусиятларини олиш ва ўрганиш.

$CoSi_2/Si$ (111) гетероструктура сиртида ҳосил бўлган Si нанокристаллари ва плёнкалари электрон ва кристал тузилишини ўрганиш.

Mo (111) сиртида ГФЭ усули орқали олинган CdTe плёнкаларининг таркиби, сирт морфологияси, кристалл панжара параметрлари, энергетик зоналари ва эмиссион хусусиятларини Ag^+ ионлари билан аввалги ва кейинги емириш (травления)дан сўнг аниқлаш.

Me^+ ионларини имплантация қилиш ва кейинги қиздириш йўли билан CdTe сирти ва сирт ости соҳасида эпитаксиал наноўлчамли CdMeTe ($Me - Ba, Zn$) шаклланиш жараёнларини ўрганиш.

CdTe турли чуқурликларида яратилган CdMeTe наноқатламининг тақиқланган зона кенлиги ва валент электронлари ҳолатининг таркиби, тузилиши, зичлигини ўрганиш.

Тадқиқот объекти Nb, Mo, Si монокристалл намуналари, Si, CdTe ва CaF_2 эпитаксиал плёнкалари ҳисобланади.

Тадқиқотнинг предмети - ўрганилаётган материалларнинг сирт ва сирт ости қатламларида нанокристаллар ва наноплёнкаларнинг шаклланиш механизмлари ҳамда электрон ва кристалл тузилмалари ҳисобланади.

Тадқиқот усуллари. Оже – электрон спектроскопия (ОЭС), ультрабинафша нурланишнинг фотоэлектронлар спектроскопия (УБФС), эластик қайтган электрон спектроскопия (ЭҚЭС), электрон энергия йўқотиш спектроскопияси (ЭЭЙС), тез электронлар дифракцияси (ТЭД), растрли электрон микроскопия (РЭМ), атом-кучланишли микроскопияси (АКМ), ўтувчи ёруғлик нурларининг спектроскопияси каби тадқиқот усуллари қўлланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

Mo ва актив металллар ионлари билан бомбардимон қилинган Nb сирт қатламларининг электрон тузилишидаги ўзгаришларнинг асосий-қонуниятлари аниқланган;

ишқор металл ионларининг сочилиш коэффициентига сирт оксидланишининг таъсири назарий ва экспериментал тарзда баҳоланган;

сирт қатламларининг тартибсизлиги Si нинг монокристалл электрон тузилишига таъсири ўрганилган;

илк бор Si (111) сирт ости қатламининг турли чуқурликларида яширин CoSi₂ нанофазалари, икки ва уч ички қатламларида нанофаза яратишнинг муқобил шартлари ҳамда олинган тизимларнинг кристалл ва электрон тузилиши ўрганилган;

CoSi₂ сиртидаги квант ўлчамли фаза ва Si плёнкалари олиниб, уларнинг электрон хусусиятлари ва уч қатламли Si/CoSi₂/Si (111) нанотузилма олиш методикаси ишлаб чиқилган;

CdTe газ фазали чўктирилган поликристалл плёнкалари таркиби ва электрон хусусиятларига сирт микронотекисликлар таъсири ўрганилди ва қиздириш усули орқали Ar⁺ ионлари сирти емирилишидан кейинги ўзгаришларнинг асосий қонуниятлари аниқланган;

E₀=0,5-5 кэВ энергия ўзгариши билан кейинги қиздириш йўли орқали Ba⁺ ионлари имплантацияси пайтида CdTe/Mo(111) сирт ости плёнка соҳасида Cd_{0,5}Ba_{0,5}Te уч компонентли нанокристалл ва нанопёнкалар шаклланишининг асосий механизмлари ва қонуниятлари ўрганилган;

илк бор ион имплантация усули CdTe нинг турли чуқурликларида уч компонентли наноўлчамли фаза ва қатламларни олиш учун қўлланилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

Si ва CdTe сирт ости қатламининг турли чуқурликларида металл ионларини имплантация қилиш усули билан икки ва уч компонентли нанотузилмалар олинди.

Металлар, яримўтказгичлар ва диэлектриклар асосида кўп қатламли системаларнинг ҳосил бўлиш қонуниятлари ўрганилди ва оптимал режимлар (ионлар тури, энергияси ва дозаси, ҳарорати ва тоблаш) аниқланди.

Олинган натижалар ҳамда ион имплантациясини босқичма-босқич ўтказиш бўйича талиф қилинган технологиялар қаттиқ жисмлар электроникаси учун янги қурилмаларни яратишда истиқболга эга.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Олинган тадқиқот натижаларининг ишончлилиги электрон спектроскопия ва зондли микроскопиясининг замонавий аналитик усулларимажмуасидан фойдаланиш ҳамда Nb, Si, CdTe ва CaF₂ нинг тоза намуналарида олинган маълумотларнинг бошқа муаллифларнинг натижаларига мос келиши билан тасдиқланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Илмий аҳамияти: олинган илмий тадқиқот натижалари ион бомбардимон қилиш ва кейинги қиздириш жараёнида металллар, яримўтказгичлар ва диэлектрикларнинг турли соҳаларида наноўлчамли тузилмаларни шакллантириш (ҳосил бўлиш) механизмларини намоён қилишга (очиқ беришга), шунингдек, яширин (ёпиқ) нанофазалар ва наноқатламларнинг электрон ва кристалл тузилиши ҳақидаги билимларни кенгайтиришга имкон беради. Ушбу натижалар квант ўлчовли материалларни шакллантириш назариясини ва ион бомбардимон пайтида кўпкомпонентли тузилмаларни шакллантириш жараёнларининг назарий моделларини яратиш назариясини ишлаб чиқиш учун жуда муҳимдир.

Амалий аҳамияти: Ишлаб чиқилган технологиялар ва наноўлчовли тузилмаларни яратишнинг оптимал режимларини аниқлаш янги электрон қурилмаларни (КИС, ЎКИС, микротўлқинли қурилмалар, оптик сенсорлар, хотира элементлари, қуёш батареялари ва бошқаларни) ривожлантириш истиқболларига эга.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.

Ион бомбардимон қилиш ва вакуумли чанглатиш усулларида наноўлчамли фаза ва қатламлар ҳосил бўлиш механизмларининг физик қонуниятларини ўрнатиш, уларнинг таркиби, тузилиши, электрон ва оптик хусусиятларини аниқлашда олинган илмий натижалар асосида:

эркин кўп қатламли кремний-силицид металл наноплёнка олиш усулига Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлигининг ихтиро учун патенти олинган (№ IAP 05741 - 2019 й). Натижада, кўп қатламли кремний-силицид-металл гетеротизимини ҳосил қилишнинг эффектив усули яратилган;

кремний плёнкасида металл дисилицидининг нанокристалл тузилмасини олиш усулига Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлигининг ихтиро учун патенти олинган (№ IAP 06215 - 2020 й). Натижада, кремнийнинг юзасида дисилицид нанофазаларини ва нанопленкаларини ҳосил қилишнинг ионлар имплантациясига асосланган усули яратилган;

Co^+ ионлари билан имплантацияланган Si монокристаллининг Оже электрон спектроскопия усулида олинган натижалари Ф-2-31 рақамли “Наноўлчамли металллар силицид плёнкаларни структураси ва физик хоссаларини ўрганиш ва термосезгир структуралар ҳосил қилиш” ҳамда 2017-2018 йилларда бажарилган ОТ-А3-56 рақамли “Олий маргенец силицидди пардаси асосида инфра қизил нурли термоэлектрик ўзгартириш ва иссиқлик нурини ўта эффектив ҳолда совитилмай қайд этувчи приёмниклар яратиш” мавзусидаги лойиҳаларда металл-силицидларнинг таркибини ва улардаги атомларнинг концентрацияларини ҳисоблашда силицидларнинг оптик хусусиятларини ўрганишда фойдаланилган (Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2020 йил 2 ноябрдаги 87-03-4334-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш Mn_4Si_7 кремний пленкасининг тақиқланган зонаси кенглигини ва фотосезгирлигини аниқлаш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишининг асосий натижалари Республика ва халқаро конференциялар ва симпозиумларга тақдим этилди ва муҳокама қилинди: Тадқиқотнинг асосий натижалари 48 ва 49- халқаро конференцияларда зарядланган зарраларнинг кристаллар билан ўзаро таъсири физикаси бўйича (Москва, 2018, 2019); Ионларнинг сирт билан ўзаро таъсири бўйича XXIII, XXIV халқаро конференциялар (Москва, 2017, 2019); European Materials Research Society Spring Meeting (Strasbourg - 2018, Nice - 2019); В Халқаро конференция "Лазер, Плазма тадқиқотлари ва технологиялари (Москва, 2019);

“Яримўтказгичлар физикасининг ва қайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантиришнинг замонавий муаммолари” (Тошкент, 2018); “Замонавий физиканинг долзарб муаммолари” халқаро илмий конференцияси (Тошкент, 2019) халқаро ва республика конференциялари ва симпозиумларида хабар қилинди ва муҳокама қилинди.

Диссертация ишининг асосий натижалари 01.04.04 – Физик электроника ихтисослиги бўйича мутахассислар иштирокида "Умумий физика" кафедраси кенгайтирилган семинарида тақдим этилди ва муҳокама қилинди.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.

Диссертация мавзуси бўйича 33 та илмий иш чоп этилган бўлиб, шулардан, 1 та монография, 2 та патент, 12 та мақола, жумладан, 7 та мақола хорижий халқаро эксперт журналларида ва 18 та мақола конференция материаллари тўпламида.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.

Диссертация иши таркиби кириш, бешта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати, жумладан 148 номдаги 2 иловадан иборат. Диссертация матни машина ёзувида 197 саҳифаларида, жумладан 90 расмлар ва 21 жадвалларда келтирилган.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, республикадаги фан ва техника тараққиётининг асосий устувор йўналишлари билан тадқиқотларнинг ўзаро боғлиқлигини аниқланган, диссертация мавзуси бўйича илмий изланишларга умумий нуқтаи назарни, муаммонинг ўрганилиш даражасини, мақсад ва вазифаларни шакллантиради, объектлар, мавзулар ва тадқиқот усуллари аниқлайди ҳамда илмий баён қилади. Тадқиқотнинг янгилиги, олинган натижаларнинг ишончлилиги асосланди, уларнинг назарий ва амалий аҳамияти очиб берилди, натижаларнинг бажарилиши ва ишнинг апробацияси ҳақида қисқача маълумотлар, шунингдек тезис ҳажми ва тузилиши келтирилган.

Тадқиқотнинг биринчи бобида адабиётлар шарҳига бағишланган "Қисқача адабиётлар шарҳи" деб номланган қисмида Мо юзасининг хусусиятларини ион бомбардимон қилиш ва плазма нурланиши билан ўзгартириш бўйича олинган натижалар таҳлил қилинган; истиқболли наноўлчамли яримўтказгичли тузилмалар; катталиги ва учкомпонентли структураларнинг ҳосил бўлишининг CdTe хусусиятларига таъсири ўрганилган.

Адабиётлар шарҳининг қисқача таҳлили шуни кўрсатадики, ушбу иш бошланишидан олдин: металл ионларини имплантациялашда қийн эрувчи металлларнинг эмиссияси ва оптик хусусиятларининг ўзгариши механизмларини аниқлаш бўйича тизимли тадқиқотлар ўтказилмаган; Мо ва Nb сирт оксидланишининг актив металл ионларини кўшилиши ва сочилишига таъсири экспериментал ва назарий жиҳатдан ўрганилмаган; сирт

кристалли тузилишидаги ўзгаришларнинг монокристалл кремнийнинг валент соҳа электронларининг жойлашиш зичлигига таъсири ўрганилмаган; Si нинг сирт ости бир неча қатламларида MeSi_2 нанокристалли фазаларининг яратиш ва электрон хоссаларини ўрганиш бўйича экспериментал тадқиқотлар натижалари йўқ; Si га Co^+ ва O_2^+ ионларини кичик энергияли имплантацияси натижасида олинган $\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{CoSi}_2/\text{Si}$ нанопленкасининг сирт топографияси, таркиби, электрон ва кристалли тузилиши ўрганилмаган; $\text{CoSi}_2/\text{Si}(111)$ юзасида Si ультра юпқа плёнкалари ($d = 5 - 10 \text{ \AA}$) ҳосил қилиш бўйича деярли изланишлар олиб борилмаган; Ag^+ ва Ba^+ ионлари билан кичик энергияли ($E_0 = 0,5-5 \text{ кэВ}$) бомбардимоннинг сиртга яқин CdTe/Mo қатламининг таркиби ва электрон тузилишига таъсири ўрганилмаган. $\text{Cd}_{1-x}\text{Ba}_x\text{Te}$ типидagi нанофазалар ва плёнкаларни шакллантиришнинг асосий механизмлари ишлаб чиқилмаган; CdTe юзасида ва сиртга яқин соҳасида эпитаксиал наноструктураларнинг олиш ва физик хусусиятларини ўрганиш бўйича деярли тадқиқотлар олиб борилмаган. CdTe сиртини CdMeTe нанофазлари билан қоплаш даражаси ва уларнинг электрон хоссаларининг нанокластер фазаларининг ўлчамларига боғлиқлиги аниқланмаган.

Ушбу ҳал қилинмаган муаммолар асосида ушбу диссертация ишининг асосий мақсад ва вазифалари шакллантирилган.

Диссертациянинг "Экспериментал тадқиқотлар усули" деб номланган иккинчи боби материалларни ва наноўлчамли тузилмаларга эга плёнкалар олиш ва физик хусусиятларини ўрганиш учун экспериментал қурилмаларни тавсифлашга бағишланган. Ион бомбардимон қилиш, қиздириш ва асосий тадқиқотлар универсал ўта юқори вакуумли қурилмада амалга оширилди. Металл ионларининг энергияси E_0 0,5 дан 40 эВ гача оралиғида, Ag^+ ва O_2^+ эса - $E_0 = 0,5 - 5 \text{ кэВ}$ оралиғида ўзгарган. Намуналарнинг элементар ва кимёвий таркиби ОЭС усули билан, соҳалар энергиялар бўйича параметрлари ва валентлик электронлар ҳолатининг зичлиги - УФЭС, СУОЭ усуллари ва ўтувчи ёруғлик интенсивлигини ўлчаш йўли билан ўрганилди.

Юзалар микрорельефи ва панжаранинг параметрлари тўғрисида маълумотларни олиш учун биз стандарт қурилмалардан фойдаланганмиз: (SEM) "JEOL" сканерловчи электрон микроскоп, (RHE) "EMR-102" тезкор электрон диффрактометр, XIA-200 атом кучли микроскопи ва UV-1280 спектрофотометри.

Учинчи **"Кичик энергияли ионлар билан Nb ва Mo ни бомбардимон қилгандан сўнг таркиби, электрон тузилиши, эмиссияси ва оптик хусусиятларининг ўзгариши"** деб номланган бобда Nb, Ni ва Mo ларнинг қийин эрувчи ва актив металларнинг ионлари билан бомбардимон қилинганда, таркиби, электрон тузилиши, эмиссияси ва оптик хусусиятларининг ўзгаришини ўрганиш натижалари ҳамда ион бомбардимонининг кислород атмосферасида қиздириш вақтида Nb сиртининг оксидланишига таъсирини текшириш натижалари келтирилган.

Ҳақиқий иккиламчи электронлар (ҲИЭ) коэффитсиэнти δ қуйидаги формула билан аниқланиши мумкин:

$$\delta = \int_0^{\infty} n(E_p, x) \cdot f(x) \cdot dx \quad (1)$$

бу ерда $n(E_p, x)$ - x чуқурликда E_p энергияси бўлган бирламчи электронлар ҳосил қилган ички иккиламчи электронларнинг зичлиги; $f(x)$ - бу (x) чуқурликдан иккиламчи электронларни чиқариш эҳтимоли $f(x)$ қуйидагича аниқланади

$$f(x) = \psi(x) \cdot p(e\varphi) \quad (2)$$

бу эрда $\psi(x)$ – чуқурликдаги электронларнинг юзага яқинлашиш эҳтимоли, $p(e\varphi)$ – иккиламчи электронларнинг металл-вакуум чегарасисига яқинлашиш эҳтимоли. Шундай қилиб, δ иш функциясига ҳам x чиқиш ишига ўхшаб, ҲИЭ чиқиш зонасида бирламчи электронлар ҳосил қилган $n(E_p, x)$ ички иккиламчи электронларнинг зичлигига ҳам боғлиқдир.

Ион легирланган намуналарнинг σ_m ва Y коэффицентларини оширишда сирт ва ҳажмнинг ролини баҳолаш учун ҳар хил қалинликдаги барий қатлами билан қопланган ва ҳар хил энергияларда ҳамда дозаларда $D=D_H=6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (D_H -тўйиниш дозаси) Ba^+ ионлари билан легирланган ниобий учун Y и σ_m ўлчов натижаларини таққосладик. Таққослаш учун биз E_0 ион энергиясининг ва қатлам қалинлиги Θ нинг шундай қийматларини танладикки, бунда иккала намуна учун ҳам чиқиш иши деярли бир хил бўлди (1-жадвал).

1-жадвал

Nb (111) учун ҳар хил энергияли барий ионлари билан легирланган ва ҳар хил қалинликдаги барий қатламлари билан қопланган σ_m , Y ва $e\varphi$ қийматлари

$Ba^+ \rightarrow Nb$ $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ ион} \cdot \text{см}^{-2}$				Ba/Nb				$\sigma_{mл}/\sigma_{mн}$	$Y_{л}/Y_{н}$
$E_0, \text{кэВ}$	σ_m	$Y \cdot 10^{-6}$	$e\varphi$	Θ	σ_m	$Y \cdot 10^{-6}$	$e\varphi$		
0.5	3.4	56	2.3	0.7	2.0	30	2.35	1.7	1.8
3.0	2.6	30	3.2	0.4	1.75	19	3.15	1.45	1.6
5.0	2.1	11	3.9	0.2	1.55	9	3.85	1.3	1.2

$E_{pm} \approx 450 - 500 \text{ эВ}$ энергияларга мос $\sigma = \sigma_m$ қийматлари.

Жадвалдан кўринадики, $e\varphi$ нинг бир хил ўзгариши билан легирланган намуналар учун σ_m ва Y қийматлари чанглантирилган намуналарникига караганда каттарок. Легирланган намуналар ва чанглантирилган намуналар σ ва Y қийматларининг сезиларли фарқи $E_0 = 1 \text{ кэВ}$ да кузатилади ва шу билан бирга $\sigma_{л}/\sigma_{н}$ ва $Y_{л}/Y_{н}$ нисбатлар ~ 1.7 ни ташкил қилади.

ҲИЭ ва фотоэлектронлардан тоза Nb учун электронларни чиқиш зонаси чуқурлигининг ҳисобланган қиймати $20-25 \text{ \AA}$ ни ташкил этди. Бундай ҳолда, киритилган атомларнинг асосий қисми ҲИЭ чиқиш зонасига яқин

бўлган $0 - 20 \text{ \AA}$ чуқурликда жойлашган. Бу шунингдек, $e\phi$ нинг катта камайиши $E_0 = 0,5-1 \text{ кЭВ}$ да σ ва Y нинг энг катта ортишига олиб келади.

Ион энергиясининг ортиши билан эмиссия қилинган қатламдаги жойлаштирилган атомларнинг концентрацияси камаяди, бу эса σ_L / σ_H ва Y_L / Y_H нисбатларининг камайишига олиб келади.

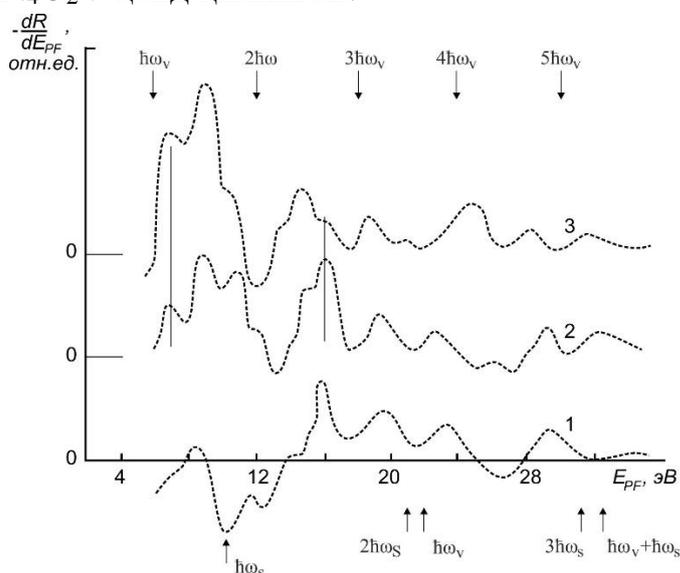
1-расмда энергияси $E_0 = 0,5$ ва 3 кЭВ бўлган Na^+ ионлари билан легирланган ниобий учун ЭҚЭ dR/E_{PF} билан E_{PF} нинг боғланиш спектрлари кўрсатилган. Юқоридаги стрелкалар қалин натрий қатламига хос бўлган максимал ва минимал даражаларни, пастда эса тоза ниобий учун кўрсатилган.

Кўришиб турибдики, $E_0 = 0,5 \text{ кЭВ}$ да $dR/dE_{PF}(E_{PF})$ эгри чизиқларининг аксарияти натрийга хосдир.

E_0 ортиши билан бу хусусиятларнинг интенсивлиги камаяди, ниобий хусусиятларининг интенсивлиги ортади. Худди шу натижалар K^+ ва Ba^+ ионлари билан легирланган Nb учун ҳам олинган.

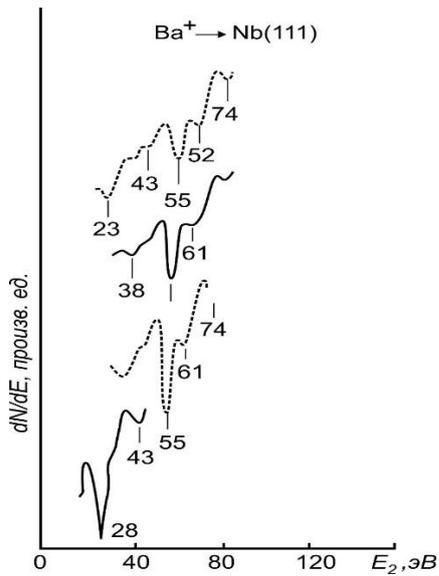
2 – расмда $E_0 = 0,5 \text{ кЭВ}$ да Nb нинг $43, 94$ ва 140 эВ энергияли Оже чўққилари йўқолади ва бошқа чўққиларнинг интенсивлиги кучли камайганлигини кўриш мумкин.

Барий чўққилари $38, 47, 55, 59$ ва 74 эВ энергияларда пайдо бўлади, уларни Оже ўтишлари мос равишда $\text{N}_4\text{O}_1\text{O}_3, \text{N}_5\text{O}_1\text{V}, \text{N}_5\text{O}_2\text{O}_2, \text{N}_{45}\text{O}_{23}\text{O}_{23}$ ва $\text{N}_4\text{O}_2\text{V}$ қайд қилинган.



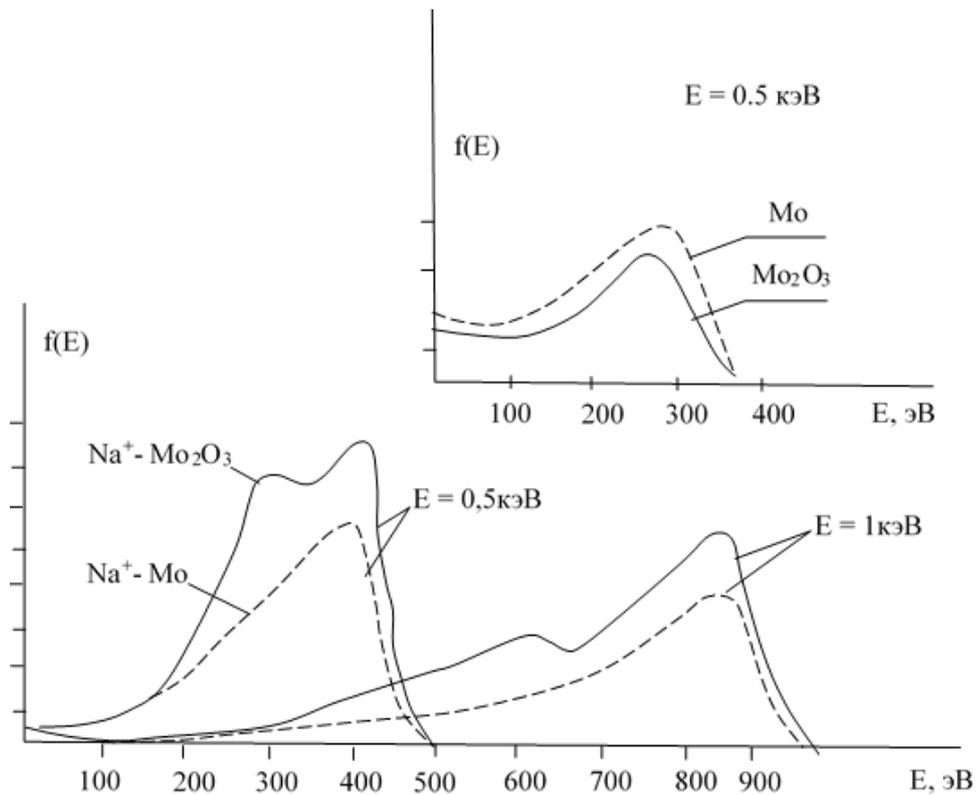
1-расм. Na^+ ионлари билан легирланган Nb (111) учун dR/dE_{PF} нинг E_{PF} боғланиш графиги, E_0 , кЭВ: 2 – 3 кЭВ, 3 – 0,5 кЭВ, 1 – тоза Nb .

Назарий ҳисоблашлар CASCAD дастури ёрдамида амалга оширилди. Биз $\text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Rb}^+$ ва Cs^+ ионларининг поликристалл Mo наъмуналари юзасида нормал тушиш ҳолатида сочилишини кўриб чиқдик. Шунинг учун ишкорий ионлар учун $V_i \approx e\phi$, акс этган нурнинг ионланиш даражаси юқори, аммо фақат Cs^+ ($V_i - e\phi = -0,63 \text{ эВ}$) учун 1 га тенг. Масалан, 3-расмда молибден нишонидан (нуқтали чизик) ва Mo_2O_3 бир моноқатлам билан қопланган Mo дан (қаттиқ чизиклар) сочилган Na ионларининг энергия спектрлари кўрсатилган.

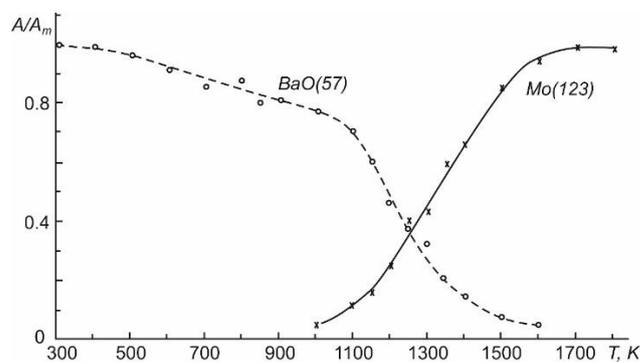


2-расм. Ba^+ билан бомбардимон қилингандаги Nb (111) Оже спектрлари. E_0 , кэВ: 2 – 0,5; 3 – 1; 4 – 5; D = $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. 1 – тоза Nb. $E_p = 2 \cdot 10^{17} \text{ ион} \cdot \text{см}^{-2}$ амплитудаларининг (A) = 1250 эВ.

Спектрлар $\alpha = (70 \pm 5^\circ)$ бурчаклар оралиғида сочилган ионлар учун кўрсатилган. Нормал тушишда (δ) тақсимот шакли бир оз ўзгарган. Тушиш бурчаги ($\varphi = 70^\circ$) да, кислород (биринчи чўққиси) ва молибден атомлари билан сочилишга боғлиқ бўлган чўққилар яхши ажратилган. O_2^+ атмосферасида легирланган намуналарни термо ишлов бериш вақтида иккиламчи эмиссия параметрларининг ўзгариши механизмини аниқлаш учун Оже электронлар спектридаги турли ҳароратлар танлаб олинди. 4-расмда ВаО ва Мо нинг Оже чўққиларининг (А максимал қийматига мосланган) Мо (111) учун бўлган кислородли атмосферада ($P_{O_2} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$) Ba^+ ионлари билан легирланган $E_0 = 0,5 \text{ кэВ}$ ($D = 2 \cdot 10^{17} \text{ ион} \cdot \text{см}^{-2}$) амплитудаларининг (А) ҳароратга боғлиқлиги кўрсатилган.



3-расм. Na ионлари сочилган тоза Мо (нуқтали) ва Mo_2O_3 оксид пленка билан қопланган Мо (қаттиқ чизик) учун энергия спектрлари.



4-расм. Кислородли муҳитда ($P_{O_2} = 5 \cdot 10^{-2}$

Па) $E_0 = 0,5$ кэВ билан Ba^+ ионлари билан легирланган ВаО ($E_2 = 57$ эВ) ва Мо ($E_2 = 123$ эВ) учун Оже чўққилари амплитудаларининг Мо учун ҳароратга боғлиқлиги

Ионли легирланган намунани термо ишлов беришда бир вақтнинг ўзида қуйидаги жараёнлар содир бўлиши мумкин: ВаО ва Ва нинг сиртдан диффузияланиши; ўрнатилган Ва юзасига диффузия, шунингдек кислороднинг намунанинг ички қисмига тарқалиши. Буғланиш даражаси қопланиш даражасига муносиб ва десорбция иссиқлигига боғлиқ..

Қиздиришнинг дастлабки босқичида юзага диффузия оқими десорбция тезлигидан ошиб кетади, бу эса ер нинг камайишига олиб келади. Кўринишидан, юзага тарқаладиган Ва атомлари ортиқча кислород билан бирикиб, ВаО ҳосил қилади (бу ОЭС натижалари билан тасдиқланган)

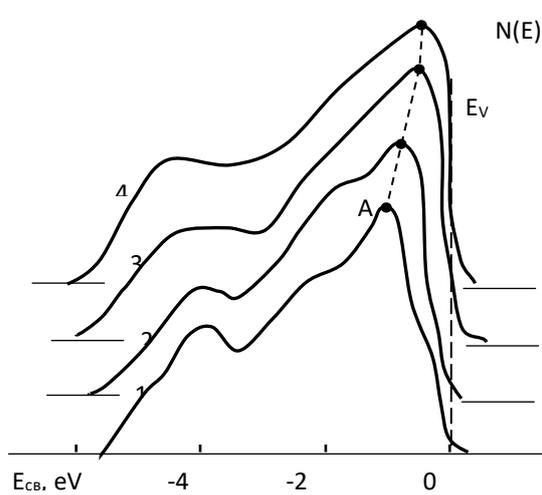
Шу билан, ионли легирланган Мо ($E_0 \geq 3$ кэВ) $T = 800$ К га қиздирилганда, ўрганилаётган соҳада σ нинг қиймати ортади. Ҳароратнинг янада ошиши билан Ва ва ВаО нинг миграция жараёнлари, шунингдек, ВаО плёнкасининг юзадан десорбцияси ва ВаО молекулаларининг парчаланиши бошланади, бу эса σ нинг камайишига олиб келади.

Тўртинчи боб "Турли хил табиатдаги материалларнинг юзасида ва сиртга яқин соҳасида ҳосил бўлган Si нанофазалари ва қатламларининг кристалл ва электрон тузилиши", Si сиртининг кристалл панжарасининг тартибсизлигини валент электронлари зичлиги максимумининг ҳолатига таъсири бўйича тажриба натижаларини аниқ тушунтиришга бағишланган; нур ўтказиш усули билан CaF_2 юзасида олинган Са ва Si нанофазаларининг электрон тузилишини ўрганиш; Si га Co^+ ва O_2^+ ионларини кетма-кет имплантация қилиш йўли билан $SiO_2/Si/CoSi_2/Si$ типдаги кўп қатламли нано пленка гетеротизимини олиш, уларнинг таркибини ва тизимнинг турли чуқурликларида атом концентрациясини ўрганиш; Si- $CoSi_2$ -Si нано пленка тизимининг таркиби, тузилиши ва энергия оралиғи параметрларини экспериментал ўрганиш.

5-расмда турли хил дозаларда $E_0=1$ кэВ бўлган Ar^+ ионлари билан бомбардимон қилинганда Si фотоэлектронлар спектридаги ўзгариши келтирилган. Дастлаб биз кремнийнинг асосий А пики ҳолати ва шакли

Ўзгаришини кўриб чиқайлик. Кўриниб турибдики, нурланиш дозасининг ошиши билан A чўққиси кенгайди, унинг амплитудаси камаяди ва ҳолати юқори энергиялар томон силжийди (E_v валент зонасининг юқори қирраси). Ион бомбардимон қилиш вақтида Si сиртининг таркиби деярли ўзгаришсиз қолади, шунинг учун кузатилган ўзгаришлар асосан сиртга яқин қатламларнинг тартибсизлиги билан изоҳланади. $D=6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ бўлганда тўлиқ аморфизация бўлади ва D нинг янада ўсиши фотоэлектронлар спектрининг сезиларли ўзгаришига олиб келмайди.

Энди сиртни тартибсизланиш жараёнида кремнийнинг валент соҳаси ҳолатидаги зичлик максимал ҳолатининг ўзгаришини назарий нуқтаи назардан тушунтиришга ҳаракат қилайлик. Кремний монокристаллидаги электронлар ҳолати Блоховский ҳолатида Грин функцияси $G_0(\omega, k)$ билан тавсифланади, бу ерда ω -тушаётган ёруғликнинг частотаси, k - кенгайтирилган схемадаги электроннинг квазимульси.



5-расм. Ar^+ ионлари билан бомбардимон қилинган $Si(111)$ учун фотоэлектронлар энергия тақсимотининг эгри чизиқлари; $E_0=1 \text{ кэВ}$ билан $D, \text{ см}^{-2}$: 1-0, 2- $2 \cdot 10^{14}$, 3- 10^{15} , 4- 10^{16} .

$G_{kk'}$ аморф моддасидаги электроннинг Грин функцияси Шредингернинг интеграл тенгламасини қаноатлантиради:

$$\hat{G}_{kk'} = G_0(k)\delta_{kk'} + G_0(k) \sum \hat{V}_{kk'} \hat{G}_{k'k} \quad (3)$$

бу ерда $\hat{V}_{kk'}$ - модданинг тасодифий жойлаштирилган атомлари томонидан электронга таъсир қилувчи тасодифий потенциалнинг матрица элементи, K нинг йиғиндиси эса кристаллдаги электронларнинг барча ҳолатларида бажарилади.

K -монокристалл кремнийнинг валент соҳасини тасвирлайди, K' -ионли бомбардимон кремнийга мос келадиган соҳани тасвирлайди.

δ - Диракнинг дельта функцияси, фотон ютилгандаги энергиянинг сақланиш қонунини ифодалайди.

Иккинчи тартибли назарияда аморфланиш натижасида максимумнинг силжиши тасодифий потенциал V нинг квадратик модулининг ўртача қийматига пропорционалдир. У ҳолда

$$M_{kk} = N \int \frac{dk''}{(2\pi)^3} \frac{\langle |\hat{V}_{kk}|^2 \rangle}{\epsilon_k - \epsilon_{k''}} \quad (4)$$

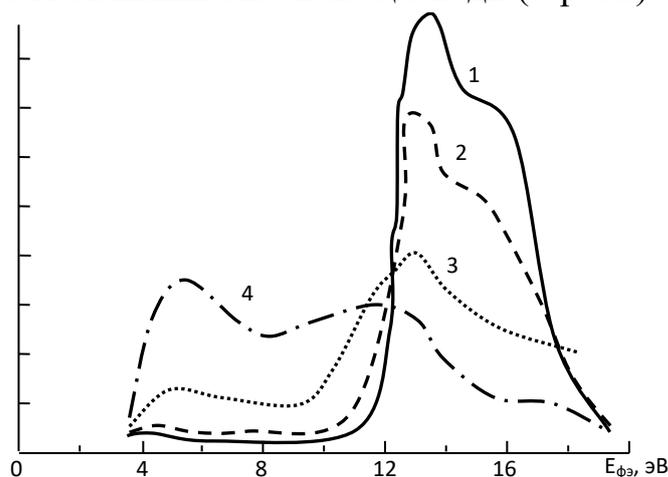
бу ерда N - нуқсонларнинг концентрацияси, $\langle |\hat{V}_{kk}|^2 \rangle$ - тасодифий таъсир ўтказиш потенциалининг ўртача тебраниши, (4) да интеграл асосий қиймат маъносида тушунилади. ε'_k - аморфланган кремнийнинг валент электронлар энергияси қуйидагича

$$\varepsilon'_k = \varepsilon_k + M_{kk} \quad (5)$$

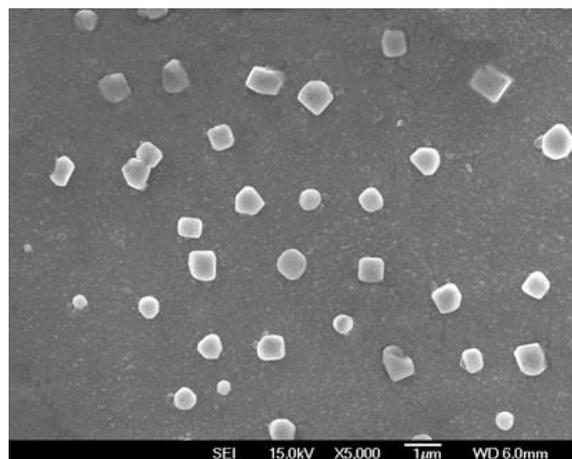
бу ерда ε_k - соф кристалл кремнийнинг валентлик зонасидаги электрон энергияси. Чўққиларнинг энергетик ҳолатининг силжиши (4) формула бўйича ҳисобланган M_{kk} қиймати билан аниқланади.

Ҳисоблашлар шуни кўрсатадики, кичик концентрацияда, яъни, кичик имплантация дозаларда ($D < 10^{15} \text{ см}^{-2}$) потенциал M_{kk} ва ҳолатлар зичлиги максималининг концентрациясига нисбатан чизикли силжийди. Аморф кремнийга ўтишга мос келадиган юқори киришмалар концентрациясида ($D > 10^{15} \text{ см}^{-2}$ дозаларда) M_{kk} нинг концентрацияга боғлиқлиги жуда заиф. Турли хил дозаларда $E_0 = 1$ кэВ бўлган Ar^+ ионлари билан нурланишда CaF_2 фотоэлектронларининг энергия тақсимооти эгри чизигидаги ўзгаришларнинг динамикаси ўрганилди (6-расм). "Соф" CaF_2 спектрида фотоэлектронларнинг дастлабки кескин ўсиши 12,2 - 12,3 эВ дан бошланади, бу эса E_V валент соҳанинг юқори қисмидан электронларнинг вакуумга чиқиши билан боғлиқ. CaF_2 учун электрон майинлиги $\chi \sim 0,1$ эВ. Шунинг учун унинг E_g оралик оралиғининг кенглиги $\sim 12 \text{ eV}$ деб тахмин қилиш мумкин. $E_{\text{фе}} = 7,5$ эВ да ўзига хослик, маълум бир миқдордаги Са нинг фтор билан боғлиқ бўлмаганлиги, ва $E_{\text{фе}} = 4$ эВ да ўзига хосликнинг пайдо бўлиши сирт ҳолатларининг мавжудлиги билан боғлиқ бўлиши мумкин. CaF_2 нинг $D = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ билан Ar^+ ионлари билан бомбардимон қилиниши энергия тақсимот эгри чизикларининг кенгайишига, асосий максимал ($E_{\text{фе}} \approx 14 \text{ eV}$) интенсивлигининг камайишига ва фотоэлектронларнинг квант рентабеллигини, шунингдек спектр бошида (E_V валент соҳасининг чеккаси) паст энергиялар томон силжишига олиб келади. Бундай ҳолда, $E_{\text{фе}} \approx 7,5$ эВ да пик амплитудаси бироз ортади, ~ 4 эВ соҳа текисланади ва CaF_2 тақиқловчи соҳа кенглиги 1,1 - 1,2 эВ га камаяди. $D = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ бўлса, асосий максимал соҳадаги эгри чизик майдони тахминан 3 бараварга камаяди, фотоэлектронларнинг квант рентабеллиги - 2 баробардан кўпроқ ва E_g қиймати 4,5 эВ га, Са тегишли соҳадаги 7,5 - 8 эВ пикнинг интенсивлиги 6-7 марта ортади. $D = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ да CaF_2 диэлектрикининг фотоэлектрон спектрининг тузилиши бутунлай металл-калцийга хос бўлган тузилишга айланади. УФЭС эгри чизигининг тузилишидаги ўзгаришлар, фотоэлектронларнинг квант рентабеллигининг камайиши ва ион дозасининг

ошиши билан ўтувчи ёруғлик интенсивлиги Ca кластер фазаларининг ўлчами катталашини билан изоҳланади (6-расм)

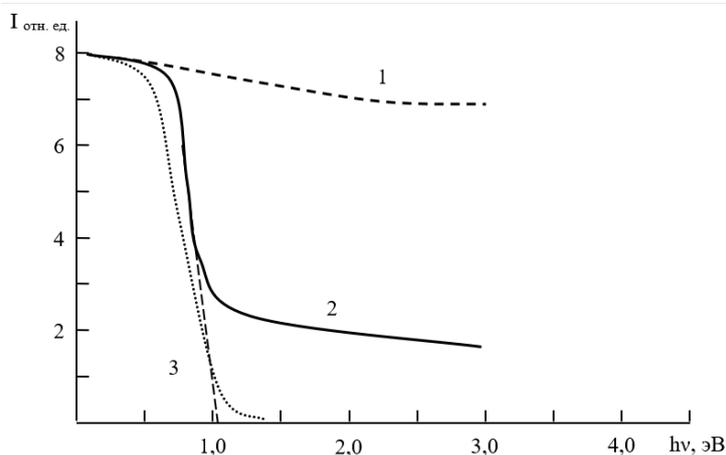


6-расм. Ar^+ ионлари билан нурлантирилган $\text{CaF}_2(111)$ нинг фотоэлектрон спектрлари, $E_0=1$ кэВ билан $D, \text{см}^{-2}$ 1 - 0, 2 - $5 \cdot 10^{14}$, 3 - $5 \cdot 10^{15}$, 4 - $5 \cdot 10^{16}$. $h\nu = 21,2$ эВ.



7-расм. $\text{CaF}_2(111)$ сиртининг Si плёнкаси $\theta \approx 5$ моноқатлам қалинликдаги РЭМ тасвири.

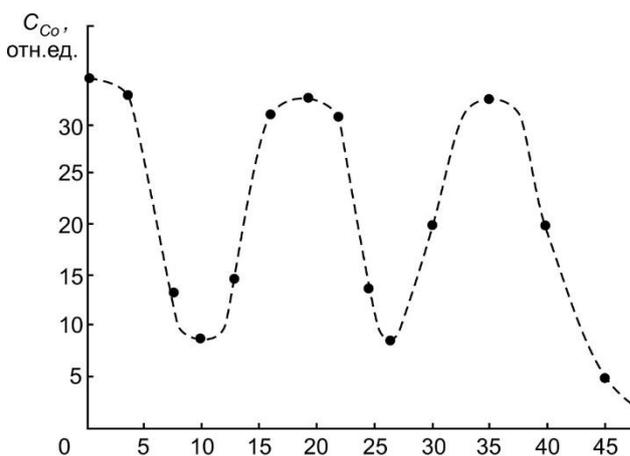
Шу каби усулда $\text{CaF}_2(111)$ юзасида ўсган Si нанопленкаларининг таркиби, кристалл ва электрон тузилишидаги ўзгаришлар ўрганилди. Эпитаксиал Si плёнкаларини олиш учун ҳар бир чанглатиш жараёнидан сўнг тизим T-800 - 900 K да $\theta \approx 10$ та бир қатламли қалинликда қиздирилди. Si пленкаси оролчали характерига эга эди (7-расм). Узлуксиз бир ҳил плёнкалар $\theta \geq 10 - 15$ моноқатламларда ҳосил бўлган. $\theta = 5$ ва 15 моноқатламли қалинликдаги Si плёнкали CaF_2 учун $I(h\nu)$ боғлиқлиқни ўрганиш (8-расм) шуни кўрсатдики, $\theta=5$ моноқатламли плёнкада $h\nu = 0,9 - 1,2$ eV оралиғидаги ёруғлик интенсивлиги 3,5 - 4 марта камаяди (7,5 - 8 дан 2 - 2,2 гача). Бу ҳолда CaF_2 сиртининг 70 - 75% Si плёнка билан қопланган деб тахмин қилиш мумкин. $h\nu = 0,8 - 1,1$ эВ оралиғида $\theta = 15 - 20$ моноқатлам ҳолда деярли 7,5 - 8 дан ногача камаяди, яъни сирт тўлиқ Si атомлари билан қопланади. Қиздиришлардан кейин эпитаксиал Si (111) қатлами ҳосил бўлади.



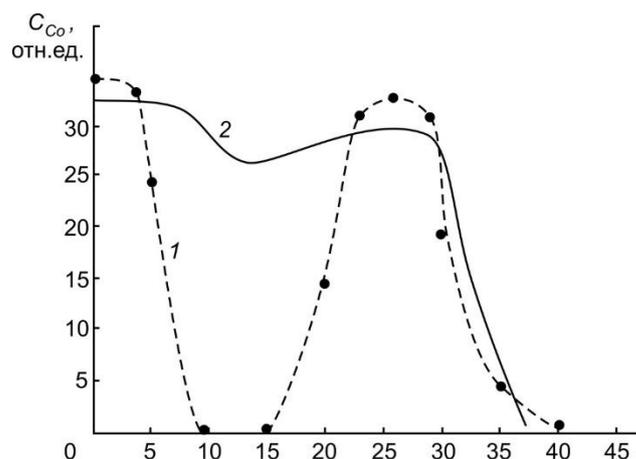
8-расм. Ўтказилган ёруғлик интенсивлигининг фотон энергиясига боғлиқлиги : тоза $\text{CaF}_2(111)$ (1-эгри чизик) ва CaF_2 қалинлиги 5 (2-эгри чизик) ва 15 моноқатлам (3-эгри чизик) қалинликдаги Si плёнкаси билан.

Амалда турли хил Si чуқурликларида $MeSi_2$ наноструктураларини олиш жуда муҳимдир. 9-расмда Co^+ ионлари билан $E_0 = 30, 15$ ва 1 кэВ энергияда кетма-кет имплантация қилинган, Si ни қиздирилгандан сўнг олинган учқатламли $CoSi_2/Si$ тизимининг $C_{Co}(d)$ боғланиши келтирилган. Si нинг сиртида ва сирт ости қатламида $CoSi_2$ наноқатламлар ҳосил бўлиб, сирт қатламининг қалинлиги $4 - 5$ нм, ички қатламларнинг қалинлиги $10 - 12$ нм эканлиги кўриниб турибди. Шунини таъкидлаш керакки, $CoSi_2/Si$ ва $Si/CoSi_2$ оралиғида бўлиниш чегарасида ҳосил бўлган ўтиш қатламлари чегараларининг тўсилиши натижасида бу қатламлар орасида тоза Si қатламлари деярли ҳосил бўлмайди. $E_0 \leq 40-50$ кэВ энергияда уч қатламли $CoSi_2/Si/CoSi_2/Si/CoSi_2/Si$ тизимларини олиш мумкин эмас деб тахмин қилиш мумкин. Аммо, ионларнинг кичик дозаларида Si нинг турли хил чуқурликларида алоҳида нанокристалл $CoSi_2$ фазаларини олиш мумкин.

10-расмда $D = 10^{17} \text{ см}^{-2}$ да $E_0 = 25$ кэВ ва $E_0 = 1$ кэВ бўлган Co^+ ионлари билан имплантация қилинган Si учун Co нинг чуқурлик бўйича тақсимланишининг концентрация профили келтирилган.



9-расм. $E_0 = 30, 15$ ва 1 кэВ га эга бўлган Co^+ ионлари билан имплантация қилинган Si учун Co нинг чуқурлик бўйича тарқалишининг концентрация профиллари; Ҳар бир имплантация давридан кейин қиздириш $T \approx 900$ К да амалга оширилди.



10-расм. $D = 10^{17} \text{ см}^{-2}$ да $E_0 = 25$ кэВ ва $E_0 = 1$ кэВ бўлган Co^+ ионлари билан имплантация қилинган Si учун Co нинг чуқурлик бўйича тақсимланишининг концентрация профили

Биринчи ҳолда (1-эгри чизик) ион имплантациясининг ҳар бир циклидан сўнг, қиздириш $T = 900$ К да 40 минут давомида амалга оширилди. Иккинчи ҳолда, қиздириш имплантациядан сўнг 25 ва 1 кэВ (2-эгри чизик) да амалга оширилди. кетма-кет ион имплантациясидан сўнг қиздириш амалга оширилганда, $CoSi_2$ қатламлари орасида юпқа тоза Si қатлами ҳосил бўлмайди. Кўриниб турибдики, иккинчи ҳолатда Co атомлари турли хил

энергия билан легирланган Si атомлари билан аралаштирилади ва $d = 8-20$ нм ораликда диффузия даражаси кескин камаяди.

Уч хил Si (111) чуқурликда нанокристалл CoSi_2 фазаларини олиш учун ион имплантацияси ва қиздиришнинг оптимал режимларини аниқладик (2-жадвал).

2-жадвал

CoSi_2 нинг нанокристалли фазаларининг ўлчамлари (d), ҳосил бўлиш чуқурлиги (h) ва Co^+ ионларини Si га ҳар хил энергия ва дозаларда жойлаштирилганда ҳосил бўлган нанокристалли фазалар орасидаги масофалар (b)

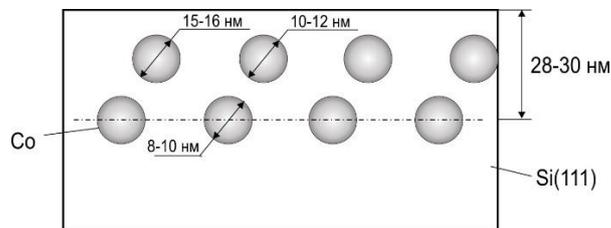
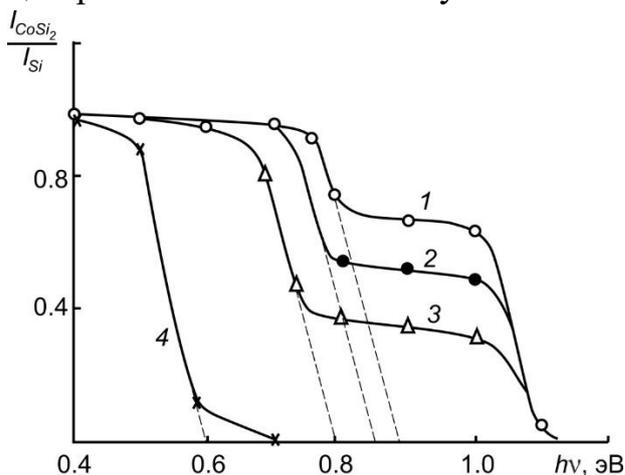
E_0 , кэВ	D , см^{-2}	T , К	d , нм	h , нм	b , нм
1	$5 \cdot 10^{14}$ 10^{15}	850 900	8 – 10 14 – 16	юзада $\theta = 4 - 5$	50 – 60
15	$5 \cdot 10^{14}$ 10^{15}	1000 1000	6 – 8 10 – 12	15 – 16	45 – 50
30	$5 \cdot 10^{14}$ 10^{15}	1000 1000	– 8 – 10	28 – 30	35 – 40

Намуна орқали узатиладиган ёруғлик интенсивлигининг ўзгаришини ўрганиш шуни кўрсатдики, 28 - 30 нм чуқурликда ҳосил бўлган $d = 8 - 10$ нм бўлган нанокристалли CoSi_2 фазалари учун E_g қиймати $\sim 0,85$ эВ, ва бу қатламдаги нанокристалл CoSi_2 нинг нисбий майдони (қопланиш даражаси) $\sim 0,25 - 0,3$ (11-расм). Агар яхлит CoSi_2 плёнкаси учун $E_g = 0,6$ эВ қийматини ҳисобга олсак, бу ҳолда квант-яма эффе́ктлари аниқ намоён бўлади. Ўлчамлари 28-30 нм ва 15-17 нм бўлган икки қатламда нанокристалли фазалар ҳосил бўлиши вақтида (11-расм, 2-эгри чизик) E_g нинг қиймати сезиларли даражада ўзгармайди, лекин сирт қатламини нанокристалл CoSi_2 фазалар билан қоплаш даражаси деярли 1,5-2 баравар ортади.

Икки қатламда ҳосил бўлган нанокристалли фазалар бир-бири билан боғланмайди деб тахмин қилиш мумкин, шунинг учун квантўлчамли эффе́ктлари сақланиб қолади. Қопламанинг кенгайиши юқори қатламнинг нанокристалли фазалари пастки қатламининг нанокристалл фазалари билан қисман қопланишига боғлиқ. Ушбу қатламларнинг жойлашиши схематик равишда кўриниши 12-расмда тасвирланган. D нинг ортиши билан E_g нинг қиймати камаяди ва θ қиймати эса ортади (3-эгри чизик). $D = 8 \cdot 10^{16}$ см^{-2} да доимий CoSi_2 қатлами ҳосил бўлади (4-эгри чизик).

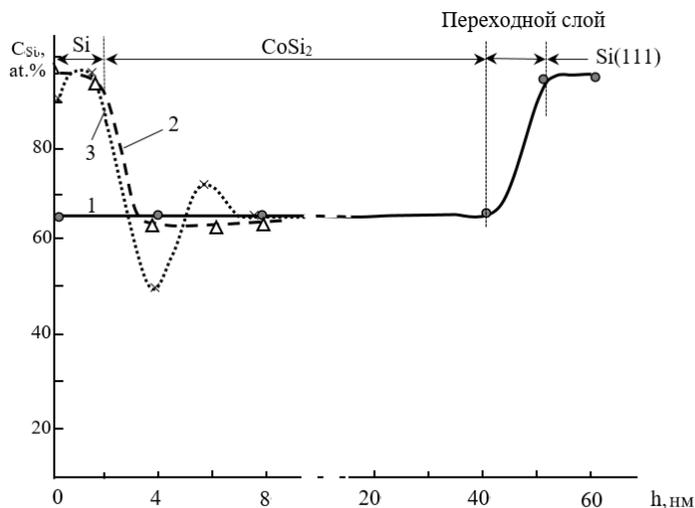
CoSi_2/Si (111) юзасида Ar^+ ионлари билан бомбардимон қилиш орқали биз Si нанопленкаларини олдик (13-расм). Имплантациядан кейинги киздириш 30 дақиқа давомида амалга оширилди. $T = 900$ К да тизимнинг

аморфланган соҳасининг тўлиқ кристалланишига ва Si/CoSi₂/Si(111) типдаги ҳетероэпитаксиал плёнка тузилишига олиб келади.



11-расм. Юза қатламда 28 - 30 нм (1-эгри чизик) ва 15 - 17 нм чуқурликда ҳосил бўлган CoSi₂ нанокристаллари билан Si учун фотон энергиясининг ўтувчи ёруғлик интенсивлигига боғлиқлиги (2 – 4-эгри чизик).

12-расм. Si/CaF₂ сиртга яқин қатламда жойлашган CoSi₂ нанофазаларининг схематик тасвири.



13-расм. CoSi₂/Si (111) тизими учун Si атомларини чуқурлик бўйича тақсимланиши: 1 - бошланғич тизим, 2 - $D=8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ да $E_0 = 2,5 \text{ кэВ}$ бўлган Ar^+ ионлари билан бомбардимон қилинганидан кейин, 3 - $T=900 \text{ К}$ да қиздирилгандан кейин.

3-жадвалда юпқа Si, CoSi₂, Si/CoSi₂ ва CoSi₂/Si(111) плёнкаларининг чегерасидаги ўтиш қатламининг кенглиги энергия диапазонлари параметрлари келтирилган.

Тақиқловчи соҳа кенглиги E_g ва валент соҳа кенглиги E_v ҳолати УФЭС билан аниқланди. Электрон яқинлиги (χ) қийматлари $\chi = E_v - E_g$ формуласи ва иккита яримўтказгичнинг электрон яқинлиги қийматлари фарқидан ўтказувчанлик соҳалари қирраларининг узилишлари билан баҳоланди:

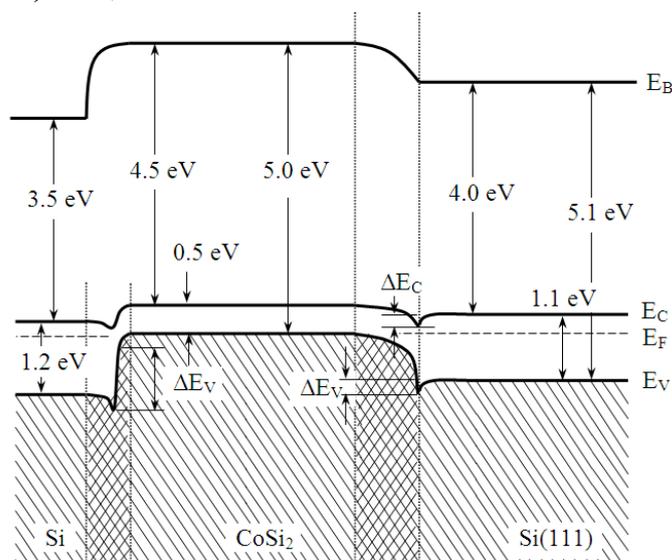
$$\Delta E_c = \chi_1 - \chi_2.$$

Si ва CoSi_2 юпқа плёнкаларининг энергия диапазони параметрлари ва Si/ CoSi_2 ва $\text{CoSi}_2/\text{Si}(111)$ чегарасидаги ўтиш қатламининг кенглиги (Δh).

Параметр	Si ($h = 20 \text{ \AA}$)	CoSi_2 ($h = 500 \text{ \AA}$)	Si (111)
$E_g, \text{ eV}$	1.1 – 1.2	0.5	1.1
$E_v, \text{ eV}$	4.7	5.0	5.1
$\chi, \text{ eV}$	3.5	4.5	4
$\Delta E_c, \text{ eV}$	0.1		0.5
$\Delta E_v, \text{ eV}$	0.3		0.1
$\Delta h, \text{ \AA}$	15 – 20		60 – 80

Бир электрон назарияни инобатга олсак, тақиқланган соҳалар кенглиги орасидаги фарқ , $\Delta E_g = \Delta E_c - \Delta E_v$, $\Delta E_g = E_{g2} - E_{g1}$ бўлади. Бу боғлиқликни ҳисобга олган ҳолда, $\Phi = \chi + E_g$ биз валентлик соҳалар қирраларининг ажралишини оламиз, яъни $\Delta E_g = \Phi_2 - \Phi_1$

Si/ CoSi_2 нанопленкаси билан контактлашиши ушбу формулаларига асосан: - $\Delta E_c = 0,3 \text{ эВ}$; $\Delta E_v = 0,1 \text{ эВ}$ ва $\text{CoSi}_2/\text{Si}(111)$ контакт учун: $\Delta E_c = 0.5 \text{ эВ}$, $\Delta E_v = 0.1 \text{ эВ}$.

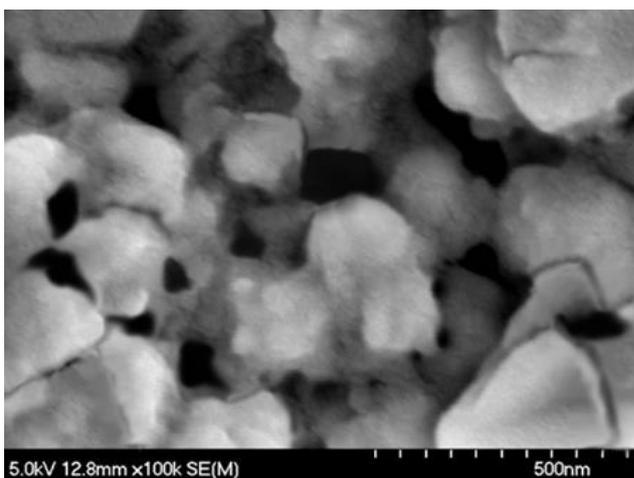


14-расм. Si/ CoSi_2 /Si (111) тизими учун энергия соҳасининг диаграммаси.

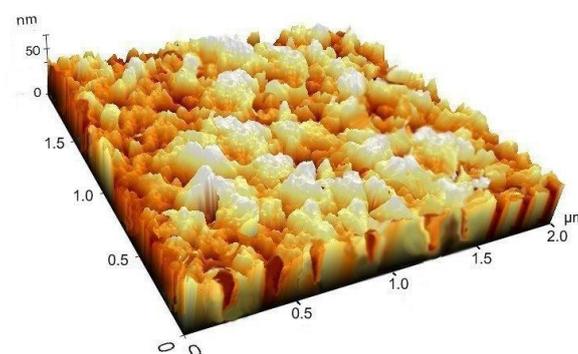
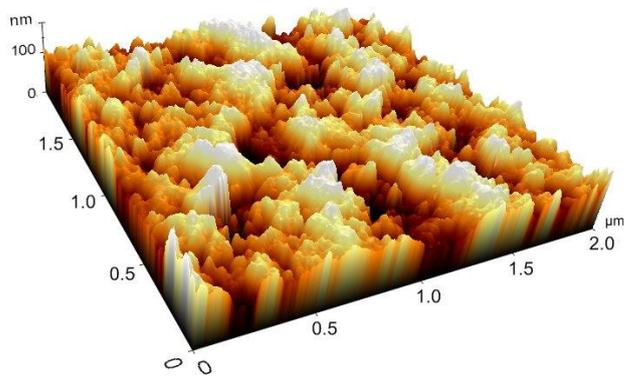
Бешинчи бобда "Ион имплантацияси ва қиздиришнинг CdTe таркибига, эмиссиясига ва оптик хусусиятларига, кристалли ва электрон тузилишига таъсири" яъни: Ag^+ ва Ba^+ ионлари орқали наноўлчамли бир ва кўпкомпонентли CdTe юзасида ва сирт сирт ости соҳасида нанофазалар ва қатламларни ҳосил қилиш, уларнинг электрон ва кристалли тузилишини, эмиссия ва оптик хусусиятларини ўрганиш бўйича биринчи марта экспериментал тадқиқот натижалари келтирилган.

15-расмда юқори вакуумда CdTe/Мо (111) плёнкаси юзасининг РЭМ тасвири кўрсатилган.

16(a) -расмдан кўриниб турибдики, плёнка 100-200 нм ўлчамдаги кўпқиррага яқин шаклга эга бўлган алоҳида доналардан (блоклардан) иборат. Доналар чегараларининг кўп қисми бир-бирига тўғри келади. Доналар орасида узунлиги 50 - 60 дан 200 - 250 нм гача бўлган ҳар хил шаклдаги коваклар мавжуд. АКМ тасвирини таҳлил қилганимизда, сирт нотекисликларининг тахминий қийматлари ўртача 50 - 60 нм, максимал даражада эса 100 - 120 нм га тенг эканлиги аниқланди. 16(б)-расмда атомларнинг сирт концентрацияси қуйидагича тақсимланган: Cd ~ 45 ат.%, Те ~ 52 ат.%, О ~ 1 ат.% и С ~ 2 ат.%. $E_0 = 5$ кэВ бўлган Ag^+ ионлари билан сиртни бомбардимон қилинганда CdTe сиртининг таркиби ва микрорельефи кескин ўзгариши тасвирланган. $T = 1000$ К да 30 минут давомида термоишлов берилгандан сўнг сирт сезиларли даражада силлиқлашади, яъни тартибсизликлар 20-30 нм дан ошмайди ва доналар ҳажми 20-40 нм бўлади.



15-расм. Юқори вакуумда CdTe плёнкаси юзасининг РЭМ тасвири



16-расм. Сиртнинг АКМ тасвири: *a* –CdTe нинг дастлабки пленкаси, *б* –CdTe Ag^+ ионлари билан имплантация ($E_0 = 5 \cdot 10^{16}$ см⁻²) ва $T = 800$ К қиздиришдан кейинги ҳолати

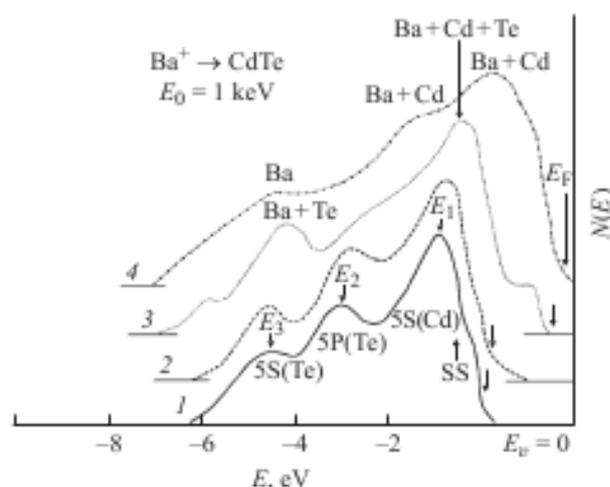
Бундай ҳолда, поликристал тузилиш тикланади ва стехиометрик таркиби $Cd_{0.5}Te_{0.5}$ га жуда яқин эканлиги аниқланди (4-жадвал).

4-жадвал

$CdTe$ плёнкасининг $E_0 = 5$ кэВ энергияда Ar^+ ионлари билан таъсирлашувдан олдин ва кейин Φ , σ_m ва E_g , қийматлари

Катгаликлар	CdTe оригинал	$Ar^+ \rightarrow CdTe$	
		қиздиришгача	$T = 800$ К қиздиришдан сўнг
Φ , эВ	5,65	–	6,1
σ_m	1,8	1,2	1,95
E_g , эВ	1,45	0,8	1,55
C_{Te}/C_{Cd} , ат.%	52/45	71/26	50/48

17-расмда турли хил дозаларда энергияси $E_0 = 1$ кэВ бўлган барий ионлари билан имплантацияланган $CdTe$ (110) учун $h\nu = 10,8$ эВ да олинган фотоэлектронларнинг спектрлари кўрсатилган.



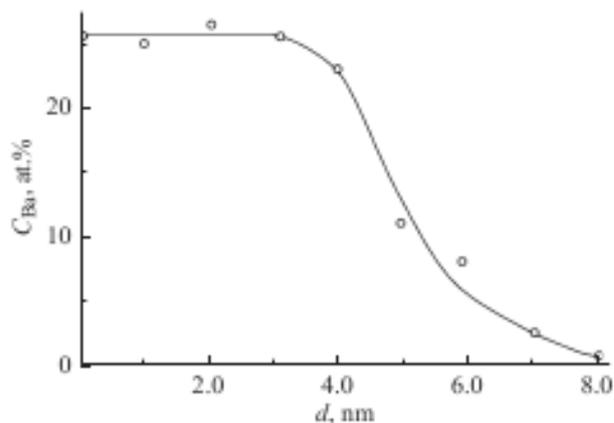
17-расм. Ba^+ ионлари билан имплантация қилинган $CdTe$ фотоэлектрон спектрлари, $E_0 = 1$ кэВ энергия билан хар хил дозаларда D , $ион \cdot см^{-2}$: 1 – 0, 2 – $2 \cdot 10^{14}$, 3 – 10^{15} , 4 – $6 \cdot 10^{16}$; $h\nu = 10,8$ эВ.

Тоza $CdTe$ спектри сирт ҳолатлари (SS), Cd (E_1) нинг 5s электронлари кўзғалиши, шунингдек Te нинг 5p (E_2) ва 5s (E_3) электронлари борлиги сабабли юқори амплитудали пикларни ҳосил қилади. Ион дозасига қараб Ba^+ ионларини имплантацияси спектр бошида юқори энергиялар томон силжишига, чўққиларининг шакли ва ҳолатининг ўзгаришига ва янги чўққилар пайдо бўлишига олиб келади. $D = 10^{15}$ $ион \cdot см^{-2}$ нурланиш дозасида эса $E_{св} \approx -4$ эВ ва $+1.7$ эВ энергияларида янги чўққилар пайдо бўлади.

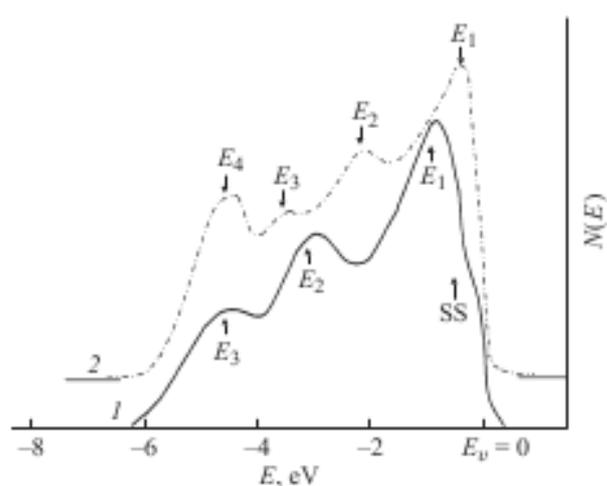
$E_{св} \approx -4$ eV энергияли чўққи $Ba+Te$ типигаги бирикма ҳосил бўлишига боғлиқ, чунки бу дозада сирт Te атомлари билан бойитилади. $E_{св} \approx +1.7$ эВ энергияли чўққи билан энг юқори даража, ҳар хил нуқсонларнинг пайдо бўлиши сабабли, $CdTe$ нинг ўтказувчанлик соҳасининг пастки қисмига яқин

бўлган тор электрон ҳолатларнинг шаклланиши билан боғлиқ. Асосий пик (E_3) ҳолатининг силжиши $Ba + Cd + Te$ типдаги бирикманинг ҳосил бўлиши билан боғлиқ бўлиши мумкин. Тўйиниш дозасида $(4 - 6) \cdot 10^{16}$ ион \cdot см $^{-2}$ спектр асосан Ba ва $Ba + Cd$ га хос бўлган пикларни ўз ичига олади, яъни, сиртнинг "металлизацияси" содир бўлади ва E_g қиймати нолга яқинлашади (жадвалга қаранг).

Ушбу намунанинг имплантациядан кейинги $T = 1000$ К да 30 минут давомида қиздириш қалинлиги 35 - 40 Å бўлган уч компонентли $Cd_{0.5}Ba_{0.5}Te$ бирикма ҳосил бўлишига олиб келди (18-расм).



18-расм. Ba атомларининг $Cd_{0.5}Ba_{0.5}Te/CdTe$ тизими учун чуқурлик бўйича тақсимланиши.



19-расм. Фотоэлектрон спектрлар: 1 – $CdTe$ пленкаси, 2 – $Cd_{0.5}Ba_{0.5}Te/CdTe$ нанопленкаси.

Уч компонентли нанопленканинг валент электронлари ҳолатининг зичлиги, матрицадаги электронлар ҳолати зичлигидан кескин фарқ қилади - $CdTe$ (19-расм). УФЭС спектрларини таҳлил қилиш асосида ўрганилаётган плёнкаларнинг энергетик зоналарининг параметрлари аниқланди (5-жадвалга қаранг).

5-жадвал

Ўрганилаётган плёнкаларнинг энергия диапазони параметрлари

Катталиклар, эВ	$CdTe$ пленкаси	$Ba^+ \rightarrow CdTe$, $E_0 = 1$ кэВ, $D = 6 \cdot 10^{16}$ ион \cdot см $^{-2}$	$Cd_{0.5}Ba_{0.5}Te$
E_v	5,65	2,4	5,4
E_F	4,30	2,4	—
E_g	1,45	0	1,7
χ	4,20	2,4	3,7

20-расмда соф моноқатламли $\theta \sim 0.3$ Cs плёнкали тоза $CdTe$ ва $CdTe$ учун $E_p = 5$ эВ да олинган $N(E_2)$ спектрларини кўрсатилган. E_2 - иккиламчи электронларнинг энергияси. E_2 ўқидаги нол $CdTe$ плёнкасининг вакуум даражасига тўғри келади. Cs билан чанглантирилгандан сўнг ҳақиқий иккиламчи электронларнинг вакуумга тушиши кўпаяди ва спектрнинг

бошланиши паст энергия $\sim 2,6$ эВ томонга қараб ўзгаради, яъни потенциал тўсиқ (χ электрон яқинлиги) 2,6 эВ га камайишини кўрсатади. Бундан спектрнинг ушбу қисмида $E_{c1} = -1$ ва $E_{c2} = -1.9$ эВ энергия (E_v га нисбатан $E_{c1} = 3.5$ ва $E_{c2} = 4.4$ эВ энергия) аниқланди. Ушбу хусусиятлар ўтказувчанлик зонасидаги электрон ҳолатларнинг зичлиги максимал даражасига тўғри келишини кўрсатади. Cs плёнкасининг қалинлигини 0,5-0,6 моноқатламгача ошириш орқали $\chi \sim 3-3,5$ эВ га камайтириш мумкин. Шунингдек $\theta \sim 0,4-0,5$ моноқатламдан бошлаб, спектрда Cs атомлари билан боғлиқ хусусиятлар пайдо бўлади.

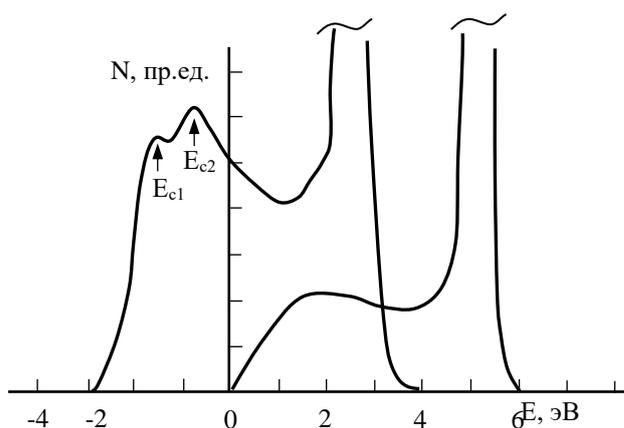
Бундай тадқиқотлар $Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ пленкаси учун ҳам ўтказилган. Фото-, ҳақиқий иккиламчи ва эластик қайтган электронларнинг спектрларини таҳлил қилиш асосида энергетик соҳаларнинг параметрлари, валент ва ўтказувчанлик зоналарининг электрон ҳолатлари зичлиги баҳоланди (6-жадвал). Ҳисоблашларда E_v валентлик зонасининг юқори қисми нолга тенглаштирилди.

6-жадвал

E_v валент соҳасининг юқори қисмига нисбатан CdTe ва $Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ учун фото-, ҳақиқий-иккиламчи ва эластик қайтган электронлар спектридаги энергетик зона параметрлари ва максимумларнинг энергия ҳолатлари

Ўргани- лувчи объект	Φ , эВ	E_g , эВ	χ , эВ	УФЭС		ҲИЭ спектрлари		$dR/dE_p(E_p)$	
				$E_{св}$, эВ	Интер- претация	E_c , эВ	Интер- претация	E , эВ	Интер- претация
CdTe(111)	5.4	1.4 8	3. 95	1	$E_{пр}$	3,5	E_{c1}	1,5	$E_v \rightarrow E_c$
				- 0,5	$E_{пс}$	4,4	E_{c2}	4,3	$E_1 \rightarrow E_{c1}$
				-1	E_1				
				- 1,8	-			5,5	$E_v \rightarrow E_B$
				- 2,4	E_2			8,1	$E_3 \rightarrow E_{c1}$
				- 4,5	E_3			11,2	$E_3 \rightarrow E_B$
$Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$	5.6	1.7 1	3. 9	1.1	$E_{пр}$	3	E_{c1}	1.8	$E_v \rightarrow E_c$
				- 0.4	$E_{пс}$	4.2	E_{c2}	4.4	$E_1 \rightarrow E_{c1}$
				- 1.2	E_1			5.5	$E_1 \rightarrow E_{c2}$ $E_2 \rightarrow E_{c1}$
				- 2.3	E_2			6.9	$E_2 \rightarrow E_{c2}$ $E_3 \rightarrow E_{c1}$
				- 3.7	E_3			7.9	$E_3 \rightarrow E_{c2}$ $E_4 \rightarrow E_{c1}$
				-5	E_4				

E_B –вакуум сатҳи.



20-расм. $E_p=5$ эВ энергияда олинган спектрлар $N(E_2)$: тоза CdTe учун (1-эгри чизик) ва субмоноқатламли CdTe ($\theta \approx 0,2$) Cs (2-эгри чизик) пленкаси

7-жадвалда 15 ва 30 кэВ энергияли Va^+ ионлари билан имплантация қилинган CdTe учун олинган d_m (Va нинг тақсимланишининг максимал даражасига тўғри келадиган чуқурлик) C_m (Va нинг максимал концентрацияси), Δd (тақсимланиш эгри чизигининг ярим кенглиги - $Cd_{0.5}Va_{0.5}Te$ қатламининг қалинлиги) қийматлари кўрсатилган, қиздиришдан олдин ва кейин $D = D_n$ га тенг ($E_0 = 30$ кэВ тўйиниш дозаси $3 \cdot 10^{17}$ cm^{-2} бўлса, $T_{opt} = 1100$ К).

7-жадвал

Va^+ ионлари билан имплантацияланган CdTe учун d_m , C_m , Δd қийматлари

Катгалик	Қиздириш	E_0 , кэВ	
		15	30
d_m , нм	Олдин	9-10	16-18
	Кейин	8-9	16-18
C_m , ат.%	Олдин	20-22	13-15
	Кейин	26-28	18-20
Δd , нм	Олдин	12	20
	Кейин	7-8	9-10

Жадвалдан кўришиб турибдики, ион энергиясининг ортиши билан тақсимланишнинг максимал даражаси юқори томонга силжийди, тақсимланиш эгри чизигининг ярим кенглиги ошади ва максимал даражадаги барий концентрацияси камаяди. $E_0 = 30$ кэВ учун қиздирилгунга қадар ва қиздирилгандан кейин d_m қийматлари бир-биридан кам фарқ қилади. Иситгандан сўнг, максимумдаги Va концентрацияси деярли 2 баробар ортади ва ~ 20 нм қалинликдаги $Cd_{0.6}Va_{0.4}Te$ қатлами ҳосил бўлади.

ХУЛОСА

1. Nb сиртини Mo^+ , Ba^+ , Na^+ ва Cs^+ ионлари билан бомбардимон қилганда уни электрон ва кристалл тузилиши, эмиссияси ва оптик хусусиятлари ўзгаришларининг асосий механизмлари аниқланди. Mo^+ ионларини Nb га имплантацияланиб термо ишлов берилгандан сўнг ионли легирланган қатламларнинг электрон тузилишида кескин ўзгариш содир бўлиши аниқланди, бу эса Nb_xMo_y типдаги интерметал бирикма ҳосил бўлиши билан изоҳланади.
2. Mo сиртининг оксидланишининг Mo юзасидан ишқорий метал ионларининг сочилиш коэффициентига таъсири назарий ва экспериментал равишда ўрганилди. Nb ва Mo кислородли муҳитда қиздирилганда, уларнинг сирт қатламларида ушбу металлларнинг стехиоетрик бўлмаган оксидлари ҳосил бўлиши кўрсатилган. Бу оксидлар $T = 1500 - 1800$ К ҳароратгача буғланмайди.
3. Si монокристаллини Ag^+ ионлари билан бомбардимон қилганда унинг электрон тузилишига таъсири биринчи марта ўрганилди. Кристалл сиртининг тартибсизлигининг валент электронлари ҳолатининг зичлигига таъсири назарий жиҳатдан тавсифланган. Валент электронлари ҳолатининг зичлигининг асосий максимал энергиясининг силжиши қийматининг нурланиш дозасига боғлиқлиги баҳоланди.
4. $CoSi_2/Si/CoSi_2/Si$ ва $SiO_2/Si/CoSi_2/Si$ кўп қатламли тизимни олиш учун ион имплантацияси (энергия, доза) ва ундан кейин қиздириш (ҳарорат ва вақт) учун оптимал шароитлар аниқланди. Уларнинг электрон тузилиши, эмиссияси ва оптик хусусиятлари ўрганилди.
5. Биринчи марта Si сирт соҳасининг 2 ва 3 қатламларида наноўлчовли $CoSi_2$ фазалари олинди. 28-30 нм чуқурликда ҳосил бўлган $d = 8 - 10$ нм бўлган $CoSi_2$ нанофазалари E_g 0,85 эВ га тенг бўлиб, қоплаш даражаси 0,25 - 0,3 эканлиги аниқланди. Худди шу нанофазларнинг иккинчи қатламини яратишда ушбу тизимнинг E_g қиймати деярли ўзгармайди ва қопшал даражаси 1,5 - 2 бараваргача ортади.
6. Биринчи марта Ag^+ ионлари билан бомбардимон қилиш орқали $CoSi_2/Si(111)$ гетероструктураси юзасида олинган Si наноструктураларининг электрон ва кристалли тузилиши ўрганилди. $E_0 = 1$ кэВ ва $D = 10^{14} - 5 \cdot 10^{15}$ см⁻² да нанокристалл Si фазалар шаклланади, $D \geq 4 \cdot 10^{16}$ см⁻² да қалинлиги $\sim 10 - 15$ Å бўлган текис Si плёнка ҳосил бўлиши кўрсатилди.
7. ГФЭ усули билан олинган поликристалл CdTe плёнкалари 100-200 нм латерал ўлчамлари билан кўпбурчакка яқин шаклга эга бўлган алоҳида доналардан (блоклардан) иборат эканлиги аниқланди. Доналар орасида узунлиги 50 дан 250 нм гача бўлган ҳар хил шаклдаги коваклар мавжуд. Бу ҳолда сиртдаги тартибсизликлар ўртача 50-60 нм ни ташкил қилади. Биринчи марта сиртни Ag^+ ионлари билан $E_0 = 5$ кэВ билан 70-80° бурчак остида ишлангандан кейин ва кейин қиздиришдан сўнг, CdTe юзаси сезиларли даражада силлиқ бўлади, тартибсизликларнинг ўлчамлари

- камаяди. Бундай ҳолда, фотоэлектрон спектрда Те нинг 5p ва 5s электронлари ва Cd нинг 5s электронлари қўзғалиши натижасида аниқ хусусиятлар намоён бўлади.
8. Биринчи марта Ва ионлари билан бомбардимон қилинган CdTe сиртининг электрон тузилишидаги ўзгаришлар динамикаси ўрганилди. Ва ионларининг имплантацияси, ионларнинг энергияси ва дозасига қараб, Ва + Те, Ва-Cd-Те, Ва-Cd типдаги бирикмалар ҳосил бўлиши, сирт қатламининг тартибсизлиги ва субатомик Ва қатламларининг ҳосил бўлиши кўрсатилган. Ушбу омилларнинг ҳар бирининг валент электронлари ҳолати зичлигининг ўзгаришига қўшган ҳиссалари баҳоланади.
 9. Биринчи марта $E_0 > 10$ кэВ билан Ва⁺ ионлари билан имплантация қилинганида CdTe нинг сирт ва сиртга ости соҳаларининг таркиби, тузилиши ва электрон хоссалари ўзгариши динамикаси ўрганилди. Ионли легирланган қатламлар жуда мураккаб таркибга эга, чуқурлиги ҳар хил ва торзонали яримўтказгич хусусиятларига эга эканлиги кўрсатилган. Тақикловчи соҳа кенглиги 0,3-1,2 эВ ораликда ўзгариб туради.
 10. Биринчи марта Cd_{0,5}Va_{0,5}Te ва Cd_{0,6}Zn_{0,4}Te нинг наноўлчамли фазалари ва қатламлари CdTe юзасида ва турли чуқурликларида қиздириш билан биргаликда Ва⁺ ва Zn⁺ ионларини имплантация қилиш усули билан олинди. Хусусан, Cd_{0,5}Va_{0,5}Te сиртий пленкасининг $E_g d \approx 20$ Å қалинликда $\sim 1,9$ эВ, шунингдек $d \geq 35 - 40$ Å да эса 1,7 эВ ни ташкил этади.
 11. Si, CaF₂ ва CdTe асосидаги янги физик хусусиятларга эга наноўлчамли тизимларни олишнинг оптимал шартлари аниқланди ва уларни қаттиқ жисмлар электроникаси учун самарали қурилмалар яратишда қўллаш бўйича илмий асосланган тавсиялар берилди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА НАУК DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 ПРИ ИНСТИТУТЕ
ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ АН РУз**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. И. КАРИМОВА**

ЭРГАШОВ ЁКУБ СУВОНОВИЧ

**ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ФОРМИРОВАНИЯ И ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР, СОЗДАНЫХ В
ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ КРИСТАЛЛОВ Nb, Si, CdTe
И CaF₂ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКОЙ**

01.04.04– Физическая электроника

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА (DSc) ФИЗИКО-
МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК**

Ташкент – 2020

Тема докторской (DSc) диссертации зарегистрирована в высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за №B2020.4.DSc/FM167.

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

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещён на веб-странице Научного совета (<http://iplt.uz/>) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный консультант:	Умирзаков Болтаходжа Ерматович доктор физико-математических наук, академик
Официальные оппоненты:	Нормуродов Муродилла Тогаевич доктор физико-математических наук, профессор
	Расулов Акбарали Махаматович доктор физико-математических наук, профессор
	Усманов Дилшадбек Турсунбаевич доктор физико-математических наук
Ведущая организация:	Ургенчский государственный университет

Защита диссертации состоится «___» _____ 2020 г. в ___ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.30.12.2019.FM.65.01 при Институте ионно-плазменных и лазерных технологий по адресу: 100125, г. Ташкен, ул. Дурмон йули 33. Тел./Факс: (+99871) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ионно-плазменных и лазерных технологий (зарегистрирован за №___), по адресу: 100125, г. Ташкен, ул. Дурмон йули 33. Тел: (+99871) 262-31-69.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2020 г.
(протокол реестра №___ от «___» _____ 2020 г.).
года).

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

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

Ш.Д. Пайзиев
Председатель Научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., с.н.с.

ВВЕДЕНИЕ (аннотация докторской (DSc) диссертации)

Актуальность и востребованность темы диссертации. В последние годы резко возрос интерес к получению и изучению свойств наноразмерных многослойных полупроводниковых гетероструктур. Эти структуры перспективны для создания СВЧ-транзисторов, диодов, оптических резонаторов, электронных и магнитных запоминающих устройств, а также омических контактов и барьерных слоев для наноразмерных структур. Низкоэнергетическая ионная бомбардировка является одним из перспективных методов создания наноразмерных структур на поверхности и в приповерхностной области материалов различной природы. Установлено, что ширина запрещенной зоны E_g в нанокристаллических фазах силицидов металлов в зависимости от их объемов может изменяться в пределах 0.6–1 эВ. Результаты экспериментальных работ показали, что совершенство и свойства пленок во многом зависят от метода синтеза, от их толщины и морфологии поверхности. При изготовлении гетеропереходов на их границе формируется высокоомный слой вследствие взаимной диффузии атомов одного полупроводника в другой. Однако до сих пор имеются разногласия относительно природы и состава этого слоя. Многие исследователи считают, что высокоомный слой представляет собой твердый раствор. Свойства промежуточного твердого раствора в основном зависят от подбора оптимальных режимов технологического процесса (температуры подложки и продолжительности процесса).

Получение и изучение физико-химических свойств наноструктур и нанослоев в различных глубинах приповерхностной области материалов различной природы и создание на их основе нанопленочных гетероструктур является **актуальной научной задачей** современной физической электроники. В этом аспекте укрепление обладающей новыми качественными свойствами материальной базы, а также улучшение качества путем введения в кристаллы дополнительных элементов в свете современных требований, совершенствование их технологии достигнуты существенные результаты. Укрепление элементной базы производимых в области нано- и микроэлектроники физической электроники, расширение функциональных свойств, обеспечивающих их широкое применение, имеет важное значение.

С практической точки зрения, эти системы имеют большие перспективы при создании различных оптических и электронных устройств, солнечных элементов и фоточувствительных приборов. В этом аспекте целевые научные исследования, в том числе реализация в нижеприведенных направлениях: проведение имплантации ионов металлов при различных энергиях и дозах; проведение бомбардировки ионами металлов и изучение закономерностей и механизмов образования наноразмерных фаз в полупроводниках путем последовательного термического отжига; исследование влияния распыления заряженных металлов на формирование тонких оксидных пленок кремния.

В данной работе в качестве основного метода получения нанофаз и нанослоев применялся метод ионной имплантации. Данное диссертационное

исследование в определенной степени соответствует задачам, предусмотренных в Указе Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 года, в Постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организаций, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года и №ПП-4422 «Об ускоренных мерах по повышению энергоэффективности отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии» от 22 августа 2019 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в Республике за последние годы данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан: Ф2 «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение» и ППИ-3 «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение, транспорт, машино- и приборостроение, развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники и электронного приборостроения».

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации²

Получением и изучением физических свойств наноразмерных структур, выяснением механизмов их формирования в настоящее время занимаются научно-исследовательские центры, институты, университеты ведущих стран мира: Atomic-Scale Surface Science Research Center and Department of Physics, Yonsei University, Seoul (южная Корея), Lehrstuhl für Festkörperphysik, Universität Erlangen-Nürnberg, Staudtstrasse Erlangen (Германия), Sektion Physik Universität München (Германия), Departamento de Fisica de la Materia Condensada, Universidad Autonoma de Madrid (Испания), Department Electrical and Computer Engineering, University of California (США), Watson Research Center, Yorktown Heights, NY (США), Centre de Recherche sur les Mecanismes de la Croissance Cristalline Campus de Luminy Marseille (Франция), Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo (Япония), Advanced Institute for Materials Research (WPI-AIMR), Tohoku University (Япония). В Московском государственном университете, в Физико-техническом институте РАН и др. проводятся экспериментальные и теоретические исследования и получены новые важные научные результаты и установлены ряд закономерностей образования наноразмерных структур на поверхности и приповерхностной области твердых тел при МЛЭ, ТФЭ, ГФЭ - роста и ионной бомбардировке.

В частности, в настоящее время в кремниевой МОП – технологии при создании омических контактов и барьерных слоев широко используется

² Обзор международных научных исследований по теме диссертации проведен на основе: Atomic-Scale Surface Science Research Center and Department of Physics; Yonsei University; Lehrstuhl für Festkörperphysik, Universität Erlangen-Nürnberg; Fisica de la Materia Condensada, Universidad Autonoma de Madrid; Department Electrical and Computer Engineering, University of California; Watson Research Center, Yorktown Heights; Advanced Institute for Materials Research (WPI-AIMR), Tohoku University;

самосовмещающий процесс SALICIDE (Self-Aligned-silicide), который для создания топологического рисунка контактной системы транзистора не требует проводить литографию. Технологический подход, SALICIDE также может быть использован при создании приборных композиций SAN (Self-Aligned-Nanostructures), например, на основе CoSi_2 , образованного поверх островков кремния на тонком диэлектрике [Electrical and Computer Engineering, University of California, USA].

По направлению диссертационной работы решены ряд актуальных проблем и получены важные научные результаты: Экспериментально выявлены основные механизмы увеличения эмиссионной эффективности и стабильности параметров к внешним воздействиям сплавов NbMo, активированных в газовых средах (Ч.Б.Дюбуа и др., АО «НПП Исток», г. Фрязино, РФ); с использованием математического моделирования и экспериментальных методов для полупроводниковой сверхрешетки CoSi_2/Si показано подавление внутризонной статической отрицательной дифференциальной проводимости в условиях сильного взаимодействия между минизонами и негармонического закона дисперсии электронов (Ю.Ю. Романова и др., Институт физики микроструктур РАН); на вольтамперной характеристике периодической системы Si/CaF_2 обнаружено отрицательное дифференциальное сопротивление (С. Менард и др., Центр по изучению механизмов роста кристаллов, Марсель, Франция).

Были выявлены основные механизмы туннелирования электронов и дырок через диэлектрический барьер нанопленочных систем типа CaF_2/Si , $\text{Au}/\text{CaF}_2/\text{Si}$ и даны научно-обоснованные рекомендации по применению этих систем в резонансно- туннельных диодах, полевых транзисторах и др. [Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo, Japan; Ioffe Physico-Technical Institute, Russian Academy of Sciences].

Степень изученности проблемы. В связи с широким использованием и перспективности в создании новых приборов функциональной электроники изучению состава, структуры и свойств материалов различной природы с наноразмерными структурами в последние годы посвящено большое число работ. Ю.Ж. Тулеушевым и др. ионно-плазменным распылением и осаждением впервые получены твердые растворы Te в Cd , Cd в Te . Установлено, что с повышением концентрации Cd в покрытия параметр кубической решетки CdTe увеличивается. Оценка размеров кристаллических частиц дала величину зерен CdTe 10 – 15 нм, что позволяет отнести покрытия к нанокристаллическим структурам.

Н.А.Герасименко и др. изучали закономерности и механизм формирования наноразмерных структур в полупроводниках при ионной имплантации. Особенно интересными в плане получения квантовых точек с помощью ионного распыления представляют результаты, полученные S.Facsko, T.Dekorsy и C.Koerdт. Они, бомбардировкой поверхности $\text{GaSb}(100)$ ионами Ag^+ получили гексагональную кристаллическую структуру из квантовых точек диаметром 35 нм. S.Menard, M.Liniger, Ю.А. Берашевич,

В.Е.Борисенко и др. предложили кинетическую модель переноса носителей заряда в периодических наноразмерных структурах Si/CaF₂ по локализованным состояниям в диэлектрике. На основе этой модели объяснены зарядовые эффекты контролируемые токовый гистерезис и отрицательное дифференциальное сопротивление в периодических наноразмерных структурах.

В работах профессора Б.Е.Умирзакова, М.Т.Нормурадова и др. впервые методом низкоэнергетической ионной бомбардировки получены одно и многокомпонентные наноразмерные кристаллические фазы и пленки на поверхности металлов, полупроводников и диэлектрических пленок. Показано, что при $d \leq 50-60 \text{ \AA}$ с уменьшением толщины нанопленки увеличивается ширина запрещенной зоны и значения постоянной решетки «а». Выяснены основные механизмы формирования многокомпонентных наноразмерных структур.

В настоящее время имеется большое число экспериментальных и теоретических работ, посвященных созданию и изучению физико-химических свойств и механизмов образования многослойных гетероэпитаксиальных и наноразмерных структур на основе материалов различной природы. При этом метод низкоэнергетической ионной бомбардировки, в основном, применялся для получения наноразмерных структур в поверхностном слое материалов. До начала настоящей работы метод ионной имплантации практически не применялся для получения наноразмерных гетероструктур в тонком приповерхностном слое и создания двух- и трехслойных гетерослоев на основе полупроводниковых пленок. Не изучены размеры, состав, структура, электронные свойства и механизмы образования наноразмерных структур, созданных в приповерхностном слое материалов.

Связь темы диссертации с исследованиями научно-исследовательской организации, где выполнена диссертационная работа. Работа выполнена в Ташкентском государственном техническом университете в рамках Государственной программы научно-исследовательских работ РУз и проектов № ОТ-Ф2-53 «Квантово-размерные эффекты и электронные свойства двухслойных наноразмерных структур, созданных на поверхности и в приповерхностной области пленок A³B⁵ и A²B⁶» (2017-2020 гг.); № А-4-7 «Разработка технологии синтеза гетероэпитаксиальных наноразмерных структур в приповерхностной области монокристаллических пленок кремния и арсенида галлия для приборов микро- и оптоэлектроники, в том числе солнечной энергетики» (2015-2017 гг.); MRB-ОТ-2019-28 «Разработка физических основ формирования наноструктурированных силикатных стекол с улучшенными теплофизическими свойствами» (2019-2021 гг.).

Цель работы: установление физических закономерностей и выяснение механизмов формирования наноразмерных фаз и слоев на поверхности и приповерхностной области Mo, Nb, Si, CdTe, CoSi₂ и CaF₂ при ионной

бомбардировке и вакуумном напылении, изучение их состава, структуры, электронных и оптических свойств.

Задачи исследования:

выяснена механизмов изменения эмиссионных и оптических свойств Nb при бомбардировке ионами тугоплавких и активных металлов;

теоретическое и экспериментальное изучение влияния окисления поверхности Mo и Nb на коэффициент рассеяния ионов щелочных металлов;

экспериментальное исследование влияния бомбардировки ионами Ar⁺ на спектр валентных электронов монокристаллического Si. Оценить взаимосвязь между изменениями максимума плотности состояния валентных электронов Si от энергии и дозы облучения Ar⁺. Дать теоретическое объяснение наблюдаемым изменениям;

получение и изучение кристаллической и электронной структуры наноразмерных фаз и слоев CoSi₂, созданных на нескольких слоях приповерхностной области Si. Получение и изучение структуры, эмиссионных и оптических свойств многослойной системы типа SiO₂/Si/CoSi₂/Si;

изучение электронной и кристаллической структуры нанокристаллов и пленок Si созданных на поверхности гетероструктуры CoSi₂/Si (111);

определение состава, морфологии поверхности, параметров кристаллической решетки, энергетических зон и эмиссионных свойств пленок CdTe выращенных на поверхности Mo (111) методом ГФЭ до и после травления ионами Ar⁺;

изучение процессов формирования эпитаксиальных наноструктур CdMeTe (Me – Ba, Zn) на поверхности и в приповерхностной области CdTe при имплантации ионов Me⁺ и последующего отжига;

изучить состав, структуру, плотности состояния валентных электронов и ширины запрещенной зоны нанослоев CdMeTe, созданных на различных глубинах CdTe.

Объектами исследования являются монокристаллические образцы Nb, Mo, Si, эпитаксиальные пленки Si, CdTe и CaF₂.

Предметом исследования являются электронная и кристаллическая структура и механизмы формирования нанокристаллов и нанопленок на поверхности и в приповерхностных слоях исследуемых материалов.

Методы исследований: Оже – электронная спектроскопия (ОЭС), ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия (УФЭС), спектроскопия упруго отраженных электронов (СУОЭ), спектроскопия характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ), дифракция быстрых электронов (ДБЭ), растровая электронная микроскопия (РЭМ), атомно-силовая микроскопия (АСМ), спектроскопия поглощения световых лучей.

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что в ней:

установлены основные закономерности изменения электронной структуры поверхностных слоев Nb при бомбардировке ионами Mo и активных металлов;

теоретически и экспериментально оценено влияния окисления поверхности на коэффициент рассеяния ионов щелочных металлов и установлены основные причины этих изменений;

изучено влияние разупорядочения поверхностных слоев на электронную структуру монокристаллического Si;

впервые получены скрытые нанофазы CoSi_2 на разных глубинах приповерхностного слоя Si (111) также оценены влияния формирования фаз в верхнем слое на электронную структуру и степень покрытия нижнего слоя. Определены оптимальные условия создания квантово-размерных нанофаз CoSi_2 на двух и трех внутренних слоях Si;

получены квантово-размерные фазы и пленки Si на поверхности CoSi_2 и изучены их электронные свойства и разработана методика получения трехслойной наносистемы Si/ CoSi_2 /Si (111);

изучено влияние микронеровностей поверхности на состав и электронные свойства газофазно осажденных поликристаллических пленок CdTe, и установлены основные закономерности их изменения после травления поверхности ионами Ar^+ в сочетании с прогревом;

изучены закономерности и установлены основные механизмы формирования трехкомпонентных нанокристаллов и нанопленок $\text{Cd}_{0,5}\text{Ba}_{0,5}\text{Te}$ в приповерхностной области пленок CdTe/Mo(111) при имплантации ионов Ba^+ с вариацией энергии $E_0=0,5-5$ кэВ с последующим отжигом. Показано, что при высоких дозах ионов ($D \geq 10^{16}$ см⁻²) поверхность обогащается атомами Cd и Ba, а приповерхностная область - атомами Te;

впервые метод ионной имплантации применялся для получения трехкомпонентных наноразмерных фаз и слоев на различных глубинах CdTe. Определены критические размеры нанофаз типа CdBaTe и CdZnTe при которых проявляются квантово-размерные эффекты.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

методом имплантации ионов металлов в различных глубинах приповерхностного слоя Si и CdTe получены двух и трехкомпонентные наноструктуры, определены их размеры и параметры энергетических зон;

изучены закономерности и определены оптимальные режимы (тип, энергия и доза ионов, температура, отжига) формирования многослойных систем на основе металлов, полупроводников и диэлектриков;

полученные результаты и предложенные технологии поэтапности ионной имплантации имеют перспективы в создании новых приборов твердотельной электроники.

Достоверность полученных результатов исследования обосновывается применением современного комплекса аналитических методов электронной спектроскопии и зондовой микроскопии, а также удовлетворительным согласием полученных данных по чистым образцам Nb, Si, CdTe и CaF_2 с результатами других авторов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость: полученные результаты научных исследований позволяют выявить механизмы формирования наноразмерных структур в различных глубинах металлов, полупроводников и диэлектриков при ионной бомбардировке и последующем отжиге, расширяют знания о электронной и кристаллической структуре скрытых нанофаз и нанослоев. Эти результаты очень важны для развития теории образования кванто-размерных материалов и теории построения теоретические модели процессов образования многокомпонентных структур при ионной бомбардировке.

Практическая значимость: Разработанные технологии и определенные оптимальные режимы создания наноразмерных структур имеет перспективы при разработке новых приборов электронной техники (БИС, УБИС, СВЧ приборов, оптические датчиков, элементов памяти, солнечных батареи и др.).

Внедрение результатов исследования.

На основе полученных научных результатов в определении физических закономерностей механизмов образования наноразмерных фаз и слоев в методах ионной бомбардировки и вакуумного напыления, их состава, структуры, электронных и оптических свойств:

получен патент на изобретение от Агентства по Интеллектуальной собственности Республики Узбекистан “Способ получения свободной многослойной нанопленки кремния-силицид металл” (№ IAP 05741 31.01.2019 г). В результате был разработан эффективный метод формирования многослойной гетеросистемы кремний-силицид-металл;

получен патент на изобретение от Агентства по Интеллектуальной собственности Республики Узбекистан “Способ получения нанокристаллической структуры дисилицида металла в пленке кремния” (№ IAP 06215 29.05.2020 г). В результате был разработан метод основанный на ионной имплантации, для формирования дисилицидных нанофаз и нанопленок на поверхности кремния;

вышеописанные результаты Оже электронной спектроскопии монокристалла Si имплантированного ионами Co^+ использовались при выполнении проекта Ф-2-31 «Исследование структуры и физических свойств наноразмерных пленок кремния и формирование термочувствительных структур» и ОТ-А3-56 «Термоэлектрическое преобразование инфракрасного света на основе кремниевой пленки с высоким содержанием марганца и создание приемников, которые очень эффективно регистрируют тепловой свет без охлаждения» 2017-2018 гг. выполнен (Справка Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан от 2 ноября 2020 года № 87-03-4334). Использование научных результатов позволило определить ширину запрещенной зоны и светочувствительность кремниевой пленки Mn_4Si_7 .

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 48-й и 49-й международных конференциях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 2018, 2019); XXIII и XXIV международных

конференциях по взаимодействию ионов с поверхностью (Москва, 2017, 2019); European Materials Research Society Spring Meeting (Strasbourg - 2018, Nice - 2019); V Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» (Москва, 2019); Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах (Ташкент, 2018); Физика возобновляемых источников энергии и устойчивой окружающей среды (Ташкент, 2019).

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на расширенном семинаре кафедр «Технология производства электронных аппаратов» и «Общая физика» с участием специалистов по специальности 01.04.04 – Физическая электроника.

Опубликованность результатов исследований. По материалам диссертации опубликованы 33 научных трудов, из них, 1 монография, 2 патент, 12 статей, в том числе, 7 статей в зарубежных международных реферируемых журналах и 18 работ в сборниках трудов конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающий 148 наименований и 2-х приложений. Текст диссертации изложен на 197 страницах машинописного текста, включая 90 рисунков и 21 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 научных исследований по теме диссертации, степень изученности проблемы, сформулированы цели и задачи, определены объекты, предметы и методы исследования, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе диссертации «**Краткий литературный обзор**» посвященной литературному обзору проанализированы результаты работ по модификации свойств поверхности Mo ионной бомбардировкой и плазменным излучением; перспективным наноразмерным полупроводниковым структурам; влиянию размеров и формированию трехкомпонентных структур на свойства CdTe. Критический анализ литературных данных показывает, что до начала настоящей работы: не проводились систематические исследования по выяснению механизмов изменения эмиссионных и оптических свойств тугоплавких металлов при имплантации ионов металлов; экспериментально и теоретически не изучено влияния окисления поверхности Mo и Nb на внедрение и рассеяния ионов активных металлов; не изучены влияния изменения кристаллической структуры поверхности на плотности распределения электронов валентной

зоны монокристаллического кремния; не имеются результаты экспериментальных исследований по созданию и изучению электронных свойств нанокристаллических фаз $MeSi_2$ на нескольких слоях приповерхностной области Si; не изучены топография поверхности, состав, электронная и кристаллическая структура нанопленочной системы $SiO_2/Si/CoSi_2/Si$ полученных низкоэнергетической имплантацией ионов Co^+ и O_2^+ в Si; практически не проводились исследования по созданию сверхтонких пленок ($d = 5 - 10 \text{ \AA}$) Si на поверхности $CoSi_2/Si$ (111); не проведены исследования влияния низкоэнергетической ($E_0 = 0.5 - 5 \text{ кэВ}$) бомбардировки ионами Ar^+ и Ba^+ на состав и электронную структуру приповерхностного слоя CdTe/Mo. Не выявлены основные механизмы формирования наноразмерных фаз и пленок типа $Cd_{1-x}Ba_xTe$; практически не проводились исследования по получению и изучению физических свойств эпитаксиальных наноструктур на поверхности и приповерхностной области CdTe. Не определены степень покрытия поверхности CdTe наночастицами CdMeTe и зависимость их электронных свойств от размеров нанокластерных фаз.

На основе этих нерешенных проблем сформулированы основные цели и задачи данной диссертационной работы.

Вторая глава **«Методика экспериментальных исследований»** посвящена описанию экспериментальных установок получения и исследования физических свойств материалов и пленок с наноразмерными структурами. Ионная бомбардировка, отжиг и основные исследования проводились в универсальной сверхвысоковакуумной установке. Энергия ионов металлов варьировалась в пределах E_0 от 0,5 до 40 эВ, а Ar^+ и O_2^+ – в пределах $E_0 = 0,5 - 5 \text{ кэВ}$. Элементный и химический состав образцов исследовались методом ОЭС, параметры энергетических зон и плотности состояния валентных электронов – методами УФЭС, СУОЭ и измерения интенсивности проходящего света.

Для получения информации о микрорельефе поверхности и параметрах решетки, использованы стандартные установки растровый электронный микроскоп (РЭМ) «JEOL», дифрактометр быстрых электронов (ДБЭ) «ЭМР – 102», атомно-силовой микроскоп ХИА-200 и спектрофотометр UV-1280.

В третьей главе **«Изменение состава, электронной структуры, эмиссионных и оптических свойств Nb и Mo при бомбардировке ионами низких энергий»** приведены результаты изучения изменения состава, электронной структуры, эмиссионных и оптических свойств Nb, Ni и Mo при бомбардировке ионами тугоплавких и активных металлов и приведены результаты исследований влияния ионной бомбардировки на окисление поверхности Nb при прогреве в кислородной среде.

Коэффициент ИВЭ δ можно определить следующей формулой:

$$\delta = \int_0^{\infty} n(E_p, x) \cdot f(x) \cdot dx \quad (1)$$

где $n(E_p, x)$ – плотность внутренних вторичных электронов, образованных первичными электронами с энергией E_p на глубине x ; $f(x)$ – вероятности выхода вторичных электронов с этой глубине x ; $f(x)$ определяется как

$$f(x) = \psi(x) \cdot p(e\varphi) \quad (2)$$

где $\psi(x)$ – вероятность того, что электроны с глубины x подойдут к поверхности, а $p(e\varphi)$ – вероятность выхода вторичных электронов, подошедших к границе металл-вакуум. Таким образом δ зависит как от работы выхода, так и от плотности внутренних вторичных электронов $n(E_p, x)$ образованных первичными электронами в зоне выхода ИВЭ – λ .

Для того чтобы оценить роль поверхности и объема в увеличении коэффициентов σ_m и Y ионно-легированных образцов, проводилось сравнение результатов измерений Y и σ_m для ниобия, покрытого слоем бария разной толщины и легированного ионами Ba^+ с разными энергиями при $D=D_H=6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (D_H -доза насыщения). Для сравнения выбирались такие значения энергии ионов E_0 и толщины слоев Θ , при которых работа выхода для тех и других образцов была приблизительно одинаковой (таблица 1).

Таблица 1

Значения σ_m , Y и $e\varphi$ для Nb(111), легированного ионами бария с разными энергиями и покрытого слоем бария разной толщины

$Ba^+ \rightarrow Nb$ $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ ион} \cdot \text{см}^{-2}$				Ba/Nb				$\sigma_{mл}/\sigma_{mн}$	$Y_{л}/Y_{н}$
$E_0, \text{кэВ}$	σ_m	$Y \cdot 10^{-6}$	$e\varphi$	Θ	σ_m	$Y \cdot 10^{-6}$	$e\varphi$		
0.5	3.4	56	2.3	0.7	2.0	30	2.35	1.7	1.8
3.0	2.6	30	3.2	0.4	1.75	19	3.15	1.45	1.6
5.0	2.1	11	3.9	0.2	1.55	9	3.85	1.3	1.2

Значения $\sigma = \sigma_m$ соответствовало энергии $E_{pm} \approx 450 - 500 \text{ эВ}$.

Из таблицы видно, что при одинаковых изменениях $e\varphi$ значения σ_m и Y для легированных образцов больше, чем для напыленных. Существенное различие в σ и Y между легированными и напыленными образцами наблюдается при $E_0=1 \text{ кэВ}$ и при этом $\sigma_{л}/\sigma_{н}$ и $Y_{л}/Y_{н}$ составляют $\sim 1,7$. Расчетные значение глубины зоны выхода ИВЭ и фотоэлектронов для чистого Nb составляло 20-25 нм . При этом основная часть внедренных атомов располагаются на глубине $0 - 20 \text{ \AA}$, что близко к зоне выхода ИВЭ. Этим, а также сильным уменьшением $e\varphi$ объясняется наибольшее увеличение σ и Y при $E_0=0,5-1 \text{ кэВ}$. С ростом энергии ионов концентрация внедренных атомов в эмитирующем слое уменьшается, что приводит к уменьшению отношения $\sigma_{л}/\sigma_{н}$ и $Y_{л}/Y_{н}$.

На рис. 1 приведены спектры УОЭ зависимости dR/E_{PF} от E_{PF} для ниобия, легированного ионами Na^+ с энергиями $E_0 = 0,5$ и 3 кэВ . Стрелками сверху указаны положения максимумов и минимумов, характерных для

толстого слоя натрия, а снизу-для чистого ниобия. Видно, что при $E_0=0,5$ кэВ большинство особенностей на кривых $dR/dE_{PF}(E_{PF})$ являются характерными для натрия. С ростом E_0 интенсивность этих особенностей уменьшается, а интенсивность ниобиевых особенностей увеличивается. Такие же результаты получены для Nb легированного ионами K^+ и Va^+ .

Из рис. 2 видно, что при $E_0 = 0,5$ кэВ исчезают Оже-пики Nb с энергиями 43, 94 и 140 эВ, а интенсивность других пиков сильно уменьшается. Появляются пики бария с энергиями 38, 47, 55, 59 и 74 эВ которые можно идентифицировать с Оже-переходами $N_4 O_1 O_3$, $N_5 O_1 V$, $N_5 O_2 O_2$, $N_{45} O_{23} O_{23}$ и $N_4 O_2 V$, соответственно.

При температурном прогреве ионно-легированного образца одновременно могут происходить следующие процессы: испарение VaO и Va с поверхности; диффузия к поверхности внедренного Va , а также диффузия кислорода вглубь образца. Скорость испарения пропорциональна степени покрытия и зависит от теплоты десорбции. На начальной стадии прогрева диффузионный поток к поверхности превышает скорость десорбции, что приводит к уменьшению $e\phi$

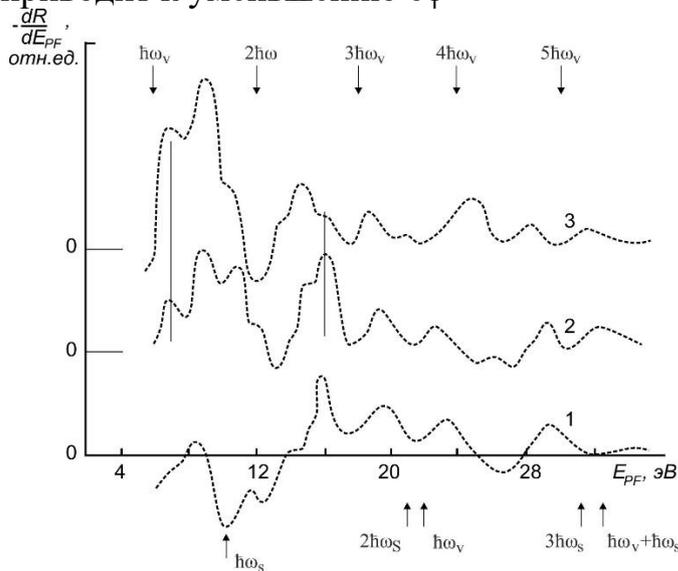


Рис. 1. Зависимости dR/dE_{PF} от E_{PF} для Nb (111), легированного ионами Na^+ с E_0 , кэВ: 2 – 3 кэВ, 3 – 0,5 кэВ, 1 – чистый Nb.

Теоретические расчеты выполнены на программе CASCAD. Мы рассмотрели рассеяние ионов Na^+ , K^+ , Rb^+ и Cs^+ различными поликристаллическими мишенями Mo при нормальном падении на поверхность мишени. Для щелочных ионов $V_i \approx e\phi$, поэтому степень ионизации отраженного пучка велика, однако только для Cs^+ ($V_i - e\phi = -0,63$ эВ) она равна 1. В качестве примера на рис. 3 приведены энергетические спектры ионов Na, рассеянных от молибденовой

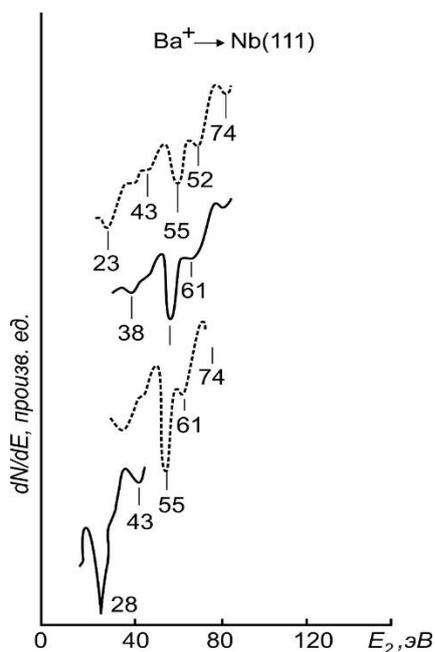


Рис. 2. Оже-спектры Nb (111), облученного ионами Ba^+ с E_0 , кэВ: 2 – 0,5; 3 – 1; 4 – 5; $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. 1 – чистый Nb. $E_p = 1250 \text{ эВ}$.

мишени (пунктир) и от Mo, покрытого монослоем Mo_2O_3 (сплошные линии). Спектры приведены для ионов, рассеянных в интервале углов $\alpha = (70 \pm 5^\circ)$. При нормальном падении (δ) несколько трансформируется форма распределения. При косом падении ($\varphi = 70^\circ$) хорошо разделяются пики, относящиеся к рассеянию на атомах кислорода (первый пик) и атомов молибдена. Для выяснения механизма изменения вторично-эмиссионных параметров при прогреве образцов, легированных при атмосфере O_2^+ , исследовалось изменение с температурой спектров оже-электронов. На рис. 4 представлены зависимости от температуры прогрева амплитуд (A) оже-пигов BaO и Mo (нормированных на максимальную величину A), для Mo (111), легированного ионами Ba^+ с $E_0 = 0,5 \text{ кэВ}$ ($D = 2 \cdot 10^{17} \text{ ион} \cdot \text{см}^{-2}$) в атмосфере кислорода с $P_{O_2} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$.

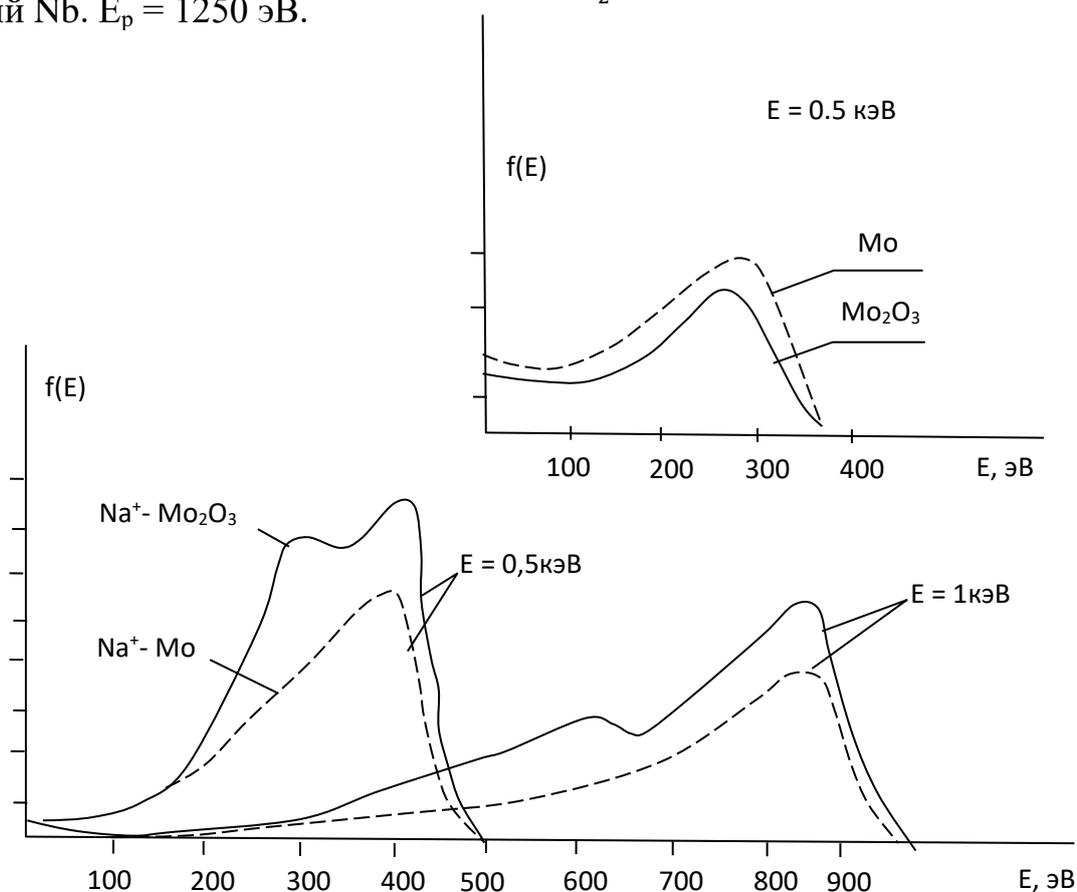


Рис. 3. Энергетический спектр ионов Na рассеянных чистым Mo (пунктир) и Mo, покрытым окисной пленкой (сплошные линии).

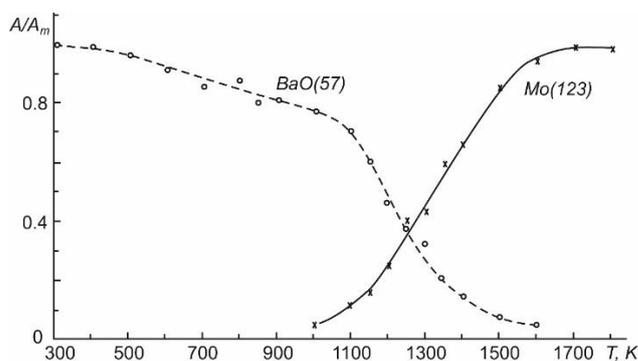


Рис. 4. Зависимости амплитуды ожепиков BaO ($E_2 = 57$ эВ) и Mo ($E_2 = 123$ эВ) от температуры для Mo, легированного ионами Ba^+ с $E_0 = 0,5$ кэВ в атмосфере кислорода ($P_{O_2} = 5 \cdot 10^{-2}$ Па).

По-видимому, диффундирующие к поверхности атомы Ba соединяются с избытком кислорода и образуют BaO (об этом свидетельствовали результаты ЭОС). В связи с этим при прогреве ионно-легированного Mo ($E_0 \geq 3$ кэВ) до $T = 800$ К значение σ в исследованной области увеличивается. При дальнейшем увеличении температуры начинаются процессы миграции Ba и BaO, а также

десорбция пленки BaO с поверхности и разложение молекул BaO, что приводит к уменьшению σ .

Четвертая глава «Кристаллическая и электронная структура нанofаз и слоев Si, созданных на поверхности и приповерхностной области материалов различной природы» посвящена качественному объяснению экспериментальных результатов по влиянию разупорядочения кристаллической решетки поверхности Si на положение максимумов плотности состояния валентных электронов; исследованию методом прохождения света электронной структуры наноразмерных фаз Ca и Si, полученных на поверхности CaF_2 ; получению многослойной нанопленочной гетеросистемы типа $SiO_2/Si/CoSi_2/Si$ последовательной имплантацией ионов Co^+ и O_2^+ в Si, изучению их состав и концентрации атомов на различной глубине системы; экспериментальному изучению состава, структуры и зонно-энергетических параметров нанопленочной системы Si – $CoSi_2$ – Si.

На рис. 5 приведена динамика изменения спектра фотоэлектронов Si при бомбардировке ионами Ar^+ с $E_0 = 1$ keV разными дозами. В основном будем рассмотреть изменение положение и формы основного пика A кремния. Видно, что с ростом дозы облучения происходит уширение пика A, уменьшение его амплитуды и смещение положение в сторону больших энергии (верхнему краю валентной зоны E_v). При ионной бомбардировке состав поверхности Si практически не меняется, поэтому наблюдаемые изменения в основном объясняются разупорядочением приповерхностных слоев. При $D = 6 \cdot 10^{15}$ cm^{-2} происходит полная аморфизация и дальнейшее увеличение D не приводит к заметному изменению спектра фотоэлектронов.

Теперь попытаемся объяснить изменение положения максимума плотности состояния валентной зоны кремния в процессе разупорядочения поверхности с теоретической точки зрения. Состояние электрона в монокристалле кремния описывается в Блоховском представлении функцией

Грина $G_0(\omega, k)$ где ω -частота падающего света, k -квазиимпульс электрона в схеме расширенных зон.

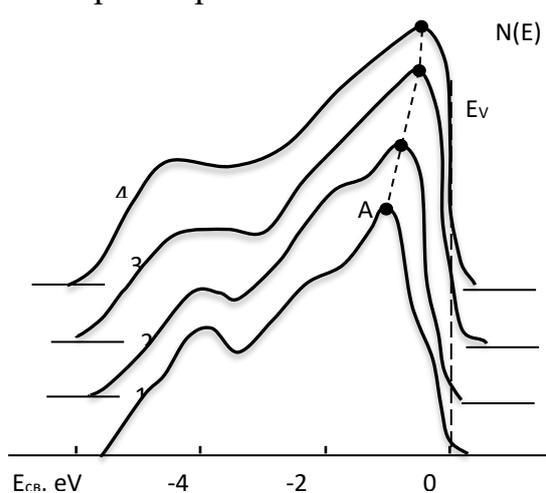


Рис. 5. КЭР фотоэлектронов для Si(111), бомбардированного ионами Ar^+ с $E_0 = 1$ кэВ при D, cm^{-2} : 1-0, 2- $2 \cdot 10^{14}$, 3- 10^{15} , 4- 10^{16} .

Функция Грина электрона в аморфном веществе $G_{kk'}$ удовлетворяет интегральному уравнению Шредингера:

$$\hat{G}_{kk'} = G_0(k)\delta_{kk'} + G_0(k) \sum \hat{V}_{kk'} \hat{G}_{k'k} \quad (3)$$

где $\hat{V}_{kk'}$ -матричный элемент случайного потенциала, действующего на электрон со стороны хаотически расположенных атомов вещества, при этом суммирование по K производится по всем состояниям электронов в кристалле.

K -описывают валентную зону монокристаллического кремния, а K' -описывает зону, соответствующую ионно-бомбардированного кремния.

δ -дельта функция Дирака, выражающая закон сохранения энергии при поглощении фотона.

Во втором порядке теория возмущение сдвиг максимумов в результате аморфизации пропорционален среднему значению квадрата модуля случайного потенциала V :

$$M_{kk} = N \int \frac{dk''}{(2\pi)^3} \frac{\langle |\hat{V}_{kk''}|^2 \rangle}{\varepsilon_k - \varepsilon_{k''}} \quad (4)$$

где N – концентрация дефектов, $\langle |\hat{V}_{kk''}|^2 \rangle$ - среднеквадратичная флуктуация случайного потенциала взаимодействия, интеграл в (4) понимается в смысле главного значения. Энергия валентного электрона в аморфизированном кремнии ε'_k равна

$$\varepsilon'_k = \varepsilon_k + M_{kk} \quad (5)$$

где ε_k – энергия электрона в валентной зоне чистого кристаллического кремния. Смещение энергетических положений пиков, определяется величиной M_{kk} рассчитываемой по формуле (4).

Оценка показывает, что при малых концентрациях примеси, т.е. при малых дозах имплантации ($D < 10^{15} cm^{-2}$) потенциал M_{kk} и следовательно, сдвиг максимума плотности состояний меняются линейно по концентрации. При больших концентрациях примеси (при дозах $D > 10^{15} cm^{-2}$), соответствующих переходу к аморфному кремнию, зависимость M_{kk} от концентрации очень слабая.

Изучена динамика изменения кривой энергетического распределения фотоэлектронов CaF_2 , при облучении ионами Ar^+ с $E_0 = 1$ кэВ с разными дозами (рис. 6). Показано, что на спектре «чистого» CaF_2 начальный резкий рост фотоэлектронов начинается с 12,2 – 12,3 эВ, что обусловлено выходом

электронов из потолка валентной зоны E_V в вакуум. Для CaF_2 значения сродства к электрону $\chi \sim 0,1$ эВ. Поэтому можно полагать что ширина его запрещенной зоны E_g составляет ~ 12 эВ. Особенность при $E_{\text{ф}\phi} \approx 7,5$ эВ может быть обусловлена наличием на узлах решетки некоторого количества Ca, не связанного с фтором, а возникновение особенности при $E_{\text{ф}\phi} = 4$ эВ, по видимому связано с наличием поверхностных состояний. Бомбардировка CaF_2 ионами Ar^+ с $D = 5 \cdot 10^{14}$ см^{-2} приводит к уширению КЭР, уменьшению интенсивности основного максимума ($E_{\text{ф}\phi} \approx 14$ эВ) и квантового выхода фотоэлектронов, а также смещению начала спектра (края валентной зоны E_V) в сторону меньших энергий. При этом амплитуда пика при $E_{\text{ф}\phi} \approx 7,5$ эВ немного увеличивается, особенность в области ~ 4 эВ сглаживается и ширина запрещенной зоны CaF_2 уменьшается на $1,1 - 1,2$ эВ. При $D = 5 \cdot 10^{15}$ см^{-2} площадь под кривой в области основного максимума уменьшается примерно в 3 раза, квантовый выход фотоэлектронов – более 2 раз, а значение E_g – на $4,5$ эВ, интенсивность пика в области $7,5 - 8$ эВ характерного для Ca увеличивается 6 – 7 раз. При $D = 5 \cdot 10^{16}$ см^{-2} структура фотоэлектронного спектра характерная для диэлектрика CaF_2 полностью переходит в структуру характерную для металла – кальция. Изменения структуры кривой УФЭС, уменьшение квантового выхода фотоэлектронов и интенсивности проходящего света с ростом дозы ионов объясняется увеличением размеров кластерных фаз Ca (рис. 6).

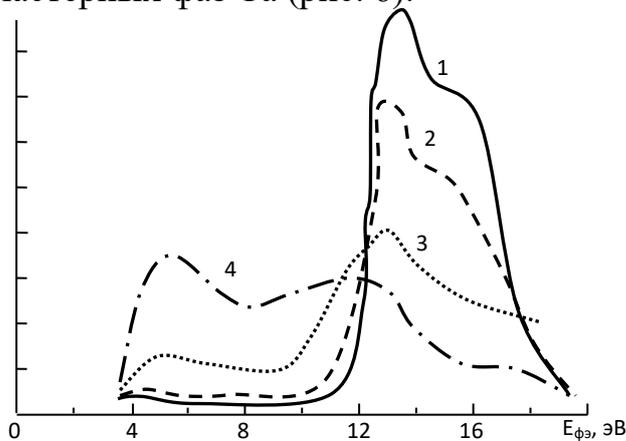


Рис. 6. Фотоэлектронные спектры $\text{CaF}_2(111)$, облученного ионами Ar^+ с $E_0=1$ кэВ при D , см^{-2} 1 - 0, 2 - $5 \cdot 10^{14}$, 3 - $5 \cdot 10^{15}$, 4 - $5 \cdot 10^{16}$. $h\nu = 21,2$ эВ.

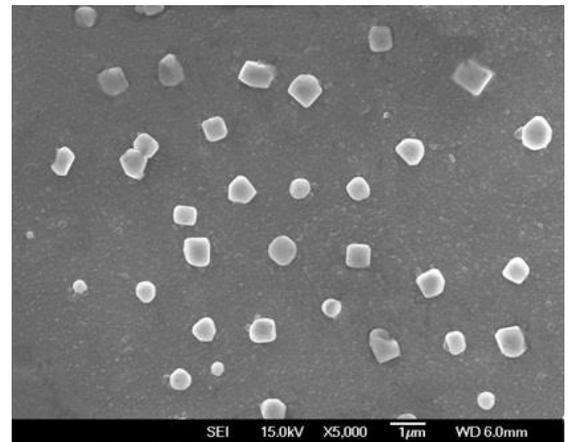


Рис. 7. РЭМ –изображения поверхности $\text{CaF}_2(111)$ с пленкой Si толщиной $\theta \approx 3$ монослоев.

Аналогичным образом изучены изменения состава, кристаллической и электронной структуры нанопленок Si, выращенных на поверхности $\text{CaF}_2(111)$ методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Для получения эпитаксиальных пленок Si после каждого цикла напыления система прогревалась при $T \approx 800 - 900$ К до толщины $\theta \approx 10$ монослоев. Пленка Si имела островковый характер (рис. 7). Сплошные однородные пленки образовались при $\theta \geq 10 - 15$ монослоев.

Изучение зависимости $I(h\nu)$ для CaF_2 с пленкой Si толщиной $\theta = 5$ и 15 монослоев показали (рис. 8), что в случае пленки $\theta = 5$ монослоев

интенсивность света в интервале $h\nu = 0,9 - 1,2$ эВ уменьшается в 3,5 – 4 раза (от 7,5 – 8 до 2 – 2,2). Можно полагать, что при этом 70 – 75 % поверхности CaF_2 покрывается пленкой Si. В случае $\theta = 15 - 20$ монослоев в интервале $h\nu = 0,8 - 1,1$ эВ I уменьшается от $\sim 7,5 - 8$ практически до нуля, т.е. поверхность полностью покрывается атомами Si. После прогрева формируется эпитаксиальный слой Si (111).

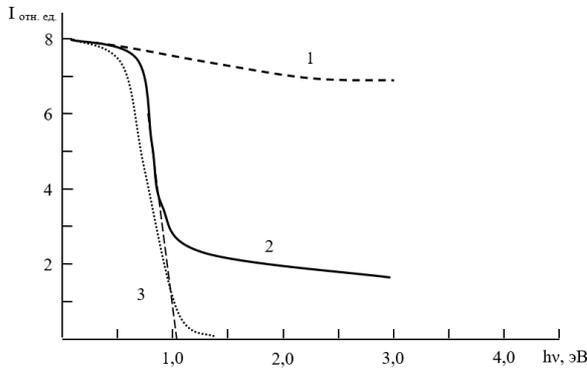


Рис. 8. Зависимость интенсивности проходящего света от энергии фотонов для чистого $\text{CaF}_2(111)$ (кривая 1) и CaF_2 с пленкой Si толщиной 5 (кривая 2) и 15 монослоев (кривая 3)

На практике очень важно получить наноструктуры MeSi_2 на различных глубинах Si. На рис. 9 приведена зависимость $C_{\text{Co}}(d)$ для трехслойной системы CoSi_2/Si , полученной после прогрева Si последовательно имплантированного ионами Co^+ с $E_0 = 30; 15$ и 1 кэВ. Видно, что на поверхности и приповерхностном слое Si образуются нанослои CoSi_2 , толщина поверхностного слоя 4 – 5 нм, внутренних слоев 10 – 12 нм. Необходимо отметить между этими слоями практически не образуются слои чистого Si, т.е. происходит перекрывание границ переходных слоев, образующихся на границе раздела CoSi_2/Si и Si/CoSi_2 . Можно полагать, что при $E_0 \leq 40 - 50$ кэВ невозможно получить трехслойные системы $\text{CoSi}_2/\text{Si}/\text{CoSi}_2/\text{Si}/\text{CoSi}_2/\text{Si}$. Однако при этом при низких дозах ионов можно получить отдельные нанокристаллические фазы CoSi_2 на различных глубинах Si.

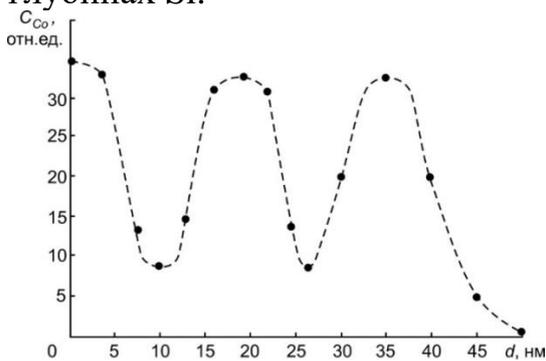


Рис. 9. Концентрационные профили распределения Co по глубине для Si, имплантированного ионами Co^+ с $E_0 = 30; 15$ и 1 кэВ. После каждого цикла имплантации проводился прогрев при $T \approx 900$ К.

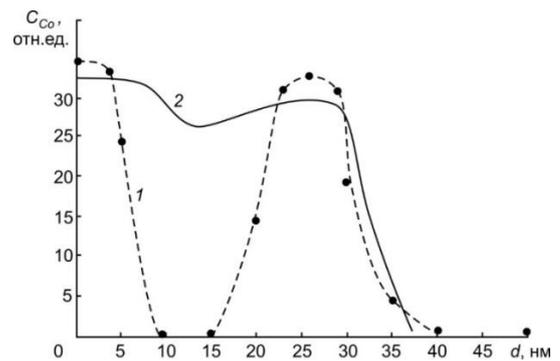


Рис. 10. Концентрационные профили распределения Co по глубине для Si, имплантированного ионами Co^+ $E_0 = 25$ кэВ и $E_0 = 1$ кэВ при $D = 10^{17}$ cm^{-2} .

На рис. 10 приведены концентрационные профили распределения Co по глубине Si, имплантированного ионами Co^+ с $E_0 = 25$ кэВ и $E_0 = 1$ кэВ при D

$= 10^{17} \text{ см}^{-2}$. В первом случае (кривая 1) после каждого цикла ионной имплантации проводился прогрев при $T = 900 \text{ К}$ в течении 40 мин. Во втором случае прогрев проводился после имплантации 25 и 1 кэВ (кривая 2). Когда проводится отжиг после последовательной ионной имплантации между слоями CoSi_2 не образуется тонкий слой чистого Si. По-видимому в последнем случае атомы Co перемешиваются с атомами Si легированных разными энергиями резко уменьшает скорость диффузии в области $d = 8\text{--}20 \text{ нм}$.

Нами определены оптимальные режимы ионной имплантации и отжига для получения нанокристаллических фаз CoSi_2 на трех разных глубинах Si (111) (таблица 2).

Таблица 2

Размеры (d), глубина образования (h) нанокристаллических фаз CoSi_2 и расстояния между нанокристаллическими фазами (b) сформированных при имплантации ионов Co^+ в Si с разными энергиями и дозами

E_0 , кэВ	D , см^{-2}	T , К	d , нм	h , нм	b , нм
1	$5 \cdot 10^{14}$	850	8 – 10	на поверхности $\theta = 4 - 5$	50 – 60
	10^{15}	900	14 – 16		
15	$5 \cdot 10^{14}$	1000	6 – 8	15 – 16	45 – 50
	10^{15}	1000	10 – 12		
30	$5 \cdot 10^{14}$	1000	–	28 – 30	35 – 40
	10^{15}	1000	8 – 10		

Исследования изменения интенсивности проходящего света через образец показали, что значение E_g для нанокристаллических фаз CoSi_2 с $d = 8 - 10 \text{ нм}$ созданных на глубине $28 - 30 \text{ нм}$ составляет $\sim 0,85 \text{ эВ}$, а относительная площадь (степень покрытия) НК CoSi_2 в этом слое $\sim 0,25 - 0,3$ (рис. 11). Если учесть, что для сплошной пленки CoSi_2 значение $E_g = 0,6 \text{ эВ}$, то в данном случае явно проявляются квантово-размерные эффекты. При формировании нанокристаллических фаз в двух слоях с глубиной $28 - 30 \text{ нм}$ и $15 - 17 \text{ нм}$ (рис. 11, кривая 2) значение E_g заметно не меняется, однако степень покрытия приповерхностного слоя нанокристаллическими фазами CoSi_2 увеличивается почти $1,5 - 2$ раза. Можно полагать, что нанокристаллические фазы образованных в двух слоях не соприкасаются друг с другом, следовательно квантово-размерные эффекты сохраняются. Увеличение степени покрытия связано с тем, что нанокристаллические фазы верхнего слоя только частично перекрывают нанокристаллические фазы нижнего слоя. Расположение этих слоев схематически показано на рис. 12. С ростом d значение E_g уменьшается, а θ увеличивается (кривая 3). При $D = 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ формируется сплошной слой CoSi_2 (кривая 4).

Нами бомбардировкой ионами Ag^+ на поверхности CoSi_2/Si (111) получены нанопленки Si (рис. 13). Постимплантационный отжиг в течении 30 мин. при $T = 900 \text{ К}$ приводит к полной кристаллизации аморфизированной

области системы и образованию гетероэпитаксиальной пленочной структуры типа Si/CoSi₂/Si (111).

В таблице 3 приведены параметры энергетических зон тонких пленок Si, CoSi₂ и ширина переходного слоя на границе Si/CoSi₂ и CoSi₂/Si (111). Значения ширины запрещенной зоны E_g, положения потолка валентной зоны E_v определялись методом УФЭС. Значения сродства к электрону (χ) оценивались по формуле $\chi = E_v - E_g$, а разрыв краев зон проводимости по разности значений электронного сродства двух полупроводников: $\Delta E_c = \chi_1 - \chi_2$.

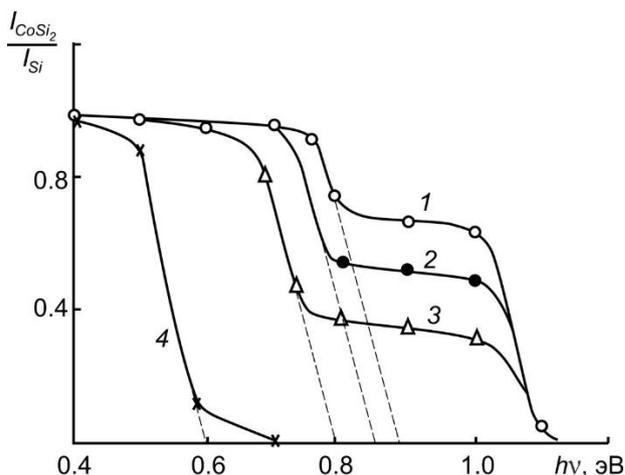


Рис. 11. Зависимость интенсивности проходящего света от энергии фотонов для Si с нанокристаллами CoSi₂, сформированных в приповерхностном слое на глубине 28 – 30 нм (кривая 1) и 15 – 17 нм (кривая 2 – 4).

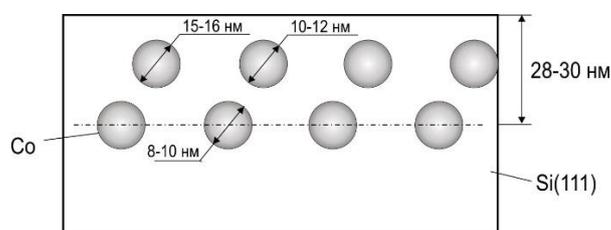


Рис. 12. Схематическое изображение нанофаз CoSi₂, расположенных в приповерхностном слое Si/CaF₂.

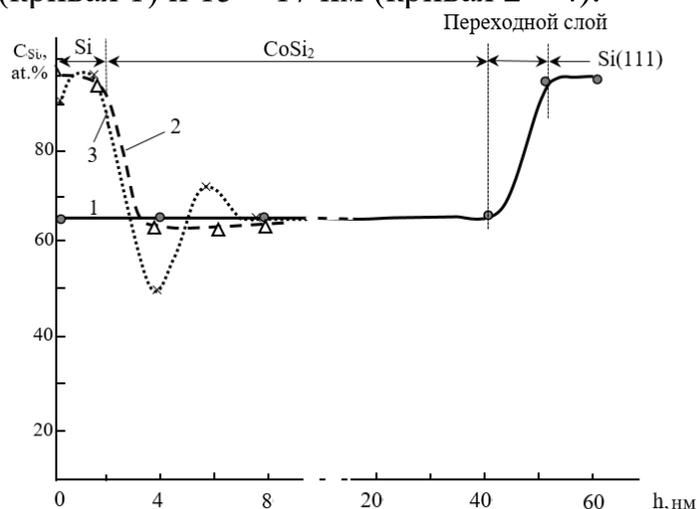


Рис. 13. Профили распределения атомов Si по глубине для системы CoSi₂/Si (111): 1 – исходная система, 2 – после бомбардировки ионами Ar⁺ с E₀ = 2.5 keV при D = 8·10¹⁶ см⁻², 3 – после прогрева при T = 900 К.

Таблица 3
Параметры энергетических зон тонких пленок Si и CoSi₂ и ширина переходного слоя (Δh) на границе Si/CoSi₂ и CoSi₂/Si (111)

Параметры	Si (h = 20 Å)	CoSi ₂ (h = 500 Å)	Si (111)
E _g , eV	1.1 – 1.2	0.5	1.1
E _v , eV	4.7	5.0	5.1
χ, eV	3.5	4.5	4
ΔE _c , eV	0.1	0.5	
ΔE _v , eV	0.3	0.1	
Δh, Å	15 – 20	60 – 80	

Предполагая справедливой одноэлектронную теорию, имеем $\Delta E_g = \Delta E_c - \Delta E_v$, где $\Delta E_g = E_{g2} - E_{g1}$ - разность ширины запрещенных зон.

Учитывая соотношение $\Phi = \chi + E_g$, получаем для разрыва краев валентных зон $\Delta E_v = \Phi_2 - \Phi_1$.

Согласно этим формулам для контакта нанопленки Si/CoSi₂: $-\Delta E_c = 0.3$ eV; $\Delta E_v = 0.1$ eV, а для контакта CoSi₂/Si (111): $\Delta E_c = 0.5$ eV $\Delta E_v = 0.1$ эВ. Необходимо отметить, что E_g нанопленки Si с толщиной 10 – 15 Å на 0,05 – 0,1 эВ больше, чем толстой пленки. На основе данных таблицы 3 нами построена примерная зонно-энергетическая диаграмма системы Si(111)/CoSi₂/Si (рис. 14).

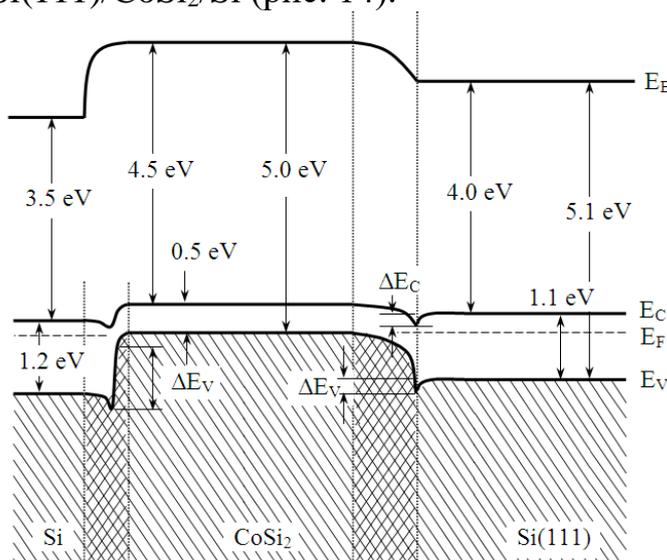


Рис. 14. Энергетическая зонная диаграмма для системы Si/CoSi₂/Si (111).

В пятой главе «Влияние ионной имплантации и отжига на состав, эмиссионные и оптические свойства, кристаллическая и электронная структура CdTe» впервые приводятся результаты экспериментальных исследований: по созданию наноразмерных одно- и многокомпонентных нанофаз и слоев на поверхности и приповерхностном слое CdTe имплантацией ионов Ar⁺ и Ва⁺; по изучению их электронной и кристаллической структуры, эмиссионных и оптических свойств.

На рис. 15 приведено РЭМ изображение поверхности хорошо обезгаженной пленки CdTe/Мо (111).

Видно, что пленка состоит из отдельных зерен (блоков), которые имеют форму близкую к многограннику с латеральными размерами 100 – 200 нм.

Границы большинства зерен перекрывают друг друга. Между зернами имеются поры различной формы с длиной от 50 – 60 до 200 – 250 нм. Анализ АСМ-изображения показывает, что оценочные значения неровностей поверхности в среднем составляют 50 – 60 нм, а в максимуме доходят до 100 – 120 нм (рис. 16, а).

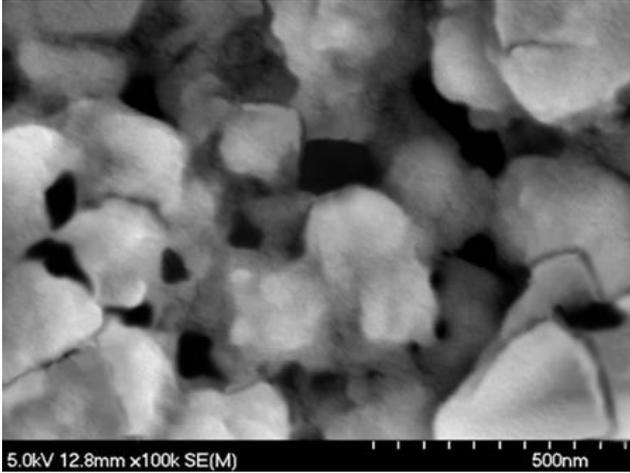
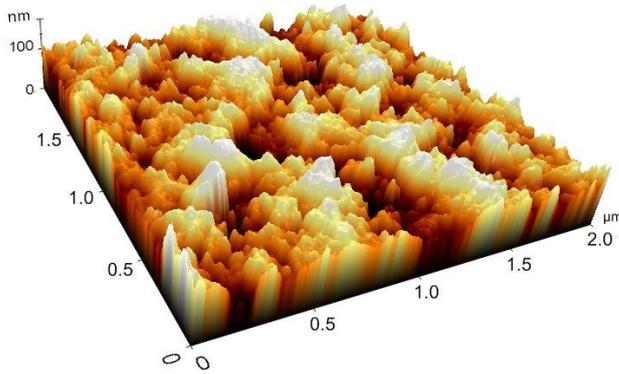
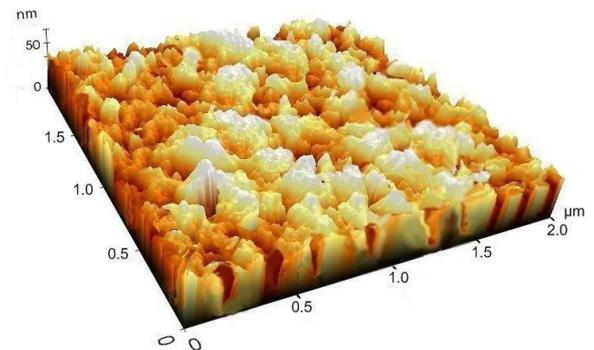


Рис. 15. РЭМ – изображение поверхности хорошо обезгаженной исходной пленки CdTe.



а)



б)

Рис. 16. АСМ - изображения поверхности: а – исходной пленки CdTe, б – пленки CdTe, после бомбардировки ионами Ar⁺ ($E_0 = 5$ кэВ, $D = 5 \cdot 10^{16}$ см⁻²) и отжига при $T = 800$ К.

При этом поверхностные концентрации атомов равны: Cd ~ 45 ат.%, Te ~ 52 ат.%, O ~ 1 ат.% и C ~ 2 ат.%. Бомбардировка поверхности ионами Ar⁺ с $E_0 = 5$ кэВ приводит к резкому изменению состава и микрорельефа поверхности CdTe. После прогрева этой системы при $T = 1000$ К в течении 30 мин. поверхность становится существенно гладкой, размеры неровностей не превышают 20 – 30 нм, а размеры зерен составляют 20 – 40 нм (рис. 16, б). При этом восстанавливается поликристаллическая структура, а стехиометрический состав очень близок к Cd_{0,5}Te_{0,5} (табл. 4).

Таблица 4.

Значения Φ , E_g и σ_m пленок CdTe до и после распыления ионами Ar⁺ с $E_0 = 5$ кэВ

Параметры	CdTe исходный	Ar ⁺ → CdTe
-----------	---------------	------------------------

		до прогрева	после прогрева при T = 800 К
Φ , эВ	5,65	–	6,1
σ_m	1,8	1,2	1,95
E_g , эВ	1,45	0,8	1,55
C_{Te}/C_{Cd} , ат.%	52/45	71/26	50/48

На рис. 17 приведены спектры фотоэлектронов, полученных при $h\nu = 10,8$ эВ для CdTe (110), имплантированного ионами бария с энергией $E_0 = 1$ кэВ разными дозами.

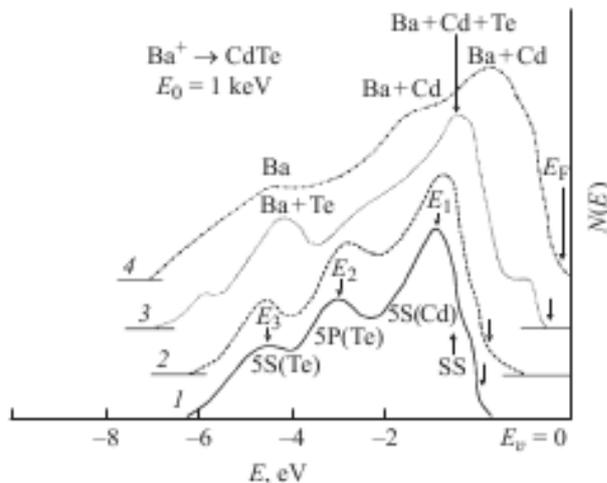


Рис. 17. Фотоэлектронные спектры CdTe, имплантированного ионами Ba^+ с $E_0 = 1$ кэВ разными дозами D , $ион \cdot см^{-2}$: 1 – 0, 2 – $2 \cdot 10^{14}$, 3 – 10^{15} , 4 – $6 \cdot 10^{16}$; $h\nu = 10,8$ эВ.

На спектре чистого CdTe обнаружены пики, обусловленные наличием поверхностных состояний (SS), возбуждением 5s-электронов Cd (E_1), а также 5p (E_2)- и 5s (E_3)-электронов Te. Имплантации ионов Ba^+ в зависимости от дозы ионов приводит к смещению начала спектра в сторону больших энергий, изменению формы и положения пиков подложки, и появлению новых пиков. При дозе облучения $D = 10^{15}$ $ион \cdot см^{-2}$ появляются новые пики при энергиях $E_{св} \approx -4$ эВ и $+1,7$ эВ. Пик с $E_{св} \approx -4$ эВ обусловлен образованием соединения типа Ba + Te, так как при этой дозе поверхность обогащается атомами Te. Пик с $E_{св} \approx +1,7$ эВ, по-видимому, связан с формированием узкой зоны электронных состояний вблизи дна зоны проводимости CdTe вследствие возникновения различных дефектов. Смещение положения основного пика (E_3) может быть обусловлено образованием соединения типа Ba + Cd + Te. При дозе насыщения ($4 - 6$) $\cdot 10^{16}$ $ион \cdot см^{-2}$ в спектре в основном содержатся пики, характерные для Ba и Ba + Cd, т.е. происходит "металлизация" поверхности, а значение E_g приближается к нулю (см. таблицу).

Постимплантационный отжиг этого образца при $T = 1000$ К в течение 30 min. приводил к образованию трехкомпонентного соединения с примерным составом $Cd_{0,5}Ba_{0,5}Te$ толщиной 35 – 40 Å (рис. 18).

Плотность состояния валентных электронов трехкомпонентной нанопленки резко отличается от плотности состояния электронов матрицы – CdTe (рис. 19). На основе анализа спектров УФЭС определены параметры энергетических зон исследуемых пленок (см. таблицу 5).

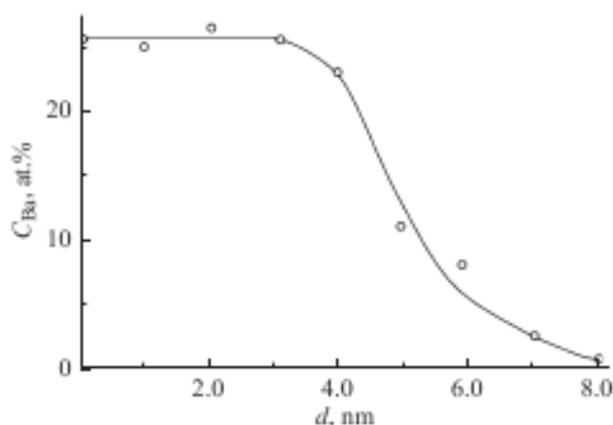


Рис. 18. Профиль распределения атомов Ва по глубине для системы $\text{Cd}_{0,5}\text{Ba}_{0,5}\text{Te}/\text{CdTe}$.

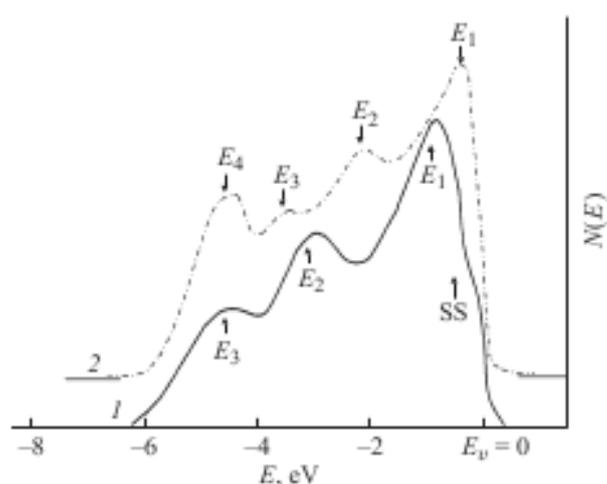


Рис. 19. Фотоэлектронные спектры: 1 – пленки CdTe , 2 – нанопленки $\text{Cd}_{0,5}\text{Ba}_{0,5}\text{Te}/\text{CdTe}$.

Таблица 5

Параметры энергетических зон исследуемых пленок

Параметры зон, эВ	Пленка CdTe	$\text{Ba}^+ \rightarrow \text{CdTe}$, $E_0 = 1$ кэВ, $D = 6 \cdot 10^{16}$ ион·см ⁻²	$\text{Cd}_{0,5}\text{Ba}_{0,5}\text{Te}$
E_v	5,65	2,4	5,4
E_F	4,30	2,4	—
E_g	1,45	0	1,7
χ	4,20	2,4	3,7

На рис. 20 приведены спектры $N(E_2)$ снятые при $E_p=5$ эВ, для чистого CdTe и CdTe со субмонослойной ($\theta \approx 0,3$) пленкой Cs . E_2 – энергия вторичных электронов. Нуль на оси E_2 соответствует уровню вакуума пленки CdTe . Видно, что после напыление Cs выход истинно-вторичных электронов в вакуум увеличивается, а начало спектре смещается в сторону меньших энергии на $\sim 2,6$ эВ, т.е. потенциальный барьер (средство к электрону χ) уменьшается на 2,6 эВ. На этой части спектра обнаруживаются особенностей при энергиях $E_{c1} = -1$ и $E_{c2} = -1,9$ эВ (относительно E_v при энергиях $E_{c1} = 3,5$ и $E_{c2} = 4,4$ эВ). Положения этих особенностей соответствуют максимумам плотности электронных состояний в зоне проводимости. Увеличивая толщины пленки Cs до 0,5-0,6 монослоев можно уменьшит χ на $\sim 3-3,5$ эВ. Однако начиная с $\theta \sim 0,4-0,5$ монослоев в спектре появляется особенности, связанные с адатомами Cs .

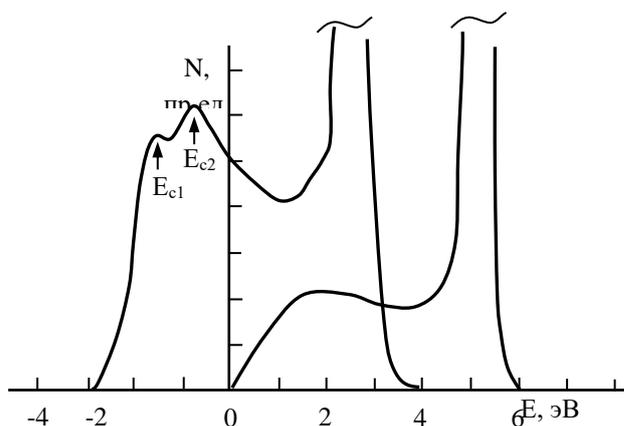


Рис. 20. Спектры $N(E_2)$ снятие при $E_p=5$ эВ, для чистого CdTe (кривая 1) и CdTe со субмонослойной ($\theta \approx 0,2$) пленкой Cs (кривая 2).

Такие же исследования проводили для пленки $Cd_{0,6}Zn_{0,4}Te$. На основе анализ спектров фото-, истинно-вторичных и упруго отраженных электронов оценены параметры энергетических зон и плотности электронных состояний валентной зоны и зоны проводимости (табл. 6). При расчетах за нуль принималась потолок валентной зоны E_v .

Таблица 6

Зонно-энергетические параметры и энергетические положения максимумов в спектрах фото-, истинно-вторичных и упруго-отраженных электронов для CdTe и $Cd_{0,6}Zn_{0,4}Te$, относительно потолка валентной зоны E_v

Исследуемый объект	Φ , эВ	E_g , эВ	χ , эВ	УФЭС		Спектры ИВЭ		$dR/dE_p(E_p)$	
				$E_{св}$, эВ	Интерпретация	E_c , эВ	Интерпретация	E , эВ	Интерпретация
CdTe(111)	5.4	1.48	3.95	1	$E_{пр}$	3,5	E_{c1}	1,5	$E_v \rightarrow E_c$
				-0,5	$E_{пс}$	4,4	E_{c2}	4,3	$E_1 \rightarrow E_{c1}$
				-1	E_1				
				-1,8	-			5,5	$E_v \rightarrow E_B$
				-2,4	E_2			8,1	$E_3 \rightarrow E_{c1}$
				-4,5	E_3			11,2	$E_3 \rightarrow E_B$
$Cd_{0,6}Zn_{0,4}Te$	5.6	1.71	3.9	1.1	$E_{пр}$	3	E_{c1}	1.8	$E_v \rightarrow E_c$
				-0.4	$E_{пс}$	4.2	E_{c2}	4.4	$E_1 \rightarrow E_{c1}$
				-1.2	E_1			5.5	$E_1 \rightarrow E_{c2}$ $E_2 \rightarrow E_{c1}$
				-2.3	E_2			6.9	$E_2 \rightarrow E_{c2}$ $E_3 \rightarrow E_{c1}$
				-3.7	E_3			7.9	$E_3 \rightarrow E_{c2}$ $E_4 \rightarrow E_{c1}$
				-5	E_4				

E_B – уровень вакуума.

В таблице 7 приведены значение d_m (глубина, которая соответствует максимуму распределения Ва) C_m (концентрация Ва в максимуме), Δd (полуширины кривой распределения – толщина слоя $Cd_{0,5}Ba_{0,5}Te$)

полученные для CdTe, имплантированного ионами Va^+ с энергиями 15 и 30 кэВ при $D=D_n$ до и после прогрева (в случае $E_0=30$ кэВ доза насыщения $\sim 3 \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$, $T_{opt}=1100$ К).

Таблица 7

Значения d_m , C_m , Δd и x для CdTe, имплантированного ионами Va^+

Параметры	Прогрев	E_0 , кэВ	
		15	30
d_m , нм	до	9-10	16-18
	после	8-9	16-18
C_m , ат. %	до	20-22	13-15
	после	26-28	18-20
Δd , нм	до	12	20
	после	7-8	9-10

Из таблицы видно, что с ростом энергии ионов максимум распределения смещается в сторону больших глубин, полуширины кривой распределения увеличивается, а концентрация бария в максимуме уменьшилась. Для $E_0=30$ кэВ значение d_m до и после прогрева мало отличаются друг от друга. После прогрева концентрация Va в максимуме увеличивается почти в 2 раза и образуется слой $Cd_{0,6}Va_{0,4}Te$, толщиной ~ 20 нм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выявлены основные механизмы изменения электронной и кристаллической структуры, эмиссионных и оптических свойств поверхности Nb при бомбардировке ионами Mo^+ , Va^+ , Na^+ и Cs^+ . Установлено, что в случае имплантации ионов Mo^+ в Nb после прогрева происходит резкое изменение электронной структуры ионно-легированных слоев, что объясняется образованием интерметаллического соединения типа Nb_xMo_y .

2. Теоретически и экспериментально изучено влияния окисления поверхности Mo на коэффициент рассеяния ионов щелочных металлов с поверхности Mo. Показано, что при прогреве Nb и Mo в кислородной среде на их поверхностных слоях образуются нестехиометрические оксиды этих металлов. Эти оксиды не испаряются до $T = 1500 - 1800$ К.

3. Впервые изучено влияние бомбардировки ионами Ar^+ на электронную структуру монокристаллов Si. Теоретически описано влияние разупорядочения поверхности кристаллов на плотности состояния валентных электронов. Оценена зависимость величины энергетического смещения основного максимума плотности состояния валентных электронов от дозы облучения.

4. Определены оптимальные условия ионной имплантации (энергия, доза) и последующего отжига (температура и время) для получения многослойной системы $CoSi_2/Si/CoSi_2/Si$ и $SiO_2/Si/CoSi_2/Si$. Изучена их электронная структура, эмиссионные и оптические свойства.

5. Впервые получены наноразмерные фазы CoSi_2 на 2 и 3 слоях приповерхностной области Si. Установлено, что E_g нанофаз CoSi_2 с $d = 8 - 10$ нм созданного на глубине 28 – 30 нм составляет 0,85 эВ, а степень покрытия – 0,25 - 0,3. При создании второго слоя таких же нанофаз значение E_g этой системы практически не меняется, а степень покрытия увеличивается до 1,5 – 2 раза.

6. Впервые изучены электронная и кристаллическая структура наноструктур Si созданных на поверхности гетероструктуры CoSi_2/Si (111) бомбардировкой ионами Ar^+ . Показано, что при $E_0 = 1$ кэВ и $D = 10^{14} - 5 \cdot 10^{15}$ см^{-2} формируются нанокристаллические фазы Si, а при $D \geq 4 \cdot 10^{16}$ см^{-2} однородная сплошная пленка Si с толщиной $\sim 10 - 15$ Å.

7. Установлено, что поликристаллические пленки CdTe, полученные методом ГФЭ состоят из отдельных зерен (блоков), которые имеют форму близкую к многограннику с латеральными размерами 100-200 нм. Между зернами имеются поры различной формы с длиной от 50-до 250 нм. При этом неровности поверхности в среднем составляют 50-60 нм. Впервые показано, что после травления поверхности ионами Ar^+ с $E_0=5$ кэВ под углом 70-80° и последующего отжига, поверхность CdTe становится существенно гладкой, размеры неровностей уменьшаются. При этом в фотоэлектронном спектре обнаруживаются явно выраженные особенности, обусловленные возбуждением электронов 5p и 5s электронов Te и 5s электронов Cd.

8. Впервые изучена динамика изменения электронной структуры поверхности CdTe при бомбардировке ионами Ва. Показано, что имплантация ионов Ва, в зависимости от энергии и дозы ионов, сопровождается образованием соединений типа Ba^+Te , Ba-Cd-Te , Ba-Cd , разупорядочением поверхностного слоя и появлением субатомных слоёв Ва. Оценены вклады каждого из этих факторов в изменении плотности состояния валентных электронов.

9. Впервые изучены динамика изменения состава, структуры и электронные свойства поверхности и приповерхностных слоев CdTe при имплантации ионами Ba^+ с $E_0 > 10$ кэВ. Показано, что ионно-легированные слои имеют очень сложный, изменяющийся по глубине, составу и обладает свойствами узкозонного полупроводника. Ширина запрещенной зоны которого изменяется в пределах 0,3-1,2 эВ.

10. Впервые методом имплантации ионов Ba^+ и Zn^+ в сочетании с отжигом на поверхности и на различных глубинах CdTe получены наноразмерные фазы и слои $\text{Cd}_{0,5}\text{Ba}_{0,5}\text{Te}$ и $\text{Cd}_{0,6}\text{Zn}_{0,4}\text{Te}$. В частности показано, что E_g поверхностной пленки $\text{Cd}_{0,5}\text{Ba}_{0,5}\text{Te}$ при толщине $d \approx 20$ Å составляла $\sim 1,9$ эВ, а при $d \geq 35 - 40$ Å – 1,7 эВ.

11. Определены оптимальные условия получения наноразмерных структур с новыми физическими свойствами на основе Si, CaF_2 и CdTe, и даны научно-обоснованные рекомендации по применению их в разработке эффективных приборов твердотельной электроники.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 AWARD OF
SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF ION-PLASMA AND
LASER TECHNOLOGIES**

**TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY NAMED AFTER
I. KARIMOV**

ERGASHOV YOKUB SUVONOVICH

**PHYSICO-TECHNOLOGICAL FOUNDATIONS OF THE FORMATION
AND ELECTRONIC-OPTICAL PROPERTIES OF NANOSCALE
STRUCTURES CREATED IN THE NEAR-SURFACE LAYERS OF
CRYSTALS Nb, Si, CdTe AND CaF₂ BY ION BOMBARDMENT**

01.04.04 – Physical electronics

**ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION (DSc) ON PHYSICAL AND
MATHEMATICAL SCIENCES**

TASHKENT-2020

The subject of doctoral dissertation is registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number №B2020.4.DSc/FM167.

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

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) has been posted on the website of the Scientific Council (<http://iplt.uz/>) and on Information-education portal «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Scientific consultant: **Umirzakov Baltokhodzha Ermatovich**
doctor of physical and mathematical sciences,
professor

Official opponents: **Normurodov Murodilla Togaevich**
doctor of physical and mathematical sciences

Rasulov Akbarali Maxamatovich
doctor of physical and mathematical sciences

Usmanov Dilshadbek Tursunbaevich
doctor of physical and mathematical sciences

Leading organization: **Fergana polytechnical institute**

The defense will take place on " ____ " _____ 2020 at ____ at the meeting of the Scientific Council number DSc.02/30.30.12.2019.FM.65.01 at the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (Address: 100125, Uzbekistan. Tashkent city, str. Durmon yuli, 33. Phone: (+99871) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz).

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

The abstract of the dissertation is sent out on " ____ " _____ 2020.
(Mailing report № ____ on " ____ " _____ 2020).

Kh.B. Ashurov

Chairman of the Scientific Council on award of scientific degrees, Doctor of Technical Sciences, Professor

I.D. Yadgarov

Scientific secretary of Scientific Council on award of scientific degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher

Sh.D. Payziev

Chairman of the Scientific Seminar under Scientific Council on award of scientific degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher

INTRODUCTION (abstract of DSc thesis)

Topicality and necessity of the thesis. In recent years, interest in the production and study of the properties of nanoscale multilayer semiconductor heterostructures has sharply increased. These structures are promising for the development of microwave transistors, diodes, optical resonators, electronic and magnetic storage devices, as well as ohmic contacts and barrier layers for nanoscale structures. Low-energy ion bombardment is one of the promising methods for creating nanoscale structures on the surface and in the near-surface region of materials of various nature. It was found that the band gap E_g in nanocrystalline phases of metal silicide's, depending on their volumes, can vary within 0.6–1 eV.

The results of experimental work have shown that the perfection and properties of films largely depend on the synthesis method, on their thickness and surface morphology. During the fabrication of heterojunctions, a high-resistance layer is formed at their interface due to the mutual diffusion of atoms of one semiconductor into another. However, there are still disagreements regarding the nature and composition of this layer. Many researchers believe that the high-resistance layer is a solid solution. The properties of the intermediate solid solution mainly depend on the selection of the optimal modes of the technological process (substrate temperature and process duration).

Obtaining and studying the physicochemical properties of nanostructures and nanolayers at various depths of the near-surface region of materials of various nature and the creation of nanofilm heterostructures on their basis is an urgent scientific task of modern physical electronics. From a practical point of view, these systems have great prospects for the creation of various optical and electronic devices, solar cells and photosensitive devices.

In this regard, obtaining and revealing the mechanisms of the formation of new materials in the form of multilayer quantum-well heterostructures and nanocontacts to them is one of the urgent problems of modern electronic instrumentation.

Conformity of the research to the priority areas of science and technology development of the Republic of Uzbekistan. This research work was carried out in accordance with the priority directions of development of science and technology of the Republic of Uzbekistan: II "Physics, astronomy, energy and mechanical engineering", III "Energy, energy and conservation, transport, mechanical engineering and instrument making, the development of modern electronics, microelectronics, photonics, electronic instrumentation "and III. "Development and use of renewable energy sources".

Review of international scientific research on the topic of the dissertation. The production and study of the physical properties of nanoscale structures, the mechanisms of their formation are currently occupied by research centers, institutes, universities of the leading countries of the world: the Center for Atomic Surface Research and the Faculty of Physics of Yonsei University, Seoul (South

Korea), Lehrstuhl für Festkörperphysik, Universität Erlangen-Nürnberg, Staudtstrasse Erlangen (Germany), Sektion Physik Universität München (Germany), Departamento de Física de la Materia Condensada, Universidad Autónoma de Madrid (Spain), Department of Electrical Engineering and Computers (USA), Watson Research Center, Yorktown-Heights York (USA), Research Center at the Croissant Crystal Campus in Marseille (France), Institute for Atmospheric and Oceanic Research, University of Tokyo (Japan), Advanced Institute for Materials Research (WPI-AIMR), Tohoku University (Japan). Experimental and theoretical studies have been carried out at Moscow State University, at the Institute of Physics and Technology of the Russian Academy of Sciences, and others.

Problem development status. In connection with the wide use and prospects in the creation of new devices of functional electronics, a large number of works have been devoted to the study of the composition, structure, and properties of materials of various nature with nanoscale structures in recent years. Yu.Zh. Tuleushev et al. For the first time obtained solid solutions of Te in Cd, Cd in Te by ion-plasma sputtering and deposition. It was found that with an increase in the Cd concentration in the coatings, the CdTe cubic lattice parameter increases. The estimation of the size of the crystalline particles gave the size of the CdTe grains 10 - 15 nm, which makes it possible to classify the coatings as nanocrystalline structures.

Relevance of the dissertation research to the plans and scientific-research works. The research presented in the dissertation is carried out in accordance with the approved research work plans of the Tashkent state technical university in the framework of the Republic of Uzbekistan of the State Research and Development Programs.

The purpose of the research is establishment of physical regularities and determination of the formation mechanisms of nanoscale phases and layers on the surface and near-surface region of Mo, Nb, Si, CdTe, CoSi₂ and CaF₂ during ion bombardment and vacuum deposition, study of their structure, structures, electronic and optical properties.

Tasks of research work to obtain nanoscale structures of the Mo, Nb, Si, CdTe, CoSi₂ and CaF₂ type by implantation with subsequent annealing. Study the composition, surface morphology, crystal and electronic structure of thin films.

The objects of the research are monocrystalline samples of Nb, Mo, Si, epitaxial films of Si, CdTe and CaF₂.

The subject of the study electronic and crystal structure and mechanisms of formation of nanocrystals and nanofilms on the surface and in the near-surface layers of the materials under study.

Methods of the research. Auger - electron spectroscopy (AES), high-energy electron diffraction (HEED), scanning electron microscopy (SEM), ultraviolet photoelectron spectroscopy (UVES), elastically reflected electron spectroscopy (ELSE), characteristic electron energy loss spectroscopy (EELS), atomic force microscopy (AFM).

Scientific novelty of the research work consists of the following results:

the main laws governing the change in the electronic structure of the surface layers of Nb upon bombardment with Mo and active metals have been established. In the first case, a new spectrum of the density of state of valence electrons is formed, and in the second case, the spectrum of the density of state contains the maxima of Mo and the alloying element;

for the first time, the effect of surface oxidation on the scattering coefficient of alkali metal ions was estimated theoretically and experimentally, and the main reasons for these changes were established;

for the first time the influence of disordering of surface layers on the electronic structure of single-crystal Si was studied;

For the first time, hidden CoSi₂ nanophases were obtained at different depths of the Si (111) surface layer. The influence of the formation of phases in the upper layer on the electronic structure and the coverage of the lower layer is estimated. The optimal conditions for the creation of quantum-sized CoSi₂ nanophases on two and three inner Si layers have been determined. The crystal and electronic structure of the two-layer systems CoSi₂ / Si / CoSi₂ / Si (111), SiO₂ / Si / CoSi₂ / Si (111) has been studied;

for the first time quantum-well Si phases and films on the CoSi₂ surface were obtained and their electronic properties were studied. A procedure for obtaining a three-layer Si / CoSi₂ / Si (111) nanosystem has been developed;

The effect of surface microroughness on the composition and electronic properties of gas-phase deposited polycrystalline CdTe films has been studied, and the main regularities of their change after surface etching with Ar⁺ ions in combination with heating have been established. It is shown that after these technological treatments, the surface of CdTe becomes significantly smooth, the size of the irregularities decreases 2-2.5 times and does not exceed 20-30 nm, the grain size is 20-40 nm, the stoichiometric composition is close to CdTe.

Practical results of research work the method of implantation of metal ions at various depths of the near-surface layer of Si and CdTe obtained two and three-component nanostructures, determined their sizes and parameters of energy bands;

the regularities were studied and the optimal modes (type, energy and dose of ions, temperature, annealing) of the formation of multilayer systems based on metals, semiconductors and dielectrics were determined;

the results obtained and the proposed technologies of stage-by-stage ion implantation have prospects in the creation of new devices for solid-state electronics.

Reliability of the obtained results of research the study is substantiated by the use of modern complex of analytical methods of electron spectroscopy and probe microscopy, as well as by the satisfactory agreement of the data obtained on pure samples of Nb, Si, CdTe and CaF₂ with the results of other authors.

Scientific and practical value of the research results.

Scientific significance: the obtained results of scientific research make it possible to reveal the mechanisms of the formation of nanoscale structures at

different depths of metals, semiconductors and dielectrics during ion bombardment and subsequent annealing, expand knowledge of the electronic and crystal structure of hidden nanophases and nanolayers. These results are very important for the development of the theory of the formation of quantum-dimensional materials and the theory of constructing theoretical models of the processes of formation of multicomponent structures during ion bombardment.

Practical significance: The developed technologies and certain optimal modes for creating nanoscale structures have prospects in the development of new electronic devices (microwave devices, optical sensors, memory elements, solar batteries, etc.).

Application of researches results.

Based on the scientific results obtained in determining the physical laws of the mechanisms of formation of nanoscale phases and layers in the methods of ion bombardment and vacuum deposition, their composition, structure, electronic and optical properties:

received a patent for an invention from the Agency for Intellectual Property of the Republic of Uzbekistan "Method for obtaining a free multilayer silicon-silicide metal nanofilm" (No. IAP 05741 01/31/2019). As a result, an efficient method was developed for the formation of a multilayer silicon-silicide-metal heterosystem;

received a patent for an invention from the Agency for Intellectual Property of the Republic of Uzbekistan "Method for obtaining a nanocrystalline structure of a metal disilicide in a silicon film" (No. IAP 06215 05/29/2020). As a result, a method was developed based on ion implantation for the formation of disilicidal nanophases and nanofilms on the silicon surface;

The above-described results of Auger electron spectroscopy of a Si single crystal implanted with Co + ions were used in the implementation of projects F-2-31 "Investigation of the structure and physical properties of nanoscale silicon films and the formation of temperature-sensitive structures" and OT-A3-56 "Thermoelectric conversion of infrared light based on a silicon film with high content of manganese and the creation of receivers that very efficiently register thermal light without cooling "2017-2018. completed (Certificate of the Ministry of Higher and Secondary Specialized Education of the Republic of Uzbekistan dated November 2, 2020 No. 87-03-4334). The use of scientific results made it possible to determine the band gap and photosensitivity of the Mn_4Si_7 silicon film.

Approbation of research results. The main results of the thesis were reported and discussed at the 48th and 49th international conferences on the "Physics of the interaction of charged particles with crystals" (Moscow, 2018, 2019); XXIII and XXIV international conferences on the "Interaction of ions with a surface" (Moscow, 2017, 2019); European Materials Research Society Spring Meeting (Strasbourg - 2018, Nice - 2019); V International Conference "Laser, Plasma Research and Technologies" (Moscow, 2019); VII International Conference on Physical Electronics (Tashkent, 2018); International scientific conference "Nanostructured semiconductor materials in photovoltaics" (Tashkent, 2029).

Publication of the results. The results obtained on the topic of the dissertation are presented in 33 scientific works, including, 2 patent, 1 monograph and 12 articles in international journals.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation work consists of introduction, five chapters, conclusion, list of published scientific works and a list of references. It presented on 197 pages of typewritten text, including 90 figures and 21 tables.

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

I бўлим (I часть, part I)

1. Монография: Эргашов Ё.С., Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Абдурахманов Г. Методы создания и электронные свойства наноразмерных структур на основе молибдена, кремния и силикатов. Монография. Фан ва технология, 2020 г., 188 с
2. Z. E. Mukhtarov, Z. A. Isakhanov, B. E. Umirzakov, T. Kodirov, E. S. Ergashev. Effect of Implantation of Active Metal Ions on the Elemental and Chemical Compositions of the CdTe Surface. Technical Physics, 2015, Vol. 60, No. 12, pp. 1880–1883. (№3. Scopus: IF = 1.3)
3. Ё.С. Эргашов, Д.А., Ташмухамедова, Ф.Г. Джурабекова, Б.Е. Умирзаков «Влияние микронеровностей поверхности на состав и электронные свойства пленок CdTe/Mo (111)» Известия РАН. Серия физическая, 2016, том 80, № 2, с. 162–164. (01.00.00, №26)
4. Умирзаков Б.Е., Эргашов Ё.С. Легирование пленок Si со стороны подложки. УФЖ, 2017, №2, с.105-108. (01.00.00, №5)
5. Эргашов Ё.С., Умирзаков Б.Е., Худойберганаева Ш.Ф., Мирзаев Д.А. Электронная спектроскопия наноструктур CdMeTe, созданных на поверхности CdTe методом ионной бомбардировки УФЖ, 2020, Vol. 22, №3, с.151-156. (01.00.00, №5)
6. Y.S. Ergashov, B.E. Umirzakov. Composition and Structure of a Nanofilm Multilayer System of the SiO₂/Si/CoSi₂/Si(111) Type Obtained via Ion Implantation Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2018, -V. 12, No. 4, -P. 816–818 (№3. Scopus: IF = 1.3)
7. Y. S. Ergashov, B. E. Umirzakov. Structure and Properties of a Bilayer Nanodimensional CoSi₂/Si/CoSi₂/Si System Obtained by Ion Implantation. Technical Physics, 2018, Vol. 63, No. 12, pp. 1820–1823(№3. Scopus: IF = 1.3).
8. Ё.С. Эргашов, Б.Е. Умирзаков. Состав, структура и электронные свойства CdTe с наноразмерными фазами, созданными в поверхностном слое имплантацией ионов Ba⁺. УФЖ, 2018, Vol. 20, №1, с.51-58. (01.00.00, №5)
9. Бурибаев И., Нурматов Н.А., Холов А., Эргашов Ё.С. Распределение ионно-имплантированного молибдена по глубине поверхностного слоя монокристалла ниобия, Вестник НУУз, №2, 2008 г., стр.57-60 (01.00.00, №3)
10. B. E. Umirzakov, D. A. Tashmukhamedova, M. A. Tursunov, Y. S. Ergashov, G. Kh. Allayarova. Escape Depth of Secondary and Photoelectrons from CdTe Films with a Ba Film. Technical Physics, 2019, Vol. 64, No. 7, pp. 1051–1054 (№3. Scopus: IF = 1.3)

11. Ergashov Y.S., Umirzakov B.E. and Allayarova, G.K. Electronic Structure of Single- Crystal $\text{CaF}_2(111)$ with Nanoscale Phases of Ca and Si. *Materials Sciences and Applications*, Vol. 9, No.12, 2018. pp.965-971. (№35 CrossRef: IF=1.62)
12. Ergashov Y.S., Umirzakov B.E. Electron spectroscopy of CdMeTe nanostructures created on CdTe surface under ion bombardment. *E3S Web of Conferences* 178, 01079 (2020) (№3. Scopus: IF = 0.5)
13. Ё.С. Эргашов, Б.Е. Умирзаков, Экспериментальное и теоретическое исследование влияние бомбардировки ионами Ar^+ на спектр валентных электронов монокристалла $\text{Si}(111)$ УФЖ, 2019, Vol. 21, №5, с.293-298. (01.00.00, №5)

II бўлим (II часть, part II)

14. Исаханов З.А., Умирзаков Б.Е., Кодиров Т., Халматов А.С., Эргашов Ё.С. Способ получения свободной многослойной нанопленки кремний-силицид-металл Патент на изобретение Республики Узбекистан № IAP05747, 25.12.2018
15. Умирзаков Б.Е., Эргашов Ё.С., Ташмухамедова Д.А. Кремний плёнкасида дисилицид металлнинг нанокристалл структурасини олиш усули. Патент на изобретение Республики Узбекистан № IAP06215, 29.05.2020
16. Н.А.Нурматов, Ё.С.Эргашов, Н.Талипов, Х.М.Сатторов, И.Х.Хамиджонов. Исследование изменения электронной структуры сплава на основе Nb-Zr при переходе в интерметаллические соединения, XXII Международная конференция “Взаимодействие ионов с поверхностью”, том. 1, 20 – 24 августа 2015 г., Москва, Россия. Стр. 354-357
17. Ё.С. Эргашов, Д.А. Ташмухамедова, Ф.Г. Джурабекова, Б.Е. Умирзаков, Влияние микронеровностей поверхности на состав и электронные свойства пленок $\text{CdTe}/\text{Mo}(111)$, XXII Международная конференция “Взаимодействие ионов с поверхностью”, том. 2, 20 – 24 августа 2015 г., Москва, Россия. Стр. 236-239.
18. Нурматов Н.А., Эргашов Ё.С., Хамиджонов И.Х. Исследование низкоэнергетической ионной имплантации атомов гафния в монокристаллические образцы молибдена и ниобия. Материалы Республиканской научной конференции «Неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах», НУУз, 1-2 февраль, 2017 г. стр.65-66
19. Умирзаков Б.Е., Эргашов Ё.С., Мамадалимов А.Т. Электронные свойства наноразмерных фаз силицидов металлов, созданных ионной бомбардировкой. Материалы Республиканской научной конференции «Неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах», НУУз, 1-2 февраль, 2017 г. стр.181-182

20. Umirzakov B.E., Ergashov Y.S., Donayev B.D. Electronic properties of nanodimensional phases of silicides of metals created by ion bombardment, Материалы республиканской научно-технической конференции “Актуальные проблемы энергосбережение при использовании альтернативных источников энергии”, КарГУ, 28-29 апрель 2017 г. стр.
21. Ё.С. Эргашов, Б.Д. Донаев, Ш.Х. Жураев, Получение двухслойные эпитаксиальные гетероструктуры $\text{CoSi}_2/\text{Si}/\text{CoSi}_2/\text{Si}$ “Замонавий физиканинг долзарб муаммолари” VII Республика илмий-назарий анжумани, Термиз, 19 – 20 май 2017 йил, стр.72-74
22. Б.Е. Умирзаков, Ё.С. Эргашов. Состав, структура и электронные свойства нанопленочные системы $\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{CoSi}_2/\text{Si}(111)$ / Труды XXIII Международной конференции «ВИП-2017», 21-25 августа 2017 г. Москва, Россия. Том 2, С.124-126
23. Ё.С. Эргашов, Б.Е. Умирзаков, Б.Д.Донаев. Электронная структура монокристаллического $\text{CaF}_2(111)$ с наноразмерными фазами Ca / Труды XXIII Международной конференции «ВИП-2017», 21-25 августа 2017 г. Москва, Россия. Том2, С.233-236
24. Y.S.Ergashov. Electronic states of single-crystal CaF_2 (111) with nanoscale phases of Ca and Si // SYMPOSIUM P, Dielectric nanocomposites for energy, environment and health: from fundamental to devices. E-MRS, Spring Meeting, Nice, France. May 27 – 31, 2019., p. P/p-2.8
25. Н. А. Нурматов, Ё.С. Эргашов, Г.Т. Рахманов, И.Х.Хамиджонов. Формирование фотоэлектронных спектров сплава ниобия-молибдена-циркония // Взаимодействие ионов с поверхностью ВИП-2019, Сборник трудов XXIV Международной конференции, Москва, 19-23 августа 2019 г. с.79-84.
26. Ё.С. Эргашов, Б.Е. Умирзаков. Электронная структура нанопленок CdMeTe , созданных на поверхности CdTe методом ионной бомбардировки // Взаимодействие ионов с поверхностью ВИП-2019, Сборник трудов XXIV Международной конференции, Москва, 19-23 августа 2019 г. с.179-182.
27. Умирзаков Б.Е., Эргашов Ё.С., Ташмухамедова Д.А., Уроков А.Н., Донаев Б.Д., Аллаярова Г.Х. Оптимальные режимы ионной имплантации и последующего отжига для формирования наноструктур $\text{CdMeTe}/\text{CdTe}$. IV Международной конференции по Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и нано-структурах, Фергана, 25-26 мая 2018 года, с.203-205
28. Ё.С. Эргашов, Б.Е. Умирзаков. Особенности формирования трехкомпонентных слоев CdTe ионами Ba^+ . XLVIII международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, 29-31 май, 2018, Москва, с.45.
29. Ё. С. Эргашов, Г.Х. Аллаёрова, Б.Е. Умирзаков. Влияние высокотемпературного прогрева на состав и электронного структуру тонких пленок $\text{Cd}_{0,5}\text{Ba}_{0,5}/\text{CdTe}$. XLVIII международной Тулиновской

- конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, 29-31 май, 2018, Москва, с.156.
30. Erashov Y.S., Allayarova G.X., Umirzakov B.E., Composition, Structure and electronic functions of CdTe, with nanosized phase, created by subsurface layers implanted of Ba// SYMPOSIUM P, Solution processing and properties of functional oxide thin films and nanostructures-III, E-MRS, Spring Meeting, Strasbourg, France. May 18 – 22, 2018., p. BB/p-VII.10.
31. Эргашов Ё.С., Умирзаков Б.Е. Электронная структура нанопленок CdMeTe. “Яримўтказгичлар физикасининг ва қайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантиришнинг замонавий муаммолари” Республика илмий-амалий анжумани материаллари, Андижон, 2018 йил 20-21 апрель. с.121
32. Б.Е. Умирзаков, Ё.С. Эргашов. Экспериментальное и теоретическое исследование влияние бомбардировки ионами Ar^+ на спектр валентных электронов монокристалла Si(111) // V международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛАПЛАЗ-2019, Москва, 2019 г. 12-15 февраль, с.178-179.
33. Ё.С. Эргашов, Р.М. Ёркулов, С.Б. Орромиддинов, А.К. Ташатов. Б.Е. Умирзаков. Исследование влияние бомбардировки ионами Ar^+ на спектр валентных электронов монокристалла Si(111). Физика возобновляемых источников энергии и устойчивой окружающей среды. республиканский научно-технической конференции, 24-25 апрель 2019 г, Карши, с.25-26

Автореферат “Til va adabiyot ta’limi” журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилиб, ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнлар ўзаро мувофиқлаштирилди.

Бичими 60x84^{1/16}. Рақамли босма усули. Times гарнитураси.
Шартли босма тобоғи: 4. Адади 100 нусха. Буюртма № 107.

Гувоҳнома № _____
“ _____ ” босмаҳонасида чоп этилган.
Босмаҳона манзили: _____