

**ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.02/30.30.12.2019.FM.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

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

ДОНАЕВ САРДОР БУРХАНОВИЧ

**ИККИ КОМПОНЕНТЛИ МАТЕРИАЛЛАР (PdBa, TiN, GaAs, GaP и
CaF₂) АСОСИДА ҲОСИЛ ҚИЛИНГАН НАНОСТРУКТУРАЛАРНИНГ
ЭЛЕКТРОН СТРУКТУРАЛАРИ ВА ФИЗИК ХУСУСИЯТЛАРИ**

01.04.04 – Физик электроника

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

Ташкент – 2020

Докторлик (DSc) диссертацияси автореферати мундарижаси
Оглавление автореферата докторской (DSc) диссертации
Contents of doctoral (DSc) dissertation abstract

Донаев Сардор Бурханович

Икки компонентли материаллар (PdBa, TiN, GaAs GaP ва CaF₂) асосида хосил қилинган наноструктураларнинг электрон структуралари ва физик хусусиятлари..... 4

Донаев Сардор Бурханович

Электронная структура и физические свойства наноструктур, созданных на основе двухкомпонентных материалов (PdBa, TiN, GaAs, GaP и CaF₂)..... 26

Donaev Sardor Burkhanovich

Electronic structure and physical properties of nanostructures based on two-component materials (PdBa, TiN, GaAs, GaP and CaF₂)..... 50

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 56

Докторлик (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2020.4.DSc/FM166 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация И. Каримов номидаги Токент давлат техника университетида бажарилган.

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

Илмий маслаҳатчи:

Умирзаков Болтахуджа Ерматович
физика-математика фанлари доктори,
профессор

Расмий оппонентлар:

Кремков Михаил Ветальевич
физика-математика фанлари доктори

Ташатов Алланазар Каршиевич
физика-математика фанлари доктори

Ниматов Самад Жайсанович
физика-математика фанлари доктори

Етакчи ташкилот:

Фаргона политехника институти

Диссертация химояси Ион-плазма ва лазер технологиялари институти ҳузуридаги DSc.02/30.30.12.2019.FM.65.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2020 йил "03" 12 соат 16^о даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 100125, Тошкент ш., Дўрмон йўли кўчаси 33-уй. Тел./Факс: (+99871) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz. Ион-плазма ва лазер технологиялари институти мажлислар зали).

Диссертация билан Ион-плазма ва лазер технологиялари институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (№ 6 рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 100125, Тошкент ш., Дўрмон йўли кўчаси 33-уй. Тел./Факс: (+99871) 262-31-69.

Диссертация автореферати 2020 йил "26" 11 кун тарқатилди.
(2020 йил "26" 11 даги № 6 рақамли реестр баённомаси).



Х.Б.Ашуров

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

И.Д. Ядгаров

Илмий даражалар берувчи
Илмий кенгаш илмий котиби,
ф.-м.ф.д., к.и.х.

Ш.Д. Пайзиев

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

КИРИШ (докторлик диссертациясининг (DSc) аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Сўнги вақтларда наноўлчам тизимлар физикасидаги фундаментал муаммолар ва амалий муаммоларни ҳал қилишда фойдаланиладиган наноўлчамли фазалар ва кўп қатламли тузилмаларни ҳосил қилиш ва физик хусусиятларини ўрганишга катта эътибор қаратилмоқда. Бундай тузилмалар яримўтказгичли қурилмалар ва интеграл микросхемалар учун сифатли янги ўта юқори частотали электрон қурилмаларни, хусусан, қисқа тўлқинли ва ионлаштирувчи нурланишни планар интеграл детекторлари, УБ нурлари детекторлари, баллистик транзисторлар, интеграл микросхемалар, қуёш батареялари ва бошқаларни яратишга имкон беради. Бу муаммоларнинг барчаси наноўлчамли плёнкалар ва гетероэпитакциал тизимларни шакллантириш ва қайта ишлаш жараёнида физик жараёнларни ўрганиш орқали ҳал қилинади. Хусусан, янги дискрет ва интеграциялашган қурилмаларни яратиш учун PbBa , Si , GaAs , TiN ва CaF_2 асосидаги юпқа плёнкалар ва гетероструктуралар кенг қўлланилади. Шу билан бирга, микроэлектроникадаги тузулиши ва технологик ечимлар наноўлчам тузилмаларга ўтиш ва операцион хусусиятларини (тезлик, барқарорлик, қўллаш вақти) яхшилашни ва қурилмаларнинг асосий элементларининг геометрик ўлчамларини доимий равишда пасайтиришни талаб қилади.

Шу муносабат билан, кўп қатламли квант-ўлчамли гетероструктуралар ва уларга наноконтактлар кўринишидаги янги материалларнинг шаклланиш механизмларини яратиш ва ҳосил қилиш замонавий электрон асбобсозликнинг **долзарб муаммоларидан** биридир.

Молекуляр нурли эпитаксия (МНЭ) бундай гетероэпитакциал плёнкалар ва кўп қатламли тизимларни шакллантириш учун энг мақбул технология. Бироқ, ушбу технологиянинг баъзи камчиликлари бор. Биринчидан, кўп ҳолатларда, қалинлиги 10 дан 20 нм гача бўлган наноплёнкаларни олишга имкон бермайди. Иккинчидан, индивидуал нанокристалл фазаларини олиш учун бир вақтнинг ўзида жуда мураккаб литографик технологиядан фойдаланиш керак. Ҳатто замонавий литография усуллари ҳам 20-25 нм ўлчамдаги ва 50 дан 60 нм гача бўлган наноўлчамли тузилмаларни олиш имкониятини бермайди. Шунинг учун, янги наноўлчамли тузилмаларни ва қурилма сифатининг кўп қатламли квант-ўлчамидаги гетерокомпозицияларини олиш учун кичик энергияли ион бомбардимони билан биргаликда МНЭ усулини қўллаш керак. Шунинг учун янги наноўлчамли материаллар ва кўп қатламли тузилмаларни синтез қилишга қаратилган комплекс экспериментал назарий тадқиқотлар замонавий физик электрониканинг истиқболли соҳаси ҳисобланади.

Диссертация иши Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2013 йил 7 февралдаги ПФ-4947 сонли “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида” Фармонида

белгиланган вазифаларга мос келади¹. Диссертация бўйича олиб борилаётган тадқиқотлар 2015 йил 15 декабрда қабул қилинган “2011-2015 йилларда Ўзбекистон Республикаси саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида”ги №ПФ-1442 сонли, 2017 йил 7 февралдаги “2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича Ҳаракатлар стратегиясини амалга ошириш бўйича кейинги чора-тадбирлар тўғрисида”ги №ПФ-4947 сонли Президент Фармонини, 2017 йил 17 февралдаги “Фанлар академияси фаолияти, илмий-тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги №ПҚ-2789 сонли, 2019 йил 22 августдаги “Иқтисодий ва ижтимоий соҳаларнинг энергия самарадорлигини ошириш, энергия тежайдиган технологияларни жорий этиш ва қайта тикланадиган энергия манбаларини ривожлантириш бўйича тезкор чора-тадбирлар тўғрисида”ги ПҚ-4422-сонли Президент Қарорини, шунингдек, Республикада сўнгги йилларда ушбу соҳада қабул қилинган бошқа меъёрий ҳужжатларга киритилган вазифаларни бажаришда маълум даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг Республика фан ва технологиялари ривожланиши устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот Ўзбекистон Республикаси фан ва технологияларининг устувор йўналишларига мувофиқ амалга оширилди: II "Физика, астрономия, энергетика ва машинасозлик", III "Энергетика, энергияресурс, тежамкорлиги, транспорт, машина ва асбобсозлик, замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника ва электрон асбобсозлиги ривожланиши" ва III "Қайта тикланадиган энергия манбаларини ишлаб чиқиш ва улардан фойдаланиш".

Диссертация мавзуси бўйича халқаро илмий тадқиқотлар шарҳи².

Яримўтказгич – диэлектрик – яримўтказгич, металл – диэлектрик – яримўтказгич каби кўп компонентли материалларнинг физик-кимёвий хусусиятларини ўрганиш дунёнинг етакчи мамлакатларининг илмий марказлари, институтлари ва университетларида, хусусан, "ИИЧТ Исток" АЖ, РФАнинг микро тузилмалар физикаси институтида (Россия) олиб борилмоқда. Кристалл ўсиш механизмларини ўрганиш маркази (Франция), Жоржия технология институти, Америка физика институти (АҚШ) ва бошқалар.

Диссертация иши йўналиши бўйича бир қатор долзарб муаммолар ҳал қилинди ва муҳим илмий натижалар қўлга киритилди: Газсимон муҳитда фаоллаштирилган PdBa қотишмаларининг ташқи таъсирга эмиссия самарадорлиги ва барқарорлигини оширишнинг асосий механизмлари экспериментал равишда аниқланди (Дюбуа ва бошқалар, “ИИЧТ Исток” АЖ,

¹2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича ҳаракатлар стратегияси / Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли Фармонига 1-илова, п- 3.2.

² Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи: www.sciencedirect.com, www.springerlink.com, www.elsevier.com, www.scopus.com, www.nature.com, www.oxfordjournals.org, www.sciencemag.org, www.northcarolina.edu, www.umb.edu, www.osu.edu, www.stonybrook.edu, www.bw.edu, www.msu.ru ва бошқа манбаалар асосида ишлаб чиқилган.

Фрязино ш.); GaAs/AlGaAs яримўтказгичлар панжараси учун математик моделлаштириш ва экспериментал 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); Экспериментал равишда нанокластларни электрон, биологик ёки кимёвий сақлаш қурилмаларида, кейинги авлод маълумотларини ёзиб олишда ва ўқишда катта сифимли магнит ва оптик хотира тизимларини ривожлантиришда фойдаланиш мумкинлиги аниқланди (Т.- Х. Ли ва бошқ., Кимё ва биокимё мактаби, Жоржия штати, Атланта шаҳри Технологиялар институти, АҚШ); 3 - 9 монокатлам (2,4 ÷ 7,2 Å) қопламлари оралиғида ҳосил бўлган кобалт плёнкалари ферромагнитик бўлиб, уларнинг осон магнитланиши ўқи сиртга нисбатан мос йўналишга эга, бу эса ҳосил қилувчи қатламнинг силлиқлиги билан боғлиқ (Х.В. Ченг ва бошқ., Америка Физика Институти, АҚШ).

Ҳозирги вақтда наноўлчамли тузилмалар ва белгиланган физик хусусиятларга эга кўп қатламли нанодаврли тизимларнинг физик-кимёвий хусусиятларини олиш ва ўрганиш бўйича назарий ва экспериментал тадқиқотлар жадал олиб борилмоқда.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Газ разрядли катод ва электр вакуум мосламалари, магнетрон ва бошқа ўта юқори частотали қурилмалар, металл-қотишма, скандат ва оксид катодлари ҳозирги пайтда муваффақиятли қўлланилмоқда. Б.Ч. Дюбуа, В.И.Капустин, Т.Кешикова, Р.Ж.Шимидзи ва бошқалар илмий изланишлар олиб боришмоқда ва уларнинг хусусиятларини ўрганишда фаол иштирок этиб келишмоқда. Pd-Wa катодларининг таркибий қисмлари нанокристалл тузилишга эга эканлиги аниқланди, шу билан бирга турли кристаллографик йўналишдаги кристаллитларнинг ўлчамлари сезиларли даражада фарқ қилиши ва материалларнинг технологик хусусиятига боғлиқ бўлади. Иккала металлопор ва ҳам скандат катодларининг эмиссия хусусиятлари барий оксиди кристаллитларининг эмиссия хусусиятлари билан белгиланади, улар катод материалида уни ишлаб чиқариш ва фаоллаштириш босқичида ҳосил бўлади ва барий оксидидаги нуқсонларнинг тури ва концентрацияси билан белгиланади.

Сўнгги ўн йилликларда яримўтказувчилар суперпанжарасига (СП) бўлган қизиқишнинг ортиши қуйидагиларга боғлиқ: биринчидан, улар кучсиз электр майдонларида чизиқли бўлмаган хусусиятларга эга бўлади ($10^2 - 10^4$ В/см); иккинчидан, улардаги электронларнинг тебраниш частоталари (Блохов тебранишлари деб аталадиган) терагерц интервалида бўлади ва статик электр майдонининг кучи билан бошқарилади; учинчидан, технологияни ривожлантиришнинг замонавий даражаси элементар ячейкалар билан кўп даврли суперпанжараларни шакллантиришга имкон беради ва шу билан ташувчининг тарқалиш қонунини тақлид қилади. GaAs-AlGaAs яримўтказгичли гетероструктуранинг ўта юпқа GaAs қатлами (квант ўра)

билан оптик ассимиляция спектрларининг характерли босқичли тузилиши шаклида ўлчов квантлаш эффектининг намоён бўлиши биринчи марта олимлар Р.Дингле, В.Вигманн ва С.Х.Генри томонидан ўрганилган. Х.В.Ченг ва академик Ж.И.Алферов лазерларда ва турли хил оптоэлектроник қурилмаларда ишлатиладиган GaAs ва GaP асосидаги кўп қатламли даврий гетероструктураларни ҳосил қилишди. Улар квант нуқталари ва плёнкалари бўлган гетероструктуралар яримўтказгичли кристалларнинг параметрларини, масалан, тақиқланган соҳа, эффектив масса ва заряд ташувчиларнинг ҳаракатчанлиги ва электрон энергия спектри параметрларини бошқаришга имкон беришини кўрсатди.

Проф. Б.Е.Умирзоқов, М.Т.Нормуродов ва унинг шогирдлари турли хил материаллар (металлар, яримўтказгичлар, диелектриklar) сиртида ва юза остида наноўлчамли структураларни яратиш учун биринчи марта ион имплантацияси усулини қўлладилар. Уларнинг элементар ва кимёвий таркиби, кристалл ва электрон тузилиши, алоҳида кластер фазаси ва наноплёнкаларнинг геометрик ўлчамлари, шунингдек қиздириш пайтида уларнинг динамикаси ўрганилди. Белгиланган физик хусусиятларга эга наноструктуралар ҳосил қилиниб, уларнинг шаклланишининг асосий механизмлари аниқланди.

Диссертация мавзусининг диссертация иши бажарилган ташкилот билан ўзаро алоқаси. Диссертация иши Тошкент давлат техника университетининг “Умумий физика” кафедрасида Ўзбекистон Республикаси Тадқиқот ва ривожлантириш Давлат дастури асосида ва № Ф2-41 "Жараёнларни назарий ва экспериментал тадқиқ қилиш, атомларни киритиш, наноўлчам системаларни шакллантириш ва турли табиатдаги материалларга (металлар, яримўтказгичлар ва диелектриklar) ионларни киритиш пайтида кучланишли қатламларни шакллантириш" (2012-2016 йй.); № ЁФ-2-12 "Наноўлчам тузилишларнинг ҳосил бўлишининг W, Pd ва PdBa нинг эмиссия хусусиятларига таъсири" (2016-2017); № А-4-7 - "Микро ва оптоэлектрон қурилмалар, шу жумладан куёш энергияси учун монокристалли кремний ва галлий арсенидли плёнкаларнинг гетероэпитаксиал наноўлчам тузилмаларини синтез қилиш технологиясини ишлаб чиқиш" (2015 - 2017), шунингдек ОТ-Атех -2018-503 - "Si, Ni қатламлари ва уларнинг оксидларининг электрон тузилишини, эмиссия ва оптик хусусиятларини ион бомбардимони билан ўзгартириш" (2018 - 2020) лойиҳалари доирасида олиб борилди.

Тадқиқотнинг мақсади - икки компонентли материалларнинг юзасида ва юза остида наноўлчамли системалар ва қатламларни ҳосил қилиш, уларнинг таркибини, фазавий тузилишини, энергия ҳолатини ҳар томонлама ўрганиш, кузатилган ҳодисаларнинг механизмларини, аниқланган таъсирларни янги қаттиқ жисмли электрон қурилмаларда қўллаш бўйича амалий тавсиялар ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқот вазифалари:

ион ва электрон бомбардимон, термал ва лазер билан ишлов бериш орқали Pd-Va (Va - 1,5%) электрон эмиссия ва оптик хусусиятларининг ўзгаришининг асосий механизмларини аниқлаш;

кейинчалик TiNга O⁺ ионларини имплантация қилиш орқали TiON типидаги наноўлчамли системаларни олиш ва кейинги қиздириш. TiON юпқа плёнкаларининг таркиби, сирт морфологияси, кристалли ва электрон тузилишини ўрганиш;

GaAlAs нанокристалл фазаларини унинг юзасида ва юза ости қатламида шаклланишида GaAs плёнкасининг эмиссия ва оптик хусусиятларининг асосий механизмларини аниқлаш. Фотоэлектронлар ва GaAs ва GaAlAs ҳақиқий иккиламчи электронларнинг чиқиш чуқурликлари қийматларини ҳисоблаш;

Al ионларини GaP га имплантация қилишда нанокристаллин фазалари ва GaAlP плёнкалари шаклланишининг қонунийлигини ўрганиш ва қиздириш билан биргаликда ўрганиш;

GaAs ва GaP плёнкалари асосида яратилган уч компонентли юпқа плёнкалар GaMeAs ва GaMeP (бу ерда Me Al, Na ва In) электрон ва кристалл тузилишини ўрганиш;

CaF₂ плёнкалари сиртининг морфологияси, таркиби, тузилиши ва физикавий хусусиятларига инерт газлар ва электронлар ионлари билан бомбардимон таъсирини қиёсий ўрганиш;

CaF₂ плёнкалари юзасида Si ва бошқа материалларнинг бир хил турдаги (таркиби ва ўлчамлари) нанокристалл фазаларини мунтазам равишда биридан ажратиб олиш усулини, шунингдек, CaF₂-да алоқа қилувчи металл атомларининг тарқалиш чуқурлигини кескин камайтириш усулини ишлаб чиқиш;

янги электрон асбобларни ишлаб чиқишда олинган натижалардан фойдаланиш бўйича илмий асосланган тавсиялар бериш.

Тадқиқот объектлари PdVa қотишмаларининг поликристалл плёнкалари, (Va-1,5÷4 ат.%); - TiN, GaAs, GaP, CaF₂ нинг монокристалли плёнкалари.

Тадқиқот предмети Металлар ва металл қотишмалари, ярим ўтказгичлар ва диелектрик плёнкалар юзасида нанокристаллар ва наноплёнкаларнинг пайдо бўлишининг қонуниятлари ва физикавий механизмлари.

Тадқиқот усуллари. Оже - электрон спектроскопия (ОЭС), катта энергияли электрон дифраксияси (КЭЭД), расторли электрон микроскопия (РЭМ), ултрабинафша фотоэлектрон спектроскопияси (УФЭС), эластик қайтган электрон спектроскопия (ЭҚЭС), энергиясини характерли йўқотган электронлар спектроскопияси (ЭХЙЭС), атом кучланишли микроскопи (АКМ).

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

турли усуллар билан фаоллашганда Pd-Va қотишмасининг эмиссия самарадорлигини ўзгартиришнинг асосий механизмлари аниқланди: юқори вакуум шароитида ва ҳар хил газлар муҳитида иситиш, лазер билан ишлов бериш, юқори вакуум ва кислород атмосферасига ионларни киритиш;

биринчи марта $Ti_{0.4}O_{0.6}N$ наноплёнкалари O_2^+ ионларини TiN га имплантация қилиш орқали олинган. $TiON$ плёнкаси тор зонали айниган n -типидаги яримўтказгич бўлиб, ўлчамлари 50-100 нм бўлган монокристаллдан иборат эканлиги аниқланди.

биринчи мартаба $GaAlAs$ ва $GaAs(111)$ плёнкаларининг кристаллографик чегара қатламлари аниқланди.

биринчи марта $GaAs$ ва $GaAlAs$ плёнкаларидан ҳақиқий иккиламчи электронлар ва фотоэлектронлар учун чиқиш зонасининг чуқурлиги аниқланди. Унинг юзасида $GaAlAs$ наноплёнкасини шакллантириш жараёнида $GaAs$ плёнкасининг эмиссия ва оптик хусусиятларининг ўзгариши асосий механизмлари аниқланди.

ионларни имплантация қилиш натижасида олинган уч компонентли фазалар ва $GaAlP$, $GaNAs$ ва $GaInAs$ плёнкаларининг таркиби, электрон ва кристалли тузилиши биринчи марта ўрганилди.

Ar^+ ионлари ва электронлар билан бомбардимон қилинаётганда CaF_2 плёнкалари сиртининг таркиби, тузилиши ва хусусиятларининг ўзгаришининг асосий қонуниятлари ўрганилди. Иккала ҳолатда ҳам сирт Ca атомлари билан бойитилганлиги кўрсатилган. Ионларни бомбардимон қилишда, дозани кўпайиши билан, биринчи навбатда Ca атомлари билан бойитилган ҳудудлар пайдо бўлади ва электрон бомбардимонда сирт худди шундай ўзгаради. CaF_2 юзасида юпқа Ca плёнкаси ҳосил бўлганда, CaF_2 таркибидаги киритилувчи металнинг диффузия чуқурлиги 2 барабар камайиши аниқланди.

биринчи марта CaF_2 плёнкалари юзасида Ar^+ ионлари билан бомбардимон қилиш натижасида мунтазам равишда фазовий марказлашган структура яратилди, бу Si плёнкаларининг бир хил фазаларини олиш имконини беради.

Тадқиқотнинг амалий натижалари: Pd - Va нинг ион ва лазер ёрдамида фаоллаштирилиши юқори ҳароратли қиздириш тизимини магнитронларнинг катод бирикмасидан чиқариб ташлаш имконини беради, бу уларнинг барқарор юқори самарали ишлашини таъминлайди ва ишлаш вақтини 100 баробар ёки ундан ортиқ вақтга оширади;

энергия билан бошқариладиган диапазонли бўшлиққа эга бўлган $Ga_{1-x}Al_xAs$ ва $Ga_{1-x}Al_xP$ туридаги наноструктураларни олиш учун энг мақбул шароитлар (ионли бомбардимон, қиздириш) аниқланди;

$Si/CoSi_2/Si$ туридаги наноэпитаксиал гетероструктуралар металл асосли транзисторларни ишлаб чиқишда фойдаланиш учун тавсия этилади. $Ca/CaF_2/Si$ ва $CoSi_2/CaF_2/Si$ турларининг наноэпитаксиал гетероструктуралари янги МИС транзисторлари ва интеграл схемаларини, юқори частотали (рентген ва ултрабинафша) детекторларини, Шотткий тўсиқлари билан фотодетекция қилинган интеграл тузилмаларни ишлаб чиқиш учун тавсия этилади.

Тадқиқот натижаларининг ишончлиги замонавий илмий ва экспериментал усуллардан фойдаланиш билан тасдиқланади ва зарур экспериментлар статистикаси, маълумотларни ўлчаш ва қайта ишлаш учун мустақил усуллар тўпламидан фойдаланиш, шунингдек, олинган

натижаларнинг бошқа муаллифларнинг натижалари мувофиқлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Илмий аҳамияти: кўрсатилган физик хусусиятларга эга юпқа қатламли тизимларни яратишнинг илмий ва амалий асослари ишлаб чиқилган; Юпқа плёнкаларнинг ўсиш механизмларининг хусусиятлари аниқланган ва уларнинг таркиби, тузилиши ва электрофизик хусусиятлари бўйича янги натижалар плёнкаларда атомларнинг ўзаро таъсири жараёнларининг назарий моделларини куриш ва яримўтказгичлар асосида гетероэпитаксиал плёнкаларнинг шаклланиши ва ўсиши назариясини ривожлантириш учун асосдир.

Амалий аҳамияти: ушбу ишда яратилган технологик ишланмалар микро ва ўта юқори частотали электрон қурилмалари учун зарур бўлган янги қатламлари, сезгир электрон сенсорлар, қуёш батареялари билан алоқа ўрнатиш учун зарур бўлган янги кўп қатламли гетероструктурали плёнкаларни яратиш ва яратишда фойдаланиш учун тавсия этилади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.

Ионли бомбардимон ва кейинги қиздириш жараёнида иккикомпонентли материаллар сиртида наноўлчамли структуралар ҳосил бўлиши ва физик хусусиятларининг ўзгариши қонуниятларини аниқлаш асосида:

№ОТ-ФЗ-13: «Кремний-силицид-металл эркин кўп қатламли наноплёнкалари структураларининг шаклланиш механизмлари ва уларнинг электрон ва кристалл структураларини ўрганиш» номли фундаментал лойиҳа илмий-техникавий вазифаларини бажаришда яримўтказгичли ва диэлектрик плёнкалар сиртида наноўлчамли фазалар ва плёнкалар шаклланишининг асосий қонуниятларини аниқлашда фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академиясининг 2020 йил 5 октябрдаги №2/1255-2128 сонли маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш наноўлчамли гетероструктураларнинг шаклланишида имплантацияланаётган ионлар энергиясининг, дозаларининг ва кейинги қиздиришнинг ҳароратли диапазонларини аниқлаш ҳамда Si/Cu юзасида ион имплантация усули билан ҳосил қилинган наноўлчамли SiO₂/Si/Cu гетеротизимининг электрон тузилишини ўрганиш имконини берди.

GaAs ва GaAlAs плёнкаларидан ҳақиқий иккиламчи электронлар ва фотоэлектронлар учун чиқиш зонасининг чуқурлиги аниқлаш, унинг юзасида GaAlAs наноплёнкасини шакллантириш жараёнида GaAs плёнкасининг эмиссия ва оптик хусусиятларининг ўзгариши, шунингдек CaF₂ юзасида юпқа Ca плёнкаси ҳосил бўлганда, CaF₂ таркибидаги киритилувчи металнинг диффузия чуқурлиги 2 барабар камайиши аниқлаш “Ўзэлтехсаноат” АҚ таркибидаги “Фотон”АЖда қўлланилган (2020 йил 25 сентябрдаги №04-1/1748 сонли маълумотнома). Илмий натижалардан фойдаланиш Si ва CaF₂ асосида ёруғликка сезгирлиги юқори бўлган наноўлчамли структуралар олиш ҳамда GaAs, GaP ва TiN асосида диодлар ва оптик қурилмалар ва улар учун ультраюпқа контактлар ҳосил қилиш имконини берган.

Яримўтказгичли намуналар ситрида юпқа контакт қатламлар ҳосил қилиш усули ишлаб чиқилқан ва “Ўздонмахсулот” АК да қўлланилган (2020 йил 9 октярдаги №10-1-12/130-1653 сонли маълумотнома).

Илмий натжалардан фойдаланиш металл контактларнинг ишончилигини ошириш, узоқ муддат ишлашини таъминлаш ва электрон курилмаларнинг коммутацион қисмларини такомиллаштириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқотнинг асосий натижалари қуйидаги халқаро ва республика конференциялари ва симпозиумларида муҳокама қилинди: “Зарядланган зарраларнинг кристаллар билан ўзаро таъсири физикаси” бўйича 48 ва 49- халқаро анжуманлари (Москва, 2018, 2019), Ионларнинг сирт билан ўзаро таъсири бўйича XXIII, XXIV халқаро анжуманлари (Москва, 2017, 2019), European Materials Research Society Spring Meeting (Strasbourg - 2018, Nice - 2019), “Лазер, Плазма тадқиқотлари ва технологиялари” халқаро анжумани (Москва, 2019), VII Халқаро физик электроника анжумани (Тошкент, 2018), “Фотоэнергетикада наноструктурали яримўтказгич материаллар” халқаро илмий анжумани (Тошкент, 2020).

Тадқиқот натижаларининг чоп этилганлиги. Диссертация мавзуси бўйича олинган натижалар жами 33 та, жумладан 1 та монография ҳамда Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссияси томонидан докторлик диссертациясининг асосий илмий натижалари чоп этишга тавсия этилган халқаро ва республика илмий журналларида 12 та мақола чоп этилган.

Диссертациянинг структураси ва ҳажми. Диссертация иши кириш қисми, бешта боб, хулоса ва 220 та адабиётлар рўйхатидан иборат, 88 та расм ва 15 та жадвални ўз ичига олган 207 бетлик матнни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯ ИШИНING АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида муаммонинг долзарблиги асослантирилган, диссертация ишининг мақсад ва вазифалари баён қилинган, олинган натижаларнинг илмий янгилиги ва амалий аҳамияти кўрсатилган ва ҳимоя қилиш учун киритилган асосий натижалар келтирилган.

Диссертация ишининг биринчи **“Ион бомбардимони натижасида материаллар юзасида наноўлчамли системаларни яратиш ва хусусиятларини ўзгартириш бўйича адабиёт маълумотларини қисқача таҳлил қилиш”** бобида илмий адабиётлар таҳлиliga бағишланган бўлиб, ион бомбардимон усули билан материаллар юзасида наноўлчам структураларни яратиш ва хоссаларини ўзгартириш тўғрисида адабиёт маълумотлари қисқача таҳлил қилинган. Унда металл қотишмаларининг фаоллашиши, металл-қотишма, GaAs ва CaF₂ юзасида уч компонентли плёнкалар шаклланиши ва асосий қонуниятлари ва эмиссия хусусиятларини, шунингдек кристалл ва электрон тузилиш хусусиятлари ва уларни материалларнинг электрофизик ва оптик хусусиятларига таъсирини ўрганишга бағишланган адабиётларнинг шарҳи берилган.

Тажриба ишларининг танқидий таҳлили шуни кўрсатадики:

Va ионлари билан бомбардимон қилинганда Pd нинг юза остида интерметалик бирикмалар ҳосил бўлиши жараёнлари яхши ўрганилмаган. Лазер нурланиши билан фаоллаштирилган Pd-Va қотишмасининг электрон структуралари ва эмиссия хусусиятлари етарлича ўрганилмаган;

Pd-Va сиртининг чанглатиш коэффициентига энергия ва актив метал ионлари дозасининг таъсири ўрганилмаган. Ионни бомбардимон қилиш ва ундан кейин ювишнинг Va ва Pd-Va плёнкалари билан Pd таркибига, электрон тузилишига, эмиссия ва оптик хусусиятларига таъсири ўрганилмаган;

O₂⁺ ионлари билан бомбардимон қилишнинг TiN плёнкалари таркиби ва тузилишига таъсири деярли ўрганилмаган;

GaAlAs/GaAs плёнкаларининг таркиби, тузилиши, эмиссион, оптик ва электрофизик хусусиятлари тўғрисида ишончли маълумотлар йўқ. GaAs юзасида яратилган икки ва уч компонентли наноструктураларнинг электрон тузилиши ўрганилмаган;

Al⁺ ионлари имплантациясининг GaP сиртининг таркиби, электрон ва кристалл тузилишига таъсири деярли ўрганилмаган;

Электрон ва ион бомбардимонининг CaF₂/Si плёнкаларининг морфологияси, таркиби ва сирт тузилишига таъсири етарлича ўрганилмаган;

МНЭ йўли билан олинган CoSi₂/CaF₂, Al/CaF₂, Si/CaF₂ системаларини ион бомбардимон қилиш билан атомларнинг кириш чуқурлиги профилига таъсири тўғрисида ишончли маълумотлар йўқ;

CaF₂ юзасида ҳосил бўлган Si нанокристал фазаларининг морфологияси, электрон ва кристалл тузилиши ўрганилмаган.

Таҳлил асосида диссертация ишининг мақсади ва вазифалари шакллантирилади.

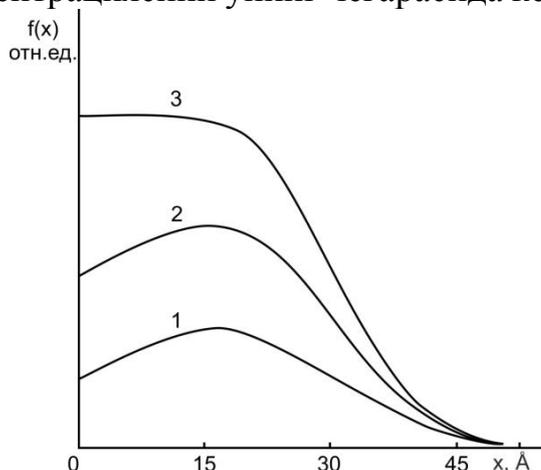
Диссертациянинг **"Техника ва тажриба усуллари"** деб аталган иккинчи бобида яратилган ва ишлатилган экспериментал қурилмаларнинг тавсифи, қаттиқ сиртларни қайта ишлаш ва тадқиқ қилиш техникаси ёритилган. Ишда иккита юқори вакуумли технологик қурилмалар ишлатилган. Стандарт (LAS-2200 типидоғи) МНЭ усули бўлган биринчи қурилмада CoSi₂/Si, GaAs/Ge, GaP/Ge, CaF₂/Si плёнкалари олинган ва эпитаксиал плёнкаларнинг таркиби ва кристалл тузилиши ўрганилган ва уларнинг қалинлиги ўлчанган. Иккинчи экспериментал қурилмада ион имплантацияси, термал ва лазер билан қиздириш ва плёнкаларнинг физик-кимёвий хусусиятларини ўрганиш ВЭС ва ФЭС усуллари тўплами ёрдамида амалга оширилди. Сирт микрорелефи тўғрисида маълумот олиш ва кристалл панжарасининг параметрларини аниқроқ аниқлаш учун стандарт қурилмалар ишлатилган: JEOL JSM-7200F расторли электрон микроскопи ЭМР – 102, электронографи ва ХЕ-100 атом кучланишли микроскопи (АСМ).

Диссертациянинг **"Va⁺, Ar⁺ ва O₂⁺ ионларининг Pd, PdVa ва TiN таркибига, тузилишига ва электрон хусусиятларига таъсири"** деб аталган учинчи бобида Pd сирт ости қатламларида интерметалик бирикмалар ҳосил бўлиши ўрганилган, фаол металл ионларининг энергияси ва дозасини сиртнинг чанглатиш коэффициентига таъсири, шунингдек. Va сирт иони

билан Pd нинг эмиссия хусусиятларига Ba⁺ ионларининг киритилишидаги хусусиятлари ўрганилган.

Юқори дозаларда нишоннинг таркибига таъсир кўрсатадиган жараёнлар кўйидаги жараёнлар билан белгиланади: - намунага атомларни киргизиш ва аралашмаларининг ҳосил бўлиши, каскадни аралаштириш, каскад зонаси худудида гомогенизация, жорий қилинган киритилма атомларнинг юқори концентрацияси билан боғлиқ бўлган эластик кучланишларнинг енгиллиги, шунингдек радиациявий кучайтирилган диффузия билан боғлиқ ишлар. Мувоzanатсиз нуқсонларнинг киритилиши билан (иккинчи босқич юқори хароратли қиздириш).

Чанглатиш жараёни сиртни нур томон ҳаракатланишига олиб келади. Тескари йўналишда эластик кучланишли релаксация ҳосил бўлади. Юқорида санаб ўтилган барча омилларнинг биргаликдаги таъсири ионланган қатламнинг қалинлиги бўйича аралашмаларнинг деярли доимий концентрациясини унинг чегарасида кескин пасайишига олиб келади (1-расм).



1-расм. Турли хил нурланиш дозаси D , см^2 : 1 - $5 \cdot 10^{14}$; $E_0 = 0,5$ кэВ билан киритилган Pd-Ba намуналарида Ba нинг жойлашиш функциялари; 2 - $5 \cdot 10^{15}$; 3 - $6 \cdot 10^{16}$.

Агар юқори нурланиш дозасида $n_{Ba} = \text{const}$ қалинлиги x_{max} бўлган қатламда бўлади деб фараз қилсак

$$\frac{dn_{Ba}}{dt} = \frac{J}{x_m} \left(1 - \alpha(E) \frac{n_{Ba}}{n_{Pd}} \right) \quad (1)$$

Бу ерда J - ток зичлиги, x_m - ҳосил бўлган қатламнинг қалинлиги $\alpha(E) \frac{n_{Ba}}{n_{Pd}} = K_{Ba}$ - киритилган барийнинг хусусий коэффиценти. Кейин

$$\frac{\bar{n}_{Ba}}{n_{Pd}} = \frac{1}{\alpha(E)} \left[1 - \exp \left(-\frac{D - \alpha(E)}{x_m n_{Pd}} \right) \right] \quad (2)$$

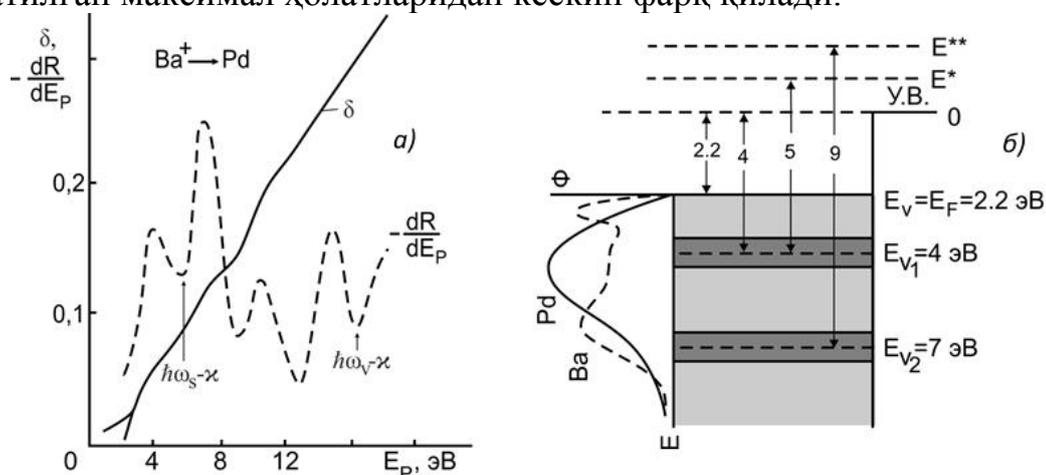
бу ерда D - нурланиш дозаси. Жорий қилинган чекланган концентрацияси:

$$C_{Ba \text{ пред}} = \frac{1}{1 + \alpha(E)} \quad (3)$$

Агар тўйинганлик ~ 3 экспоненти қийматида бўлади деб тахмин қилсак, унда тўйинганлик содир бўлиши керак бўлган дозанинг қийматини аниқлашимиз мумкин.

Энергия боғлиқликлари $\delta(E_p)$ ва $-dR/dE_p(E_p)$ тузилишининг таҳлили асосида (2-расм), $E_0 = 0,5$ кеВ ва $D = 6 \cdot 10^{16}$ см^2 дозада Ba⁺ ионлари билан қопланган Pd юзасининг энергия диаграммасини туздик. Кўринадики, Ba ионлари имплантациядан сўнг, яъни. Pd+Ba интерметалик бирикма ҳосил

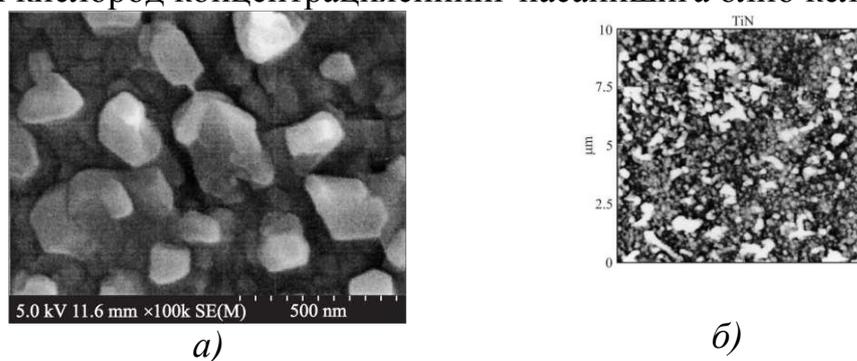
килади Pd юзасининг энергия схемаси сезиларли даражада ўзгаради: Ферми сатҳининг ҳолати, валент электронлари зичлигининг максимал даражаси ва эркин ҳолатлар зичлигининг максимал даражаси ўзгаради. Бундай ҳолда, E_{V1} ва E_{V2} максимал ҳолатлари Pd ва Ba нинг фотоэлектрон спектрларида кузатилган максимал ҳолатларидан кескин фарқ килади.



2-расм. $E_p = 0,5$ кеВ энергия ва $D = 6 \cdot 10^{16}$ см⁻² бўлган Ba⁺ ионлари билан имплантацияланган Pd учун (а) δ , $-dR/dE_p$ га боғлиқлиги ва сиртнинг тахминий энергия диаграммаси (б).

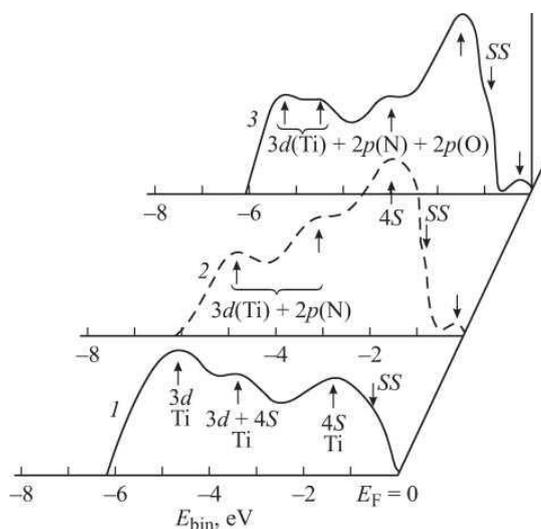
Кислород атмосферасида намланган намуналар юқори вакуумда легирилган намуналарга қараганда атмосфера ҳавосига нисбатан анча чидамли ҳисобланади. Ҳавонинг таъсири қанчалик заиф бўлса, ион энергияси шунча юқори бўлади. ВИМС ва ЭОС натижалари шуни кўрсатдики, яхши тозаланган TiN юзасида атомларининг (O ва C) концентрацияси 0,5 - 1 ат.% дан ошмайди, (H атомлари билан чегараланмаган) Ti атомлари 5-6 ат.% ни ташкил қилади. Нурланмаган намунанинг сирт майдони 100 дан 200 - 250 нм гача бўлган индивидуал монокристалл блоклари билан ифодаланади ва рельеф баландлигининг ўртача қиймати ~ 145 нм (3-расм).

$E_0 = 1$ кэВ билан $D = 6 \cdot 10^{16}$ см⁻² га O₂⁺ ионлари киритилгандан сўнг, сирт қатламида алоҳида битта кристалли блоклар ҳосил бўлади, аммо уларнинг ўлчамлари TiN ҳолатига нисбатан 3-5 баравар кичикдир. Иккинчи ҳолда, сиртдаги Ti, N ва O атомларининг концентрацияси мос равишда 49, 29, 22% ни ташкил қилади. Тахминан 1000 К қиздиргандан сўнг, TiN_{0.6}O_{0.4} нинг тахминий таркиби бўлган поликристал плёнка ҳосил бўлади. Ҳароратнинг янада ошиши кислород концентрациясининг пасайишига олиб келади.



3-расм. TiN юзаси РЭМ (а) ва АКМ (б).

4-расмда $\hbar\omega = 10,8$ эВ да олинган Ti, TiN ва $\text{TiN}_{0.6}\text{O}_{0.4}$ нинг фотоэлектр спектрлари кўрсатилган. Натижалар соф поликристалл Ti плёнкасининг Ферми энергия E_F билан бошланади. Шунинг учун ушбу намуналарнинг E_F энергия ҳолати билан мос келади.



4-расм. O^+ ионлари билан имплантациядан сўнг олинган фотоэлектрон спектрлари: 1 - тоза Ti, 2 - TiN ва 3 - $\text{TiN}_{0.6}\text{O}_{0.4}$.

TiN учун $\sim 0,5$ эВ ва $\text{TiN}_{0.6}\text{O}_{0.4}$ - $\sim 0,6$ эВ учун фотоэлектронларнинг энергия тақсимоли эгри чизиғи тоза титаннинг ЭИК га нисбатан пастроқ энергия томон силжиганлигини кўриш мумкин. Бу шуни кўрсатадики, TiN ва $\text{TiN}_{0.6}\text{O}_{0.4}$ мос равишда оралиғида бўлган эгри чизиқли эгри чизиқлар, масалан, $\approx 0,5$ ва $0,6$ эВ. Ушбу плёнкаларнинг электронга яқинлиги $x \approx 4,2$ эВ (1-жадвал).

Жадвал 1.

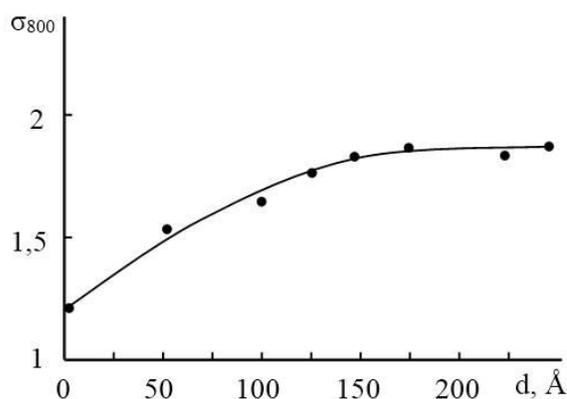
Ti, TiN ва $\text{TiN}_{0.6}\text{O}_{0.4}$ нинг энергия параметрлари

Намуна	Параметрлар, эВ			
	χ	D_F	E_v	E_g
Ti	4,5	4,5	4,5	0
TiN	4,2	4,2	4,7	0,5
$\text{TiN}_{0.6}\text{O}_{0.4}$	4,2	4,2	4,8	0,6

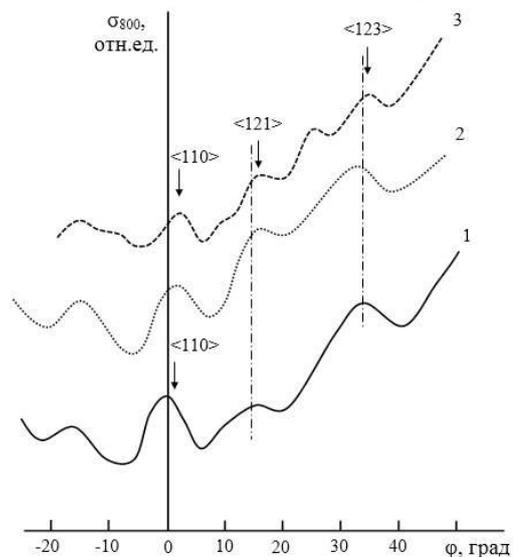
Диссертациянинг "**Наноўлчамли системалар шаклланишининг GaAs ва GaP нинг электрон ва оптик хусусиятларига таъсири**" деб аталган тўртинчи бобида наноўлчамли системалар шаклланишининг GaAs ва GaP нинг электрон ва оптик хусусиятларига таъсири бўйича экспериментал тадқиқотлар натижалари келтирилган.

$\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$ наноплёнкага эга бўлган GaAs ларда, e_F нинг озгина кўпайишига қарамай, δ_m ва K қийматлари сезиларли даражада ошади. Шунинг алоҳида айтиш мумкинки, зичлиги ($\text{г}/\text{см}^3$) $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$, GaAs дан $\sim 20\%$ камроқ. Аммо GaAs ва GaAlAs ларда атом зичлиги (1 см^3 ҳажмдаги атомларнинг сони) деярли бир хил ва Ga ва Al элементларининг ионлари деярли бир хил. Шунинг учун $\eta_{\text{GaAs}} \approx \eta_{\text{GaAlAs}}$ ва GaAs ва GaAlAs қатламларининг эмиссия самарадорлиги бир-биридан унчалик фарқ қилмайди. Кейин δ_m ва K нинг ўсиши асосан

бўшлиқнинг кўпайиши ва натижада чиндан ҳам иккинчи даражали электронларнинг чиқиш зонаси чуқурлигининг ошиши билан боғлиқ бўлиши мумкин. Ушбу ишда λ нинг $\delta_{800}(d)$ боғлиқлигини ҳосил қилиш усули билан аниқланди. Бу ерда $\delta_{800} - E_p = 800$ эВ даги δ қиймати, d - МНЭ томонидан GaAs юзасида ўстирилган $Ga_{0,5}Al_{0,5}As$ плёнкасининг қалинлиги. λ соф GaAs учун олдиндан аниқланган ва $\sim 100-120$ Å ни ташкил этган. 5-расмда $Ga_{0,5}Al_{0,5}As/GaAs$ системасининг $\delta_{800}(d)$ боғлиқлиги кўрсатилган. Кўриш мумкинки, $d \geq 150-160$ даги δ_{800} нинг қиймати d ошиб бориши билан деярли ўзгармайди, шундан ИВЭ чиқиш зонасининг чуқурлиги (шунингдек, фотоэлектронлар) $Ga_{0,5}Al_{0,5}As$ учун 150-160 Å деб тахмин қилиш мумкин.



5-расм. $E_p \approx 800$ эВ да δ қийматининг $Ga_{0,5}Al_{0,5}As/GaAs$ МНЭ плёнкасининг d қалинлигига боғлиқлиги.



6-расм. Ион имплантацияси (2-эгри чизиғи) ва МНЭ (3-эгри чизиғи) усули билан олинган қалинлиги 50 Å га тенг бўлган $Ga_{0,5}Al_{0,5}As$ плёнкали GaAs учун тоза GaAs (1-эгри чизиғи) га боғлиқлик $\sigma_{800}(\phi)$.

Гетероструктурали системаларда наноплёнканинг кристаллиги ва эпитаксиаллиги даражаси алоҳида қизиқиш уйғотади. $d < \lambda$ учун эпитаксиаллик даражаси ИЭЭ коэффициентларининг бурчакка боғлиқликларидан баҳоланиши мумкин. 6-расмда тоза GaAs(111) ва $Ga_{0,5}Al_{0,5}As$ плёнкали GaAs учун $d \approx 50$ Å бўлган $\sigma_{800}(\phi)$ боғлиқлик кўрсатилган, иккита усул билан олинган: қиздириш ва МНЭ комбинацияси билан ион имплантацияси. ϕ бурчаги намунага нисбатан нормал равишда аниқланди. Кўриш мумкинки, барча ҳолатларда, инсреасинг ошганда, σ_{800} қийматининг монотоник бўлмаган ўсиши юз беради, яъни $\sigma_{800}(\phi)$ боғлиқлик маълум кристаллографик йўналишлар билан боғлиқ бўлган максимал ва минимани намоиш этади.

Ионли бомбардимон усули билан олинган GaAs ва GaAlAs максимумларининг бурчак ҳолатлари бир-бири билан яхши мос келади. Бундан хулоса қилиш мумкинки, бу ҳолатда $Ga_{0,5}Al_{0,5}As$ плёнкасининг қатъий эпитаксиал

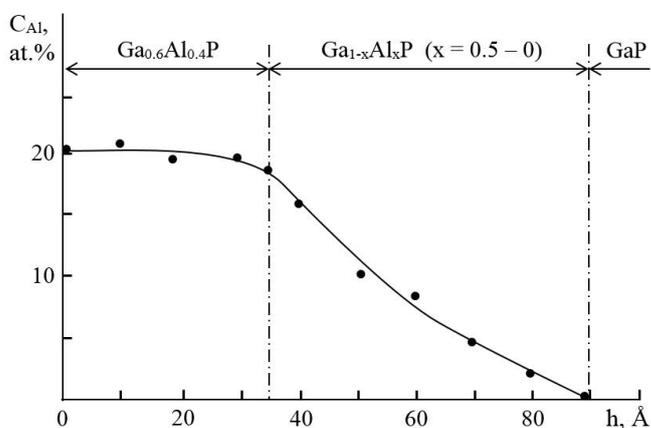
ўсиши содир бўлади. МНЭ усулида ҳосил қилинган $\text{Ga}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$ δ_{800} (ϕ) плёнкалари боғлиқлик ҳолатида, GaAs га хос бўлган чўққиларнинг интенсивлиги сезиларли даражада камаяди, ушбу чўққилар яқинида янги чўққилар пайдо бўлади. Турли ерларда олинган σ (ϕ) боғлиқликни ўрганиш шуни кўрсатдики, $E_p \approx 200$ эВ да ИВЭ чиқиш чуқурлиги ~ 50 Å. Бундай ҳолда, GaAs чўққилари δ (d) боғлиқлик бутунлай йўқолади ва GaAlAs чўққиларининг интенсивлиги сезиларли даражада ошади.

МНЭ усулида GaAlAs плёнкаси ўсиши пайтида юқори монокристалликга эга бўлади ва унинг панжараси доимийлиги GaAs билан деярли бир хил, аммо плёнка ва тагликнинг кристаллографик йўналишлари бир-бирига тўлиқ мос келмайди.

Маълумки, ҳатто GaAs (110) яхшилаб тозаланидан кейин ҳам унинг юзасида маълум миқдордаги углерод атомлари мавжуд бўлади ва сиртда баъзи релаксация кузатилади. Бу омилларнинг барчаси МНЭ усулида ҳосил қилинган GaAlAs плёнкасининг GaAs га нисбатан кристаллографик йўналишини бироз ўзгаришига олиб келиши мумкин. Ион имплантацияси ҳолатида сирт қатламлари углероддан тўлиқ тозаланади ва сирт ости қатламлари бутунлай аморфланади.

Аморфланган GaAs плёнкаларининг қалинлиги 300-400 Å ни ташкил қилади, бу ионли-легирланган қатламларнинг қалинлигидан 3-4 баравар кўп ҳисобланади. Қиздирилгандан сўнг, аморфланган GaAs қатламлари бир вақтнинг ўзида кристалланади бундан ташқари бу вақтда ион имплантация қилинган GaAs қатламлари $\text{Ga}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$ типига кристалл плёнка ҳосил бўлади. Кўринишидан, буларнинг барчаси матрицанинг йўналишига тўғри келадиган уч компонентли эпитаксиал плёнка шаклланишига ёрдам беради.

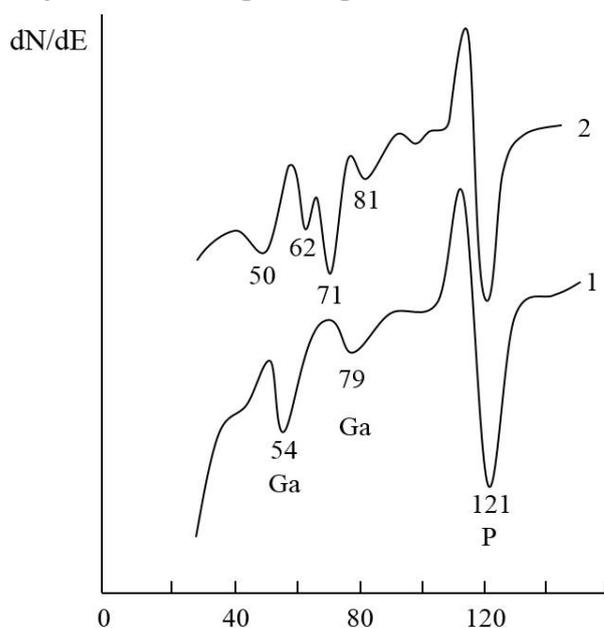
Al^+ ионларининг $E_0=1$ кэВ билан $D=10^{17}$ cm^{-2} дозасида киритилиши, GaAs ҳолатларидаги каби, Al атомларини нурлантирилган GaP сиртининг кўшилишига олиб келди. Бу ҳолда сиртдаги Al концентрацияси $\sim 30-35$ ат.% ни ташкил этади ва бутун нурланган сирт кучли тартиб билан бузилди. 900 К қиздиргандан сўнг, сиртда $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{P}$ ва қалинлиги 30-355 Å бўлган уч компонентли бирикма ҳосил бўлади (7-расм).



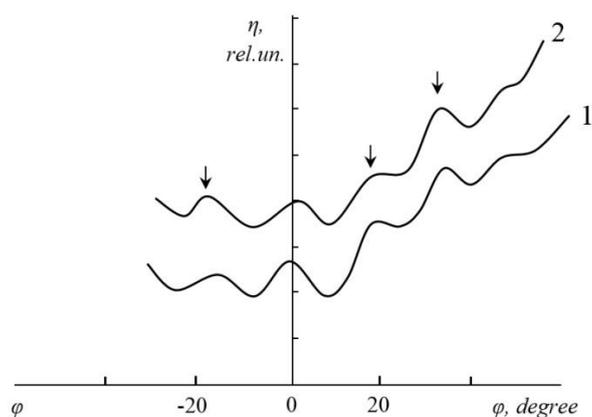
7-расм. $D = 10^{17}$ cm^{-2} дозасида $E_0 = 1$ кэВ энергияли Al^+ ионлари билан имплантация қилинган юзани $T = 900$ К га қиздиргандан кейин ўлчанган Al атомларининг концентрациясига боғлиқлиги.

Янги плёнканинг шаклланиши Ga Оже чўққиларининг ($E = 54$ ва 79 эВ) силжишига олиб келади, уларнинг интенсивлигининг сезиларли даражада

пасайишига олиб келади, шу билан бирга Р чўққисининг интенсивлиги ва ҳолати ($E = 121$ эВ) сезиларли даражада ўзгармайди. Al ва унинг GaP билан бирикмаларига хос бўлган 71 ва 81 эВ энергияли янги чўққилар пайдо бўлади (8-расм). Тоза GaP ва GaP нинг $Ga_{0,6}Al_{0,4}P$ плёнкасида эластик қайтмаган электронларининг η бурчакка боғлиқлигини $E_p = 2000$ эВ да ўлчаш ушбу намуналарнинг $\eta(\varphi)$ егри чизиқлари мос эмаслигини ва асосий чўққиларнинг ҳолатлари амалда бир-бирига тўғри келишини тахмин қилиш мумкинки GaP ва GaAlP худди шундай панжара параметрлари билан бир хил кристалли тузилишга эга (9-расм). КЭЭД усули ёрдамида олиб борилган тадқиқотлар шуни кўрсатдики, $Ga_{0,6}Al_{0,4}P$ плёнкаси кубикли панжара ичида доимий $a = 5.45$ Å бўлган панжарада кристалланади.



8-расм. Оже спектрининг бошланғич қисми: 1 - GaP (111) монокристалл, 2 - $Ga_{0,6}Al_{0,4}P/GaP(111)$ плёнкаси.

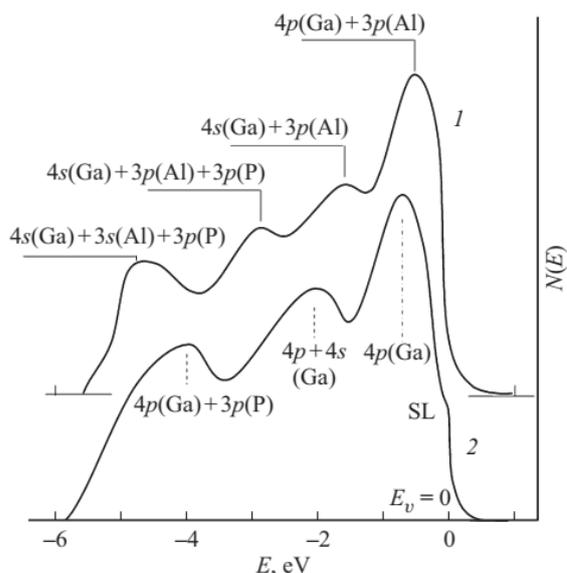


9-расм. η нинг бирламчи электрон нурунинг тушиш бурчагига боғлиқлиги: 1 - GaP(111) монокристалл, 2 - $Ga_{0,6}Al_{0,4}P$ плёнкаси 35-40 Å қалинликда.

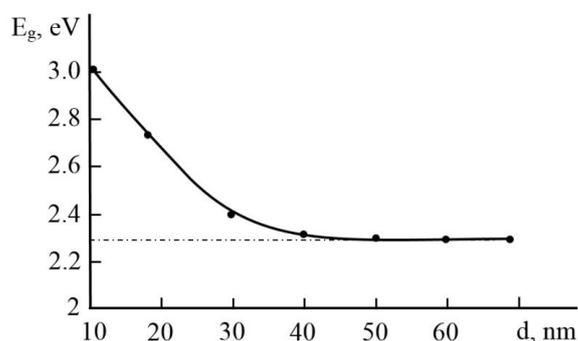
10-расмда $h\nu = 10,8$ эВ да қайд этилган GaP (111) ва $Ga_{0,6}Al_{0,4}P$ плёнкаларининг фотоэлектрон спектрлари кўрсатилган. Ушбу спектрлар валент диапазонидаги электронларнинг зичлигини акс эттиради. GaP спектри 3 та чўққини аниқ намоиш этади, Ga ва 3p ҳолатларидаги P 4p ва 4p+4s ҳолатларидан электронларнинг кўзғалиши туфайли ҳосил бўлади. Таркибнинг ўзгариши валент электронлари зичлиги ва энергия тармоқлари параметрларининг баъзи бир ўзгаришига олиб келади. GaAlP плёнкасида тўртта чўққилар кузатилади, гибрид ҳолатлардан электронлар кўзғалиши натижасида $4p(Ga)+3p(Al)$, $4s(Ga)+3p(Al)$, $4s(Ga)+3p(Al)+3p(P)$, $4s(Ga)+3s(Al)+3p(P)$. УФЭС спектрларининг таҳлили, эластиклик билан акс этирилган электронларнинг спектрлари билан биргаликда, GaP учун $E_g \sim 2,36$ эВ, ва $Ga_{0,6}Al_{0,4}P - 2,34$ эВ эканлигини кўрсатди.

Биз биринчилардан бўлиб тақиқланган зона кенглигининг d ўлчамларига боғлиқлигини $\text{Ga}_{0,6}\text{Al}_{0,4}\text{P}$ нанокристалл фаза учун ўргандик (11-расм). Барча ҳолатларда фазаларнинг қалинлиги $\sim 30\text{-}35 \text{ \AA}$. $D \approx 10\text{-}12 \text{ нм}$ да E_g қиймати $\sim 3,1 \text{ эВ}$ га тенг. E_g нинг ортиши билан пасаяди ва $d \approx 40\text{-}45 \text{ \AA}$ да плёнканинг $\sim 2,3 \text{ эВ}$ энергияда ўрнатилади. Тахминларга кўра, $d \leq 35\text{-}40 \text{ нм}$ да, квант-ўлчамли таъсири $\text{Ga}_{0,6}\text{Al}_{0,4}\text{P}$ нинг нанокристалл фазаларида намоён бўлади.

$D < 10^{14} \text{ см}^{-2}$ да $\text{Ga}_{0,6}\text{Al}_{0,4}\text{P}$ нанокристалл плёнканинг фазалари аниқ ажратилмаган, $D \geq 10^{16} \text{ см}^{-2}$ да индивидуал фазаларнинг чегаралари бир-бирига бирикади ва плёнка ҳосил бўлади.



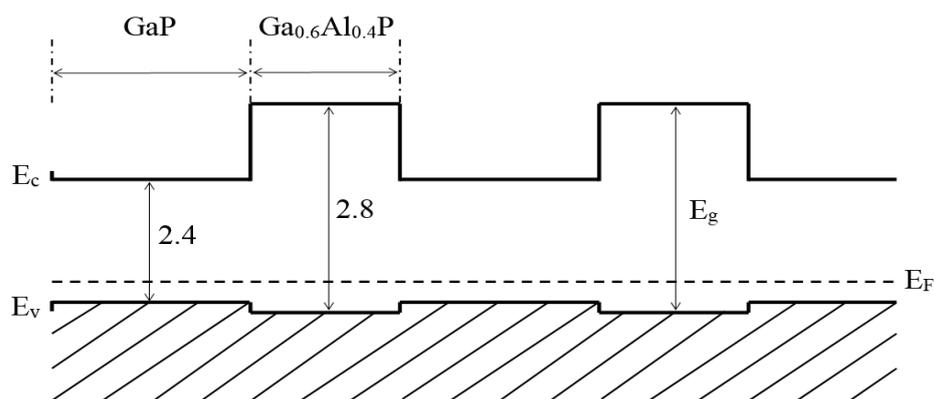
10-расм. Фотоэлектрон спектрлари: 1 - монокристалл GaP(111); 2 - $\text{Ga}_{0,6}\text{Al}_{0,4}\text{P}$ плёнкаси билан GaP(111).



11-расм. $\text{Ga}_{0,6}\text{Al}_{0,4}\text{P}$ нанокристалл фазаларининг тармоқли бўшлиқларининг уларнинг ўлчамларига боғлиқлиги.

Шундай қилиб, олинган нанокристалл фазалари ($5 \cdot 10^{14} - 8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) ва наноплёнкалар ($4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ да) қалинлигида Al^+ ионларини $E_0 = 1 \text{ кэВ}$ билан имплантация қилишда $35\text{-}40 \text{ \AA}$ ўлчамдаги $\text{Ga}_{0,6}\text{Al}_{0,4}\text{P}$ плёнкалари ҳосил бўлади. Ушбу фазалар ва плёнкалар кубик панжара структурасида кристалланиши кўрсатилган ва бу плёнкадаги параметрлар GaP панжараси параметрларига тўғри келади ($a = 5.45 \text{ \AA}$). $\text{Ga}_{0,6}\text{Al}_{0,4}\text{P}$ нанокристалл фазаларининг ўлчамлари оралиғи уларнинг ўлчамига қараб $2,4 \text{ эВ}$ ($d = 30\text{-}35 \text{ нм}$) дан $3,1 \text{ эВ}$ гача ($d = 10\text{-}12 \text{ нм}$) ҳосил бўлади.

Фото ва эластиклик қайтган электронларнинг спектрларини биргаликда таҳлил қилиш натижасида $\text{Ga}_{0,6}\text{Al}_{0,4}\text{P}$ нанокристаллари билан GaP сиртининг тахминий энергия диапазоналари кузатилди (12-расм). Ушбу системалар нанотранзисторлар, наноўлчамли ИС, опто- ва фотоэлектрик қурилмаларни яратишда фойдали бўлиши мумкин.



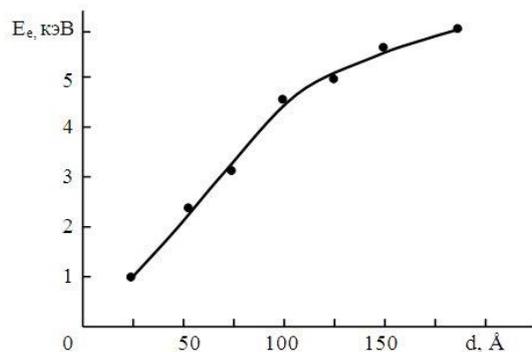
12-расм. GaP юзасининг зонали-энергия диаграммаси GaAlP нанокристаллари билан.

Диссертациянинг "CaF₂ нинг хусусиятларини ўзгартириш ва унинг сиртида эпитаксиал гетероструктураларни ҳосил қилиш учун ион ва электрон бомбардимонни қўллаш" деб аталган бешинчи бобида кўп қатламли наноўлчамли гетероплётка системаларини ҳосил қилишга бағишланган ва CaF₂/Si (111) диелектрик плёнкаларида доимий равишда нанофазалар жойлаштирилган. Бундай системаларни яратиш учун МНЭ билан биргаликда биринчи марта кам энергияли ионларни бомбардимон қилиш усули қўлланилган.

CaF₂ юзаси Ar⁺ ионлари билан бомбардимон қилинганда, фтор яқин ҳажмдан чиқарилади, шунинг учун Ca концентрацияси ортади. Ca атомлари концентрациясининг кўпайиши ва сирт қатламининг тартибсизланиши E_v яқинида, кенглиги 3,5 - 4 эВ ва E_c да 2 - 3 эВ тақиқланган зона кенлигининг камайишига олиб келади. Шундай қилиб, диапазон оралиғи 6 - 7 эВга камаяди ва кучли легирланган тақиқланган зона кенлиги шарти ($D = 6 - 8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) CaF₂ 4 - 5 эВ га тенг бўлади. Ar⁺ ионлари билан нурлантирилган CaF₂/Si плёнкасини T = 850 - 900 K ҳароратда қиздириш CaF₂ нинг бузилган юзасининг кристалланишига ва нанокристаллин фазаларининг ($D \leq 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ дозаларида) ва плёнкалар ($D > 10^{16} \text{ см}^{-2}$ дозаларида) ҳосил бўлишига олиб келади ва қалинлиги h = 5 - 6 нм гача бўлади.

$\Delta(E_p)$ боғлиқлигини ўрганиш шуни кўрсатдики, тоза CaF₂ плёнкасида δ нинг дастлабки ўсиши $E = E_v \approx 12$ эВ дан бошланади. Са нанокристаллари билан CaF₂ ҳолатида, қийматнинг ортиши $E_p \approx 5,5$ и 12 эВ энергияларида кузатилади. Кўринишидан, $E_p \approx 5,5$ эВ да ҳақиқатан ҳам калций атомларидан иккиламчи электронлар чиқа бошлайди ва $E_p \sim 12$ эВ га CaF₂ нурланмаган ҳудудларидан чиқадиган электронлар қўшилади.

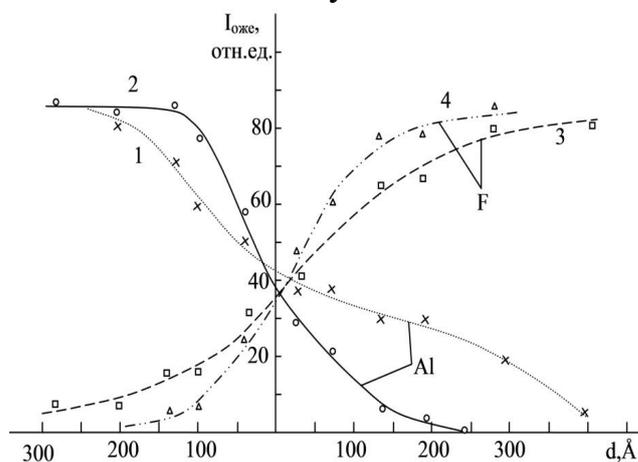
Электрон бомбардимон $\sim 1/3$ билан ион бомбардимонидан фарқли ўларок, нурланган сиртнинг ўрганилаётган оқим зичлигидаги қисми ($j_e = 20 - 500 \text{ мкА/см}^2$) деярли ўзгаради, яъни индивидуал нанокласттер фазалари шаклланмайди. Са га бой плёнканинг қалинлиги электрон энергиясига боғлиқ (13-расм).



13-расм. Са га бой плёнка қалинлигининг электрон энергиясига боғлиқлиги. $j_e = 500$ мкА/см².

МНЭ усулида ҳосил қилинган $\text{CoSi}_2/\text{CaF}_2$ системасидаги Si, Co, F ва Са атомларининг чуқурлиги бўйича тарқалиш профилларини ўрганиш шуни кўрсатдики, CoSi_2 сирт юзасида $\theta \leq 200 - 300$ Å да Са атомларининг концентрацияси жуда паст ва кремний концентрацияси жуда юқори, яъни CoSi_2 плёнкаси нотекис ўсади. Доимий бир ҳил CoSi_2 плёнкаси фақат $\theta \geq 600 - 700$ Å да ҳосил бўлади ва $\text{CoSi}_2/\text{CaF}_2$ интерфейсида атомларнинг аралашishi натижасида қалинлиги 500-600 Å ўтказувчи қатлами ҳосил бўлди.

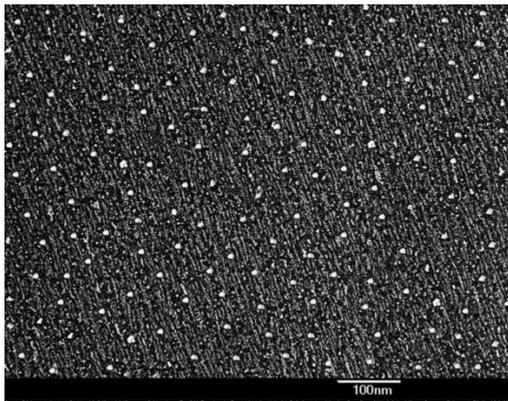
CaF_2 юзасида ингичка Са қатлами ҳосил бўлишининг металл - диелектрик чегарасидаги атомларнинг қайта тақсимланишига таъсирини аниқлаш учун Al/CaF_2 , $\text{Al}/\text{Ca}-\text{CaF}_2$ интерфаза чегаралари ўрганилди (14-расм). Al/CaF_2 (111) интерфейсида Al нинг CaF_2 га кириш чуқурлиги 350 - 400 Å, F атомларининг Al плёнкасига кириш чуқурлиги 250–300 Å, Са 150 - 200 Å чуқурликда мавжуд бўлади. $\text{Al}/\text{Ca}-\text{CaF}_2$ ҳолатида атомларнинг диффузия чуқурлиги сезиларли даражада камаяди: $\text{Al}-\text{CaF}_2$ га кириш чуқурлиги $\sim 200-250$ Å, ва Са ва F нинг Al га жойлашаш чуқурлиги ҳам пасаяди. Бу калций силицид (CaSi_2) чегарасида юпқа қатлам ҳосил бўлиши билан изоҳланади ($\theta = 12-15$ Å).



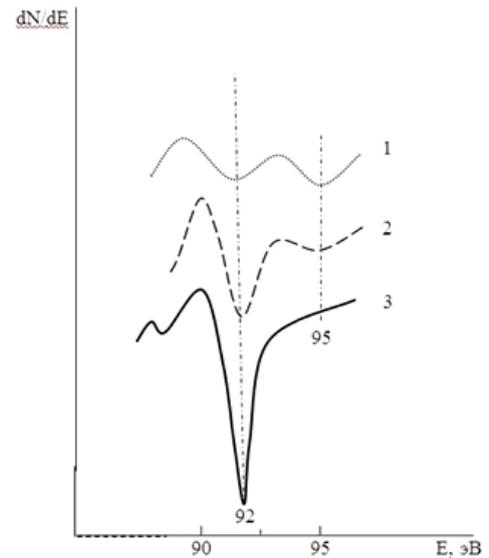
14-расм - Al ва F Оже чўққилари зичлигининг системалар чуқурлигига боғлиқлиги: 1, 3 – Al/CaF_2 ; 2, 4 – $\text{Al}/\text{Ca} - \text{CaF}_2$.

$\text{CaF}_2(111)$ плёнкасининг атомик силлиқ юзасига киритилган Si системаларини олиш учун Ar^+ ионларини $D = 10^{13} - 10^{14}$ см⁻² дозада ва $E_0 = 1$ кэВ энергия билан бомбардимон қилиш орқали бир текис жойлаштирилган плёнка яратилган.

Бир ҳил ўлчамдаги энг оддий нанокластерлар Si атомларининг CaF_2 га адсорбсияси натижасида ҳосил бўлади, улар $D = 5 \cdot 10^{13}$ см⁻² дозада киритилган. Si атомларининг қалинлиги θ тахминан битта моноқатламга эга бўлади ва кейинги $T \approx 800$ К да қиздирилиши CaF_2 юзасида 10 - 15 нм ли монокристалл CaF_2 фазаларининг ҳосил бўлишига олиб келади (15-расм).

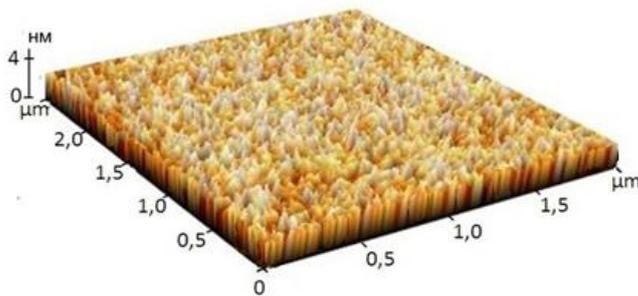


15-расм. Si атомлари билан $\theta = 1$ моноқатлам билан қопланганидан кейин $\text{CaF}_2(111)$ юзасининг РЭМ-тасвири.



16-расм. Si атомлари билан қопланган $\text{CaF}_2(111)$ моноқатлам юзасининг $T = 850\text{K}$ да 30 минут қиздирилгандан сўнг Оже-спектри спектрлари: 1 - 1; 2 - 3; 3 - 10.

Бундай ҳолда, Si учун характерли бўлган Оже спектрида 92 ва 95 эВ энергияли бўлган паст интенсивлик чўққилари пайдо бўлади (16-расм, 1-эгри чизик). Si чўққисининг интенсивлиги ошганда ва CaSi_2 кескин пасаяди (16-расм, 2-эгри чизик). $\theta_{\text{Si}} = 8$ моноқатламда ороларнинг ўртача диаметри 40-50 нм, баландлиги 15 - 20 Å бўлиб, оролар чегаралари бир-бирининг устига туша бошлайди. $\theta \approx 10 - 12$ моноқатламларда Si плёнкаси қаватма-қават ўсиб боради (16-расм, 3-эгри чизик).



а)



б)

17-расм. АКМ тасвири (а) ва КЭЭД картинаси (б), $\text{Si}/\text{CaF}_2(111)$ юзаси $T \approx 850\text{K}$ ҳароратда қиздирилгандан кейин 10 моноқатлам қалинлигида.

Ионлар киритилишининг барча ҳолатларида Si оролари ва плёнкалари аморф эди. Уларнинг кристалланиши юқори ҳароратли қиздиришдан кейин содир бўлади. Хусусан, Si/CaF_2 системасини $\theta_{\text{Si}}=10$ моноқатлам билан $T \approx 850\text{K}$ га қиздиргандан сўнг, силлиқ сиртли (17-расм, а) ва 7×7 структурага эга бўлган бир хил $\text{Si}/\text{CaF}_2(111)$ эпитаксиал плёнка ҳосил бўлади (17-расм, б).

УФЭС, ЭҚЭД ва КЭЭД дан олинган маълумотлари таҳлили шуни кўрсатдики, барча ўрганилган эпитаксиал наноструктуралар ва плёнкаларнинг

параметрлари Si, CaSi₂, CaF₂ нинг яқинлиги ва уларнинг энергиялари параметрлари кескин фарқ қилади (2-жадвал).

Жадвал 2.

Кристалл панжаранинг энергия зона параметрлари

Тадқиқ қилинаётган объект	Қалинлик h, нм	Φ, эВ	φ, эВ	E _g , эВ	χ, эВ	a, нм
CaF ₂ -плёнка	60	10,1	5	9,1	0,8-1*	0,546
Si-плёнка	50	5,1	4,7	1,1	4	0,543
Si-наноплёнка	2 – 2,5	5	–	1,2	3,8	0,545
CaSi ₂ -наноплёнка	1 – 2	4,7	4,7	0,6	4,1	–
НК Si, d ≈ 20 – 30 нм	1 – 1,5	5,3	–	1,6	3,7	0,548

Изоҳ: * - CaF₂ учун $\chi \approx 1$ қиймати шартлидир. Φ - бу фотоэлектрон иши функцияси, φ - термион иш функцияси, E_g – тақиқланган зона кенглиги, χ - электронга яқинлик ва a - панжара доимийси.

Бундай ҳолда, космик зарядлар Si/CaSi₂ ва CaSi₂/CaF₂ чегараларида ҳосил бўлади, бу зоналарнинг эгилишига олиб келади. Яримўтказгич юзасида V₀ зоналари четланишининг энг катта қиймати куйидаги формула билан аниқланади:

$$V_0 = \phi_B - (E_C - E_F),$$

Бу ерда φ_B - Si – CaSi₂ ва CaSi₂ – CaF₂ орасидаги потенциал тўсиқнинг баландлиги, E_C - бу Si ҳажмидаги ўтказувчанлик зонаси.

Ўтказувчанлик зонасининг қирра бўшлиқлари ΔE_c иккита яримўтказгичларнинг электрон яқинлик қийматлари ўртасидаги фарқдан аниқланди ва валент зоналар қирра бўшлиқлари яримўтказгичларнинг фотоэлектрик иш функциялари (валентли зоналар) қийматларининг фарқидан келиб чиққан ҳолда аниқланди: ΔE_c = χ₁ – χ₂, ΔE_v = Φ₂ – Φ₁. Ҳисоб-китоблар шуни кўрсатдики, ўрганилаётган кўп қатламли системалар учун: Si/CaSi₂ контакт учун ΔE_c = 0,1 эВ, ΔE_v = 0,2 эВ, ва CaSi₂/CaF₂ контакт учун мос равишда 3,7 ва 4,8 эВ.

Хулосалар

1. Pd-Ва (Ва – 1.5 ат.%) юзасида қиздирилгандан сўнг, нурланиш дозасига қараб, Ва⁺ ионлари билан имплантацияланган, аморф нанокристалл фазалари ва Pd₂Ва плёнкалари ҳосил бўлиши кўрсатилган. Pd₂Ва плёнкасининг валент зонасида ўрганилган ҳолатларнинг иккита аниқ максимуми мавжуд ва ўтказувчанлик диапазонида учта эркин ҳолатлар мавжуд, уларнинг иккитаси юқори вакуум даражасида жойлашган.

2. Биринчи марта TiN га O₂⁺ ионларини имплантация йўли билан киритилди ва қиздириш билан TiON плёнкаси ҳосил қилинди, олинган плёнканинг энергия диапазони ва наноплёнкаларининг электрон ҳолатлари параметрлари аниқланди. Ti_{0,4}O_{0,6}N плёнкасининг тақиқланган зона кенглиги 0,6 эВ эканлиги аниқланди.

3. Ион имплантацияси ва эпитаксия натижасида олинган Ga_{0,5}Al_{0,5}As плёнкалари сирт ўлчамларида 10-20 нм бўлган алоҳида нанокристалл блоклардан иборат эканлиги аниқланди. Ион имплантацияси усули билан

олинган плёнкаларнинг ва тагликнинг кристаллографик йўналишлари бири-бири билан яхши мос келиши аниқланди.

4. Биринчи марта ВЭИ ва фотоэлектронларнинг $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$ наноплёнканинг чиқиш зонаси чуқурликлари λ GaAs ($\lambda \approx 100\text{-}120 \text{ \AA}$) га нисбатан $\sim 1,5$ барабар катта эканлиги исботланди. GaAs юзасида GaAlAs ҳосил бўлганда К фотоэлектронларининг квант рентабеллиги ва ВЭИ δ коэффициентиининг ошиш механизми аниқланди. GaAlAs/GaAs системасини $T \approx 600 \text{ }^\circ\text{C}$ да 5-10 минут давомида қиздириш ва ($\lambda \leq 580 \text{ нм}$) тўлқин узунликли ёруғлик билан нурлантириш К нинг бир оз пасайишига олиб келади. Бунинг сабабларидан бири GaAlAs плёнкаларида ортиқча Ga ёки As атомлари бўлиши мумкин.

5. As ионларини GaP плёнкасига киритиш орқали биринчи марта нанокристалли фазалар ва GaAlP плёнкалари ҳосил қилинди. Ушбу фазалар ва плёнкалар кубик панжара кристалланишида бўлиши кўрсатилган ва бу панелдаги параметрлар GaP панжараси параметрларига тўғри келади ($a = 5.45 \text{ \AA}$).

6. GaAlP, GaNaAs ва GaInAs уч компонентли плёнкаларнинг электрон ва кристалл тузилиши ўрганилди. Ga ичидаги Al ва In нуқсонларнинг чуқурлиги аниқланди. Хусусан, $\text{Ga}_{0,6}\text{Al}_{0,4}\text{P}$ нанокристалл фазаларининг тақиқланган зона кенглиги уларнинг ўлчамига қараб 2,4 эВ ($d = 30\text{-}35 \text{ нм}$) дан 3,1 эВгача ($d = 10\text{-}12 \text{ нм}$) кўпайиши кўрсатилди.

7. Биринчи марта Ag^+ ионлари ва электронлар билан бомбардимон қилинган CaF_2 плёнкасининг таркиби, тузилиши ва физик хусусиятларига таъсири қиёсий ўрганилди. CaF_2 плёнкалари Ag^+ ионлари билан кичик дозаларда $D = 10^{15} \text{ см}^{-2}$ имплантация қилинганда, $d = 20 - 25 \text{ нм}$ бўлган нанокластерларнинг фазалари ҳосил бўлади, кейин дозанинг кўпайиши билан $D \geq 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ушбу фазаларнинг сирт диаметри d ошади. Индивидуал кластер фазалари чегаралари бир-бирига мос келади. Электрон бомбардимон қилинадиган бўлса, ион бомбардимонидан фарқли ўлароқ, бутун нурланган CaF_2 юзаси худди шундай ўзгаради. CaF_2 нинг таркибий қисмларга бўлиниши $E_e = 5 \text{ кэВ}$ ток зичлиги $j_e > 80 - 100 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$ да кузатилади. Бироқ, $j_e = 500 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$ гача, сирт қатламларидан фторнинг тўлиқ буғланиши кузатилмайди.

8. Биринчи марта CaF_2 юзасида юпқа Ca қатламининг ($\sim 10\text{-}115 \text{ \AA}$) мавжудлиги CaF_2 таркибидаги (Al) билан контакт қиладиган металлнинг тарқалиш чуқурлиги кескин пасайиши (2 барабар) аниқланди.

9. Ионни бомбардимон қилиш усули биринчи марта CaF_2 плёнкалари юзасида бир хил турдаги асосий марказларни яратиш учун ишлатилган. CaF_2 (111) юзасида бир хил эпитаксиал нанофазалар ва Si наноплёнкалар олинган ва уларнинг ўлчамлари ва тақиқланган зона кенгликлари аниқланган. Si нанофазаларида сирт ўлчамлари $d=20\text{-}25 \text{ нм}$ ва қалинлиги $h=1\text{-}1,2 \text{ нм}$ бўлган квант ўлчамидаги эффектлар намоён бўла бошлаши кўрсатилган.

10. Микро, нано- ва оптоэлектроника учун истиқболли қурилмаларни яратишда олинган натижаларни қўллаш бўйича бир қатор тавсиялар берилган. Хусусан, нанокристалл фазали Pd, Pd-Ва намуналари Pd2Ba ва BaO қатламлари ўта юқори частотали электроникани янги ва иккинчи даражали

эмиссия катодлари сифатида яратишда истиқболга эга. GaMeP/GaP, GaMeAs/GaAs системалари квант диодлари ва транзисторларини ишлаб чиқишда ишлатилиши мумкин, CaF₂ га асосланган МДП ва ПДП структуралари ўта юқори частотали транзисторлар, ионлаштирувчи нурланиш детекторлари, катта ва ультра катта интеграл микросхемаларни яратишда жуда истиқболли ҳисобланади.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА НАУК DSc.02/30.30.12.2019.FM.65.01 ПРИ ИНСТИТУТЕ
ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ АН РУз**

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

ДОНАЕВ САРДОР БУРХАНОВИЧ

**ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
НАНОСТРУКТУР, СОЗДАНЫХ НА ОСНОВЕ
ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ
(PdBa, TiN, GaAs, GaP и CaF₂)**

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/FM166.

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.ziyo.net/uz).

Научный консультант: Умирзаков Болтахуджа Ерматович
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: Кремков Михаил Ветальевич
доктор физико-математических наук

Ташатов Алланазар Каршиевич
доктор физико-математических наук

Ниматов Самад Жайсанович
доктор физико-математических наук

Ведущая организация: Ферганский политехнический институт

Защита диссертации состоится «03» 12 2020 г. в 16⁰⁰ 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 №6), по адресу: 100125, г. Ташкен, ул. Дурмон йули 33. Тел: (+99871) 262-31-69.

Автореферат диссертации разослан «26» 11 2020 г.
(протокол реестра № 6 от «26» 11 2020 г.).



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. Пайшев

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 последнее время значительное внимание уделяется получению и изучению физических свойств наноразмерных фаз и многослойных структур, которые представляют интерес, как с точки зрения решения фундаментальных на их основе проблем физики наноразмерных систем, так и прикладных задач. Такие структуры позволяют создать качественно новые типы приборов СВЧ-электроники полупроводниковых приборов и интегральных схем, в частности, планарных интегральных детекторов коротковолновых и ионизирующих излучений, детекторов УФ-излучений, баллистических транзисторов, интегральных схем, солнечных элементов и др. Все эти проблемы требуют изучения физических процессов в ходе формирования наноразмерных слоев и гетероэпитаксиальных систем. В частности, для создания новых дискретных и интегральных устройств широко применяются тонкие пленки и гетероструктуры, созданные на основе Pd-Ba, Si, GaAs, TiN и CaF₂. Однако, современные конструктивно-технологические решения микроэлектроники требуют постоянного уменьшения геометрических размеров основных элементов приборов и устройств, вплоть до перехода на наноразмерные структуры и улучшения эксплуатационных характеристик (быстродействие, стабильность, сроки применения).

Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) является оптимальной технологией, обеспечивающей формирование подобных гетероэпитаксиальных пленок и многослойных систем. Вместе с тем, данная технология имеет некоторые недостатки. Во-первых, во многих случаях не позволяет получить однородные нанопленки с толщиной менее чем 10 – 20 нм. Во-вторых, для получения отдельных нанокристаллических фаз требуется одновременно использовать очень сложную литографическую технологию. Даже современные методы литографии не дают возможность получить наноразмерные структуры с размерами 20 – 25 нм и с шагом 50 – 60 нм. Исследования проведенные последние годы показывают, что для получения новых наноразмерных структур и многослойных квантово-размерных гетерокомпозиций приборного качества необходимо использовать метод МЛЭ в сочетании с низкоэнергетической ионной бомбардировкой.

В связи с этим получение и выявление механизмов формирования новых материалов в виде многослойных квантово-размерных гетероструктур и наноконтактов к ним является одной из **актуальных проблем** современного электронного приборостроения.

Данная диссертационная работа в определенной степени соответствует задачам, предусмотренным Указом Президента Республики Узбекистан №УП-

4947 «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 года³.

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

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данная исследовательская работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан: II «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение», III «Энергетика, энерго- и сбережение, транспорт, машиностроение и приборостроение, развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения» и III. «Развитие и использование возобновляемых источников энергии».

Обзор международных научных исследований по теме диссертации⁴. Исследования физико-химических свойств многокомпонентных материалов типа полупроводник-диэлектрик-полупроводник, металл-диэлектрик-полупроводник проводятся в научных центрах, институтах и университетах ведущих стран мира, в частности, ФГУП «НПП Исток», Институт физики микроструктур РАН (Россия), Центр по изучению механизмов роста кристаллов (Франция), Технологический институт Джорджии, Американский институт физики (США) и других.

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 PdBa, 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 GaAs/AlGaAs показано подавление внутризонной статической отрицательной

³ О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан / Указом Президента Республики Узбекистан №УП-4947 от 7 февраля 2017 года.

⁴ Обзор зарубежных исследований по теме диссертации: www.sciencedirect.com, www.springerlink.com, www.elsevier.com, www.scopus.com, www.nature.com, www.oxfordjournals.org, www.sciencemag.org, www.northcarolina.edu, www.umb.edu, www.osu.edu, www.stonybrook.edu, www.bw.edu, www.msu.ru и разработан из других источников.

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/CaF₂ обнаружено отрицательное дифференциальное сопротивление (С. Менард и др., Центр по изучению механизмов роста кристаллов, Марсель, Франция); экспериментально установлено, что нанокластеры могут использоваться в электронных, биологических или химических устройствах хранения, записи считывания информации следующего поколения при развитии более емких систем магнитной и оптической памяти (Т.-Х. Ли и др., Школа химии и биохимии, Технологический институт шт. Джорджия, г. Атланта, США); экспериментально показано что, пленки кобальта, формирующиеся в диапазоне покрытий 3-9 монослоев (2,4÷7,2 Å), являются ферромагнитными, а ось их легкого намагничивания имеет относительно поверхности наклонную ориентацию, которая связана с шероховатостью формирующегося слоя (Х.В. Ченг и др., Американский институт физики, США).

В настоящее время интенсивно проводятся теоретические и экспериментальные исследования по получению и изучению физико-химических свойств наноразмерных структур и многослойных нанопериодических систем с заданными физическими свойствами.

Степень изученности проблемы. В качестве катодов газоразрядных и электровакуумных приборов, магнетронных и других СВЧ-устройств в настоящее время успешно применяются металло-сплавные, скандатные и оксидные катоды. В получение таких катодов и изучение их свойств активно работают Б.Ч.Дюбуа, В.И.Капустин, Т.Кешикова, Р.Ж.Шимидзи и др. Установлено, что компоненты Pd-Ba-катодов имеют нанокристаллитную структуру, при этом размеры кристаллитов по различных кристаллографическим направлениям могут сильно различаться и зависят от технологической предыстории материалов. Эмиссионные свойства и металлопористых, и скандатных катодов определяются эмиссионными свойствами кристаллитов оксида бария, которые формируются в катодном материале на этапе его изготовления и активирования и определяются типом и концентрацией точечных дефектов в оксиде бария.

Возросший в последнее десятилетия интерес к полупроводниковым сверхрешеткам (СР) связан с тем, что: во-первых, они проявляют нелинейные свойства в относительно слабых электрических полях ($10^2 - 10^4$ В/см); во-вторых, частоты колебаний электронов в них (так называемые блоховские колебания) лежат в терагерцовой области и управляются напряженностью статического электрического поля; в-третьих, современный уровень развития технологии позволяет формировать многопериодные СР со сложной конструкцией элементарной ячейки и тем самым моделировать закон дисперсии носителей. Проявление эффекта размерного квантования в виде характерной ступенчатой структуры оптических спектров поглощения полупроводниковой гетероструктуры GaAs-AlGaAs со сверхтонким слоем GaAs (квантовой ямой) впервые наблюдали ученые Р. Дингл, В. Вигманн и

С.Х. Генри. Х.В. Ченг и академиком Ж.И. Альферовом получены многослойные периодические гетероструктуры на основе GaAs и GaP, которые применяются в лазерах и в различных оптоэлектронных приборах. Им показано, что гетероструктуры с квантовыми точками и пленками позволяют управлять параметрами полупроводниковых кристаллов как ширина запрещенной зоны, эффективные массы и подвижности носителей заряда, электронный энергетический спектр.

Проф. Б.Е.Умирзаковым, М.Т.Нормуродовом и их учениками метод ионной имплантации впервые применен для создания наноразмерных структур на поверхности и в приповерхностной области металлов, полупроводников и диэлектриков. Исследованы их элементный и химический состав, кристаллическая и электронная структура, геометрические размеры отдельной кластерной фазы и нанопленок, а также динамика их изменения при отжиге. Получены наноструктуры с заданными физическими свойствами и выявлены основные механизмы их формирования.

Связь темы диссертации с исследованиями научно-исследовательской организации, где выполнена диссертационная работа. Работа выполнена на кафедре «Общая физика» Ташкентского государственного технического университета в рамках Государственной программы научно-исследовательских работ РУз и проектов № Ф2-41 «Теоретические и экспериментальные исследования процессов распыления, внедрения атомов, образования наноразмерных структур и напряженных слоев при имплантации ионов в материалы различной природы (металлы, полупроводники и диэлектрики)» (2012-2016 гг.); № ЁФ-2-12 «Влияние образования наноразмерных структур на эмиссионные свойства и рабочие характеристики W, Pd и PdBa» (2016-2017 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.), а также проекта ОТ-Атех-2018-503 – «Модификация электронной структуры, эмиссионных и оптических свойств поверхности слоев Si, Ni и их окислов ионной бомбардировкой» (2018 – 2020 гг.).

Целью диссертационной работы является получения наноразмерных структур и слоев на поверхности и приповерхностной области двухкомпонентных материалов, комплексное исследование их состава, фазовой структуры, энергетического состояния, изучения механизмов наблюдаемых явлений, разработка практических рекомендации по применению обнаруженных эффектов в новых приборах твердотельной электроники.

Для достижения цели сформулированы следующие основные **задачи исследования:**

выявить основные механизмы изменения электронной структуры эмиссионных и оптических свойств Pd-Ba (Ba – 1.5 ат.%) при активировке ионной и электронной бомбардировкой, термическим и лазерным отжигом;

получить наноразмерные структуры типа TiON имплантацией ионов O_2^+ в TiN с последующим отжигом. Изучить состав, морфологию поверхности, кристаллическую и электронную структуру тонких пленок TiON;

выявить основные механизмы изменения эмиссионных и оптических свойств пленки GaAs при формировании на поверхности и в приповерхностном слое нанокристаллические фазы GaAlAs. Оценить значения глубины выхода фотоэлектронов и истинно-вторичных электронов из GaAs и GaAlAs;

изучить закономерностей формирования нанокристаллических фаз и пленок GaAlP при имплантации ионов Al в GaP в сочетании с отжигом;

изучить электронную и кристаллическую структуру трехкомпонентных тонких пленок GaMeAs и GaMeP (где Me – Al, Na и In) созданных на основе пленок GaAs и GaP;

проводить сравнительный исследование влияния бомбардировки ионами инертных газов и электронами на морфологию, состав, структуру и физические свойства поверхности пленок CaF₂;

разработать методику создания регулярно расположенных, однотиповых (состав и размеры) нанокристаллических фаз Si и других материалов на поверхности пленок CaF₂, а также методику резкого уменьшения глубину диффузии атомов контактирующего металла в CaF₂;

дать научно-обоснованные рекомендации по использованию полученных результатов при разработке новых приборов электронной техники.

Объектами исследования являются поликристаллические пленки сплавов PdBa, (Ba – 1,5 ат. %); - монокристаллические пленки TiN, GaAs, GaP, CaF₂.

Предметом исследования являются закономерности и физические механизмы формирования нанокристаллов и нанопленок на поверхности металлов и металловсплавов, полупроводников и диэлектрических пленок.

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

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

выявлены основные механизмы изменения эмиссионной эффективности сплава Pd-Ba при активировке различными способами: прогрев в условиях высокого вакуума и в средах различных газов, лазерная обработка, имплантация ионов в высоком вакууме и в атмосфере кислорода.

впервые имплантацией ионов O_2^+ в TiN получены нанопленки Ti_{0,4}O_{0,6}N. Установлено, что пленка TiON является узкозонным вырожденным полупроводником n-типа и состоит из отдельных монокристаллических блоков с размерами 50-100 нм.

впервые оценена соответствия кристаллографических ориентации пленок GaAlAs и GaAs(111) на их границе.

впервые определена глубина зоны выхода истинно-вторичных электронов и фотоэлектронов из пленок GaAs и GaAlAs. Выявлены основные механизмы изменения эмиссионных и оптических свойств пленки GaAs при образовании на её поверхности нанопленки GaAlAs.

впервые изучены состав, электронная и кристаллическая структура трехкомпонентных фаз и пленок GaAlP, GaNaAs и GaInAs, полученные методом ионной имплантации в сочетании с отжигом.

изучены основные закономерности изменения состава, структуры и свойства поверхности пленок CaF₂ при бомбардировке ионами Ar⁺ и электронами. Показано, что в обоих случаях наблюдается обогащения поверхности атомами Ca. При ионной бомбардировке с ростом дозы сначала появляются отдельные участки, обогащенные атомами Ca, а при электронной бомбардировке вся облученная поверхность изменяется одинаково. Установлено, что образование на поверхности CaF₂ тонкой пленки Ca до 2 раза уменьшает глубину диффузии атомов контактирующего металла в CaF₂.

впервые бомбардировкой ионами Ar⁺ на поверхности пленок CaF₂ создана регулярно расположенные центры (зародыши), которые позволяет получить однородные фазы пленок Si.

Практические результаты исследования:

ионно- и лазерно-стимулированная активировка Pd-Va позволяет исключить из катодного узла магнетронов систему высокотемпературного отжига, что обеспечивает их стабильную высокоэффективную работу и увеличивает время эксплуатации на 100 и более часов;

определены оптимальные условия (ионная бомбардировка, отжиг) получения наноструктур типа Ga_{1-x}Al_xAs с регулируемой по энергии шириной запрещенной зоны;

наноэпитаксиальные гетероструктуры типа Si/CoSi₂/Si рекомендованы для использования при разработке транзисторов с металлической базой. Наноэпитаксиальные гетероструктуры типа Ca/CaF₂/Si и CoSi₂/CaF₂/Si рекомендованы для разработки новых МДП-транзисторов и ИС, высокочастотных (рентгеновских и ультрафиолетовых) детекторов, фотоприемных интегральных структур с барьерами Шоттки.

Достоверность полученных результатов исследований подтверждается применением современных научных и экспериментальных методов и обеспечивается необходимой статистикой экспериментов, использованием комплекса независимых методик измерения и обработки данных, а также соответствием отдельных полученных результатов с результатами других авторов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость: разработаны научно-практические основы создания тонкопленочных систем с заданными физическими характеристиками; установленные особенности механизмов роста тонких пленок и новые результаты об их составе, структуре и электрофизических свойствах являются фундаментальной базой для построения теоретических моделей процессов

взаимодействия атомов в пленках и для развития теории образования и роста гетероэпитаксиальных пленок на основе полупроводников.

Практическая значимость: технологические разработки, созданные в данной работе, рекомендованы для использования при разработке и создании новых многослойных гетероструктурных пленок типа МДП, ПДП, необходимых для приборов микро- и СВЧ-электроники, для создания контактов к ультратонким слоям, чувствительных электронных датчиков, солнечных элементов, а также других полупроводниковых структур и приборов.

Внедрение результатов исследования.

На основе установление закономерностей формирования и изменения физических свойств наноразмерных структур на поверхности двухкомпонентных материалов в процессе ионной бомбардировки и последующего отжига:

– использованы для установление основных закономерностей формирования наноразмерных фаз и пленок на поверхности полупроводниковых и диэлектрических пленок при выполнении научно-технических задач фундаментального проекта №ОТ-ФЗ-13 «Механизмы формирования свободных многослойных нанопленочных структур кремний - силицид - металл и изучение их электронной и кристаллической структуры», выполненного в 2017-2020 гг. в ИИП и ЛТ РУз (Справка АН РУз от 5 октября 2020 г., №2/1255-2128).

Применение научных результатов позволили:

– определить оптимальные режимы ионной имплантации (энергия и доза ионов) и температуры отжига для формирования наноразмерные гетероструктуры; изучить электронной структуры гетеросистемы $\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Cu}$ полученного на поверхности Si/Cu ионной имплантацией.

– использованы в подразделении АК «Узэлтехсаноат» АО «Фотон» для получения наноразмерных структур на основе Si и CaF_2 с высокой чувствительности световому излучению; для получения диодов и оптических приборов, и ультратонких контактов к ним на основе GaAs, GaP и TiN (Справка от 25.09.2020 г., №04-1/1748).

– использованы в АК «Уздонмахсулот» для увеличения надежности и время эксплуатации металлических контактов (Справка от 9.10.2020 г., №10-1-12/130-1653).

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); VII Международная конференция по физической электронике (Ташкент, 2018); Международная научная

конференция «Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике» (Ташкент, 2020).

Опубликованность результатов исследований. Полученные результаты по теме диссертации изложены в 33 научных трудах, в том числе в 1 монографии и 12 статьях международных журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 220 наименований. Работа изложена на 207 страницах машинописного текста, включая 88 рисунков и 15 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приводятся основные положения, вносимые на защиту.

В первой главе **«Краткий анализ литературных данных по модификации свойств и созданию наноразмерных структур на поверхности материалов методом ионной бомбардировки»** приводится обзор литературных данных, посвященных изучению основных закономерностей и эмиссионных свойств металло-сплавов при активировке, формирования силицидов металлов, трехкомпонентных пленок на поверхности GaAs и CaF₂, особенности кристаллической и электронной структуры и их влияния на электрофизические и оптические свойства материалов.

Критический анализ экспериментальных работ показывает, что до сих пор:

Не достаточно хорошо изучены процессы образования интерметаллических соединений в приповерхностном слое Pd при бомбардировке ионами Ва. Не изучены электронные структуры и эмиссионные свойства сплава Pd–Ва, активированного лазерным облучением;

Не изучена влияния энергии и дозы ионов активных металлов на коэффициент распыления поверхности Pd-Ва. Не изучено влияние ионной бомбардировки и последующего отжига на состав, электронную структуру, эмиссионные и оптические свойства Pd с пленками Ва и PdВа;

Практически не исследована влияние бомбардировки ионов O⁺ на состав и структуру пленок TiN;

Не имеется достоверных данных о составе, структуре, эмиссионных, оптических и электрофизических свойствах пленок GaAlAs/GaAs. Не изучены электронная структура двух и трехкомпонентных наноструктур созданных на поверхности GaAs;

Практически не изучена влияние имплантации ионов Al⁺ на состав, электронную и кристаллическую структуру поверхности GaP;

Не достаточно изучены влияние электронной и ионной бомбардировки на морфологию, состав и структуру поверхности пленок CaF₂/Si;

Нет достоверных сведений о влиянии предварительной ионной бомбардировки на профили распределения атомов на границе МЛЭ систем $\text{CoSi}_2/\text{CaF}_2$, Al/CaF_2 , Si/CaF_2 ;

Не изучены морфология, электронная и кристаллическая структура нанокристаллических фаз Si, сформированных на поверхности CaF_2 методом осаждения.

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

Вторая глава «**Техника и методика эксперимента**» посвящена описанию созданных и использованных экспериментальных установок, методики обработки и исследований поверхности твердых тел. В работе использованы две высоковакуумные технологические установки. В первой установке, которая являлась стандартной (типа LAS-2200) методом МЛЭ получены пленки CoSi_2/Si , GaAs/Ge , GaP/Ge , CaF_2/Si и изучены состав и кристаллическая структура эпитаксиальных пленок, а также измерены их толщины. Во второй экспериментальной установке проводилось ионная имплантация, температурный и лазерный отжиг, исследование физико-химических свойств пленок с использованием комплекса методов ВЭС и ФЭС. Для получения информации о микрорельефе поверхности и более точного определения параметров кристаллической решетки использованы стандартные установки: растровый электронный микроскоп JEOL JSM-7200F, электронограф ЭМР – 102, атомно-силовой микроскоп (АСМ) типа ХЕ-100.

Третья глава «**Влияние имплантации ионов Ba^+ , Ar^+ и O_2^+ на состав, структуру и электронные свойства Pd, PdBa и TiN**» посвящена изучению процессов образования интерметаллических соединений в приповерхностной области Pd, влиянию энергии и дозы ионов активных металлов на коэффициент распыления поверхности, а также влиянию имплантации ионов Ba^+ на эмиссионные свойства Pd с поверхностной пленкой Ba.

При больших дозах облучения процессы, влияющие на состав мишени определяются следующими процессами: – распыление атомов мишени и примеси, каскадное перемешивание, способствующее гомогенизации в области каскадной зоны, релаксация упругих напряжений, связанных с большой концентрацией введенной примеси, а также радиационно-усиленная диффузия, связанная с введением неравновесных дефектов (Последняя существенна при повышенных температурах мишени).

Процесс распыления приводит к движению поверхности в сторону пучка. Релаксация упругих напряжений – в обратном направлении. Совокупное действие всех перечисленных факторов приводит к установлению почти постоянной концентрации примеси по толщине ионно-внедренного слоя с достаточно резким спадом на его границе (рисунок 1).

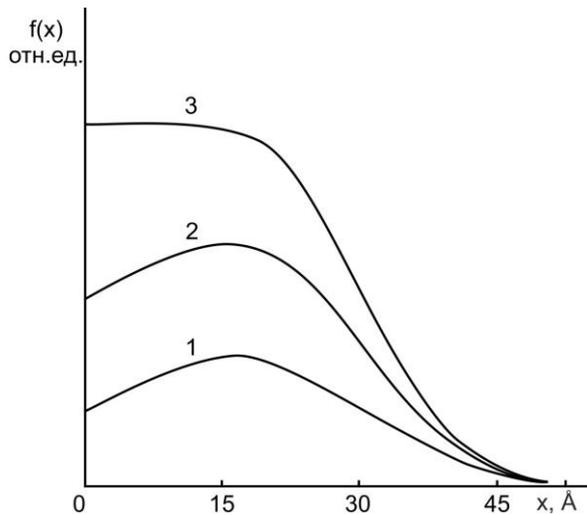


Рисунок 1. Функции распределения Ва в образцах Pd-Ва имплантированных с $E_0 = 0,5$ кэВ с разной дозой облучения D , см^{-2} : 1 – $5 \cdot 10^{14}$; 2 – $5 \cdot 10^{15}$; 3 – $6 \cdot 10^{16}$.

Если считать, что при высоких дозах облучения $n_{Ba} = \text{const}$ в слое толщиной x_{max} , то

$$\frac{dn_{Ba}}{dt} = \frac{J}{x_m} \left(1 - \alpha(E) \frac{n_{Ba}}{n_{Pd}} \right) \quad (1)$$

Здесь J – плотность тока, x_m – толщина легированного слоя $\alpha(E) \frac{n_{Ba}}{n_{Pd}} = K_{Ba}$ – парциальный коэффициент распыления бария. Тогда

$$\frac{\bar{n}_{Ba}}{n_{Pd}} = \frac{1}{\alpha(E)} \left[1 - \exp \left(-\frac{D - \alpha(E)}{x_m n_{Pd}} \right) \right] \quad (2)$$

где D – доза облучения. Предельная концентрация введенной примеси:

$$C_{Ba \text{ пред}} = \frac{1}{1 + \alpha(E)} \quad (3).$$

Если считать, что насыщение наступает при значении показателя экспоненты ~ 3 , то можно оценить значение дозы, при которой должно наступить насыщение.

На основе анализа структуры кривых энергетических зависимостей $\delta(E_p)$ и $-dR/dE_p(E_p)$ (рисунок 2) нами была построена энергетическая диаграмма поверхности Pd, имплантированного ионами Ba^+ с $E_0 = 0,5$ кэВ и дозой $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Видно, что после имплантации ионов Ва, т.е. при образовании интерметаллида Pd+Ba, положение уровня Ферми смещается в сторону меньшей энергии, вместе одного максимума, плотности состояний валентных электронов появляется два максимума и изменяет положения максимумов плотности свободных состояний. При этом положения максимумов E_{V1} и E_{V2} заметно отличаются от положений максимумов, наблюдаемых в фотоэлектронных спектрах как Pd, так и Ва.

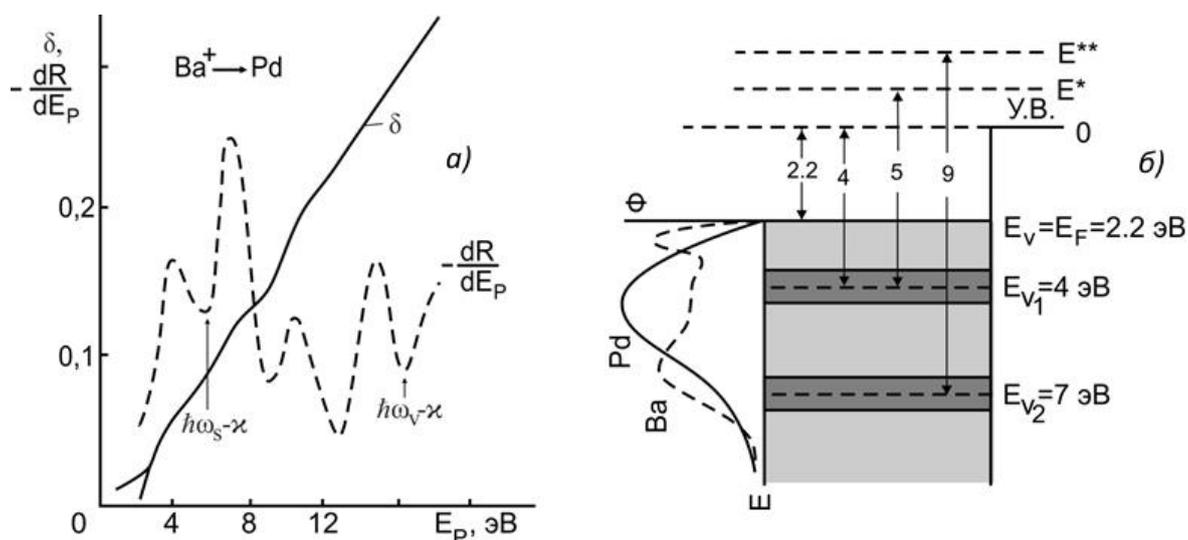


Рисунок 2. Зависимости δ , $-dR/dE_p$ от E_p (а) и примерная энергетическая диаграмма поверхности (б) для Pd, легированного ионами Ba^+ с $E_0 = 0,5 \text{ кэВ}$ и $D = 610^{16} \text{ см}^{-2}$

Образцы, легированные в кислородной среде, оказываются более устойчивыми к воздействию атмосферного воздуха, чем образцы, легированные в высоком вакууме. Влияние воздуха проявляется тем слабее, чем выше энергия ионов. Результаты ВИМС и ЭОС показали, что на поверхности хорошо очищенного TiN концентрация примесных атомов (O и C) не превышает 0,5 - 1 ат.%, имеется 5 - 6 ат.% избыточных (несвязанных с атомами N) атомов Ti. Поверхностная область необлученного образца представляет собой отдельные монокристаллические блоки размерами от 100 до 200 - 250 нм, а среднее значение высоты рельефа составляет ~ 145 нм (рисунок 3).

После имплантации ионов O_2^+ с $E_0 = 1 \text{ кэВ}$ при $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ в поверхностном слое формируются отдельные монокристаллические блоки, однако их размеры в 3-5 раза меньше, чем для нелегированного TiN. В последнем случае концентрация атомов Ti, N и O на поверхности составляет 49, 29, 22 ат.% соответственно. Можно полагать, что после нагрева при 1000 К формируется поликристаллическая пленка с примерным составом $TiN_{0,6}O_{0,4}$. Дальнейшее увеличение температуры приводит к уменьшению концентрации кислорода.

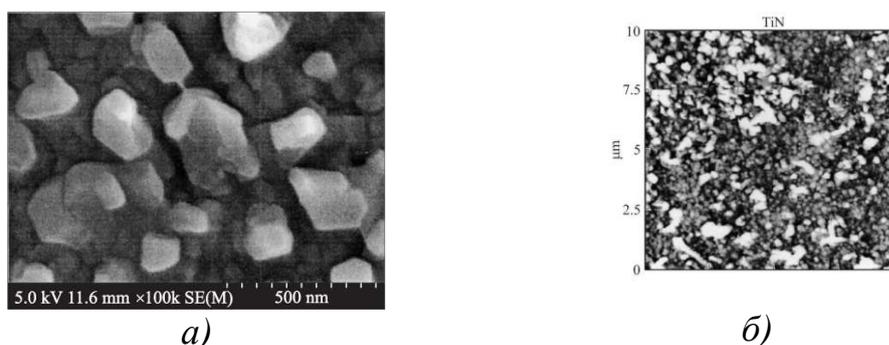


Рисунок 3. РЭМ (а) и АСМ (б) изображения поверхности TiN.

На рисунке 4 приведены фотоэлектронные спектры Ti, TiN и TiN_{0,6}O_{0,4}, полученные при $\hbar\omega = 10,8$ эВ. За начало отчета взята энергия Ферми E_F чистой поликристаллической пленки Ti. Поэтому энергетическое положение E_F этих образцов совпадает.

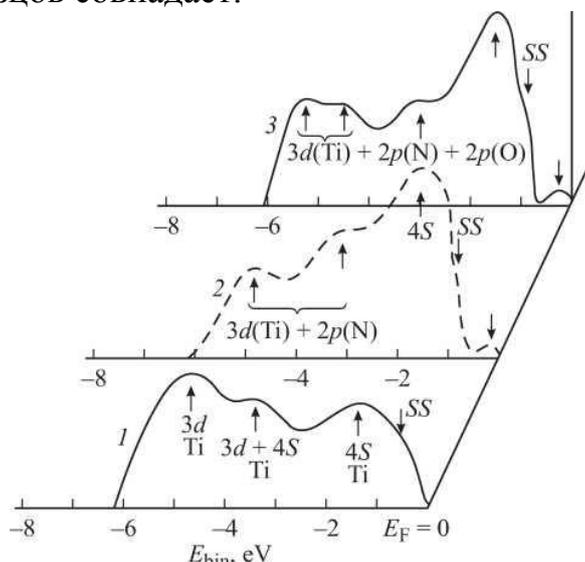


Рисунок 4.
Фотоэлектронные спектры:
1 - чистого Ti, 2 - TiN и 3 -
TiN_{0,6}O_{0,4}, полученных
после имплантации ионами
O⁺.

Видно, что начала кривой энергетического распределения фотоэлектронов для TiN на $\sim 0,5$ эВ, а TiN_{0,6}O_{0,4} на $\sim 0,6$ эВ смещены в сторону меньших энергий относительно КЭР чистого титана. Это показывает, что TiN и TiN_{0,6}O_{0,4} являются узкозонными полупроводниками с шириной запрещенной зоны $E_g \approx 0,5$ и $0,6$ эВ соответственно. Средство к электрону этих пленок составляет $\chi \approx 4,2$ эВ (таблица 1).

Таблица 1.

Зонно-энергетические параметры Ti, TiN и TiN_{0,6}O_{0,4}

Образец	Параметры, эВ			
	χ	D_F	E_v	E_g
Ti	4,5	4,5	4,5	0
TiN	4,2	4,2	4,7	0,5
TiN _{0,6} O _{0,4}	4,2	4,2	4,8	0,6

В четвертой главе «Влияние формирования наноразмерных структур на электронные и оптические свойства GaAs и GaP» приводятся результаты экспериментальных исследований по влиянию формирования наноразмерных структур на электронные и оптические свойства GaAs и GaP.

В случае GaAs с нанопленкой Ga_{0,5}Al_{0,5}As, несмотря на некоторое увеличение ϵ_f , значения δ_m и K заметно увеличиваются. Отметим, что плотность в (г/см³) Ga_{0,5}Al_{0,5}As на ~ 20 % меньше плотности GaAs. Однако, плотность атомов (число атомов в 1 см³) в GaAs и GaAlAs практически идентичны, и ионы элементов Ga и Al имеют почти одинаковые размеры. По-видимому, поэтому $\eta_{GaAs} \approx \eta_{GaAlAs}$ и, следовательно, эмиссионные эффективности слоев GaAs и GaAlAs мало отличаются друг от друга. Тогда увеличение δ_m и K , в основном могут быть обусловлены увеличением ширины запрещенной зоны и, следовательно, увеличением глубины зоны выхода λ

истинно-вторичных электронов δ . В данной работе λ определялся методом снятия зависимости $\sigma_{800}(d)$. Где δ_{800} – значения δ при $E_p = 800$ эВ, d толщина пленки $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$, выращенной на поверхности GaAs методом МЛЭ. λ для чистого GaAs определялся предварительно и составлял $\sim 100\text{-}120$ Å. На рисунке 5 приведена зависимость $\delta_{800}(d)$ для системы $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}/\text{GaAs}$. Видно, что значение δ_{800} при $d \geq 150\text{-}160$ с ростом d практически не меняется, из чего можно полагать, что глубина зоны выхода ИВЭ (а также фотоэлектронов) λ для $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$ составляет $\sim 150\text{-}160$ Å.

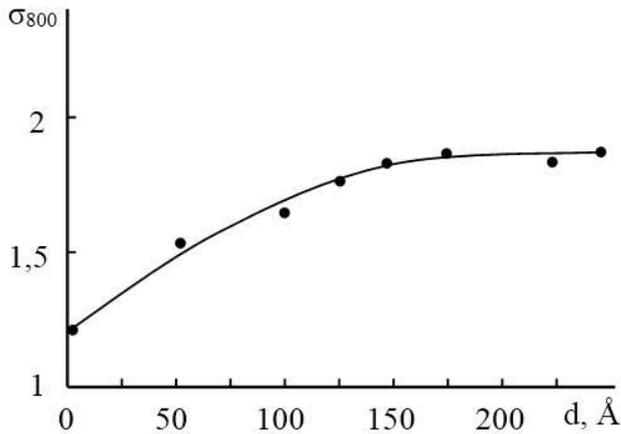


Рисунок 5. Зависимость значения δ при $E_p \approx 800$ эВ от толщины d МЛЭ-пленки $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}/\text{GaAs}$.

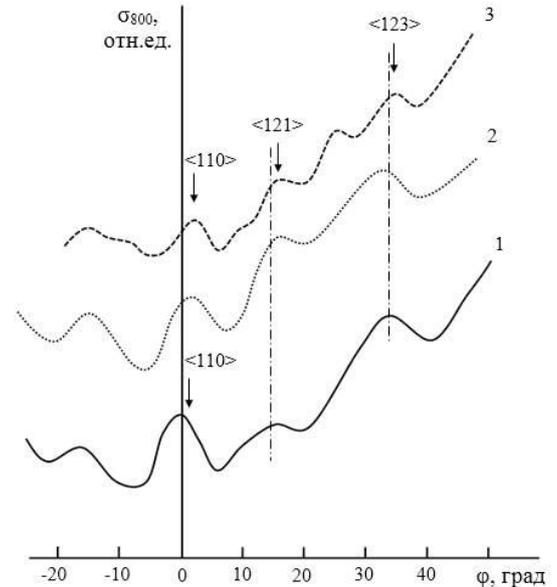


Рисунок 6. Зависимости $\sigma_{800}(\phi)$ для чистого GaAs (кривая 1) для GaAs с пленкой $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$ с толщиной 50 Å, полученный методом ионной имплантации (кривая 2) и МЛЭ (кривая 3).

В гетероструктурных системах степень кристалличности и эпитаксиальности нанопленки имеет особый интерес. При $d < \lambda$ степень эпитаксиальности можно оценить по угловым зависимостям коэффициентов ВЭЭ. На рисунке 6 приведены зависимости $\sigma_{800}(\phi)$ для чистого $\text{GaAs}(111)$ и для GaAs с пленкой $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$ с $d \approx 50$ Å, полученные двумя способами: ионной имплантацией в сочетании с отжигом и МЛЭ. Угол ϕ определялся относительно нормали к поверхности образца. Видно, что во всех случаях с ростом ϕ происходит немонотонный рост значения σ_{800} , то есть на зависимости $\sigma_{800}(\phi)$ наблюдаются максимумы и минимумы, положения которых связаны определенными кристаллографическими направлениями.

Угловые положения максимумов GaAs и GaAlAs , полученных методом ионной бомбардировки хорошо совпадает друг с другом. Из этого можно сделать вывод, что при этом происходит строгий эпитаксиальный рост пленки $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$. В случае МЛЭ пленки $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$ на зависимости $\delta_{800}(\phi)$ интенсивность пиков характерные для GaAs существенно уменьшается,

вблизи этих пиков появляются новые пики. Изучение зависимости $\sigma(\varphi)$, снятых при различных $E_{\text{раx}}$ показали, что при $E_p \approx 200$ эВ глубина выхода ИВЭ составляет ~ 50 Å. При этом на зависимости $\delta(d)$ пики GaAs полностью исчезают, а интенсивность пиков GaAlAs существенно увеличивается.

По-видимому, при МЛЭ росте пленка GaAlAs имеет высокую монокристалличность и её постоянная решетка почти идентична с постоянной решеткой GaAs, однако кристаллографические ориентации пленки и подложки на границе полностью не совпадают друг с другом.

Известно, что даже после тщательной очистки GaAs(110) на его поверхности имеется определенное количество атомов углерода и наблюдается некоторая релаксация поверхности. Все эти факторы могут привести к некоторому изменению кристаллографической ориентации МЛЭ-пленки GaAlAs относительно GaAs. В случае ионной имплантации поверхностные слои полностью очищаются от углерода и приповерхностные слои полностью аморфизируются.

Толщина аморфизированных слоев GaAs составляет 300-400 Å, что на 3-4 раза больше, чем толщина ионно-легированных слоев. При прогреве происходит одновременная кристаллизация аморфизированных слоев GaAs и кристаллизация ионно-имплантированных слоев GaAs с образованием соединения типа $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$. По-видимому, все это способствуют формированию трехкомпонентной эпитаксиальной пленки совпадающей с ориентацией матрицы.

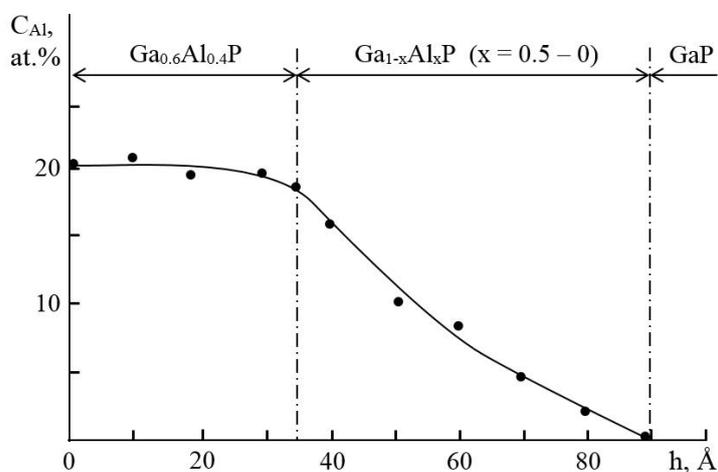


Рисунок 7. Зависимость концентрации атомов Al, измеренной после прогрева при $T=900$ К GaP, имплантированного ионами Al^+ с $E_0=1$ кэВ при дозе $D = 10^{17}$ см^{-2} .

Имплантация ионов Al^+ с $E_0=1$ кэВ при дозе $D = 10^{17}$ см^{-2} , как и в случае GaAs, привел к однородному внедрению атомов Al в среднюю часть облученной поверхности GaP. При этом на поверхности концентрация Al составляла $\sim 30-35$ ат.% и вся облученная поверхность сильно разупорядочивалась. После прогрева при 900 К на поверхности образовалось трехкомпонентное соединение с примерным составом $\text{Ga}_{0,6}\text{Al}_{0,4}\text{P}$ с толщиной 30 – 35 Å (рисунок 7).

Образование этого нового соединения приводит к сдвигу положения оже пиков Ga ($E = 54$ и 79 эВ), существенному уменьшению их интенсивности, а интенсивность и положение пика P ($E = 121$ эВ) заметно не меняется.

Появляются новые пики с энергиями 71 и 81 эВ, характерные для Al и его соединения с GaP (рисунок 8).

Измерение при $E_p = 2000$ эВ угловой зависимости неупруго отраженных электронов η чистого GaP и GaP с пленкой $Ga_{0,6}Al_{0,4}P$ показали, что кривые $\eta(\varphi)$ этих образцов имеют немонотонный характер и положение основных пиков практически совпадает друг с другом, т.е. можно полагать, что GaP и GaAlP имеют одинаковую кристаллическую структуру с близкими параметрами решетки (рисунок 9). Исследования, проведенные с применением метода ДБЭ, показали, что пленка $Ga_{0,6}Al_{0,4}P$ кристаллизуется в кубическую решетку с постоянной решетки $a = 5,45 \text{ \AA}$.

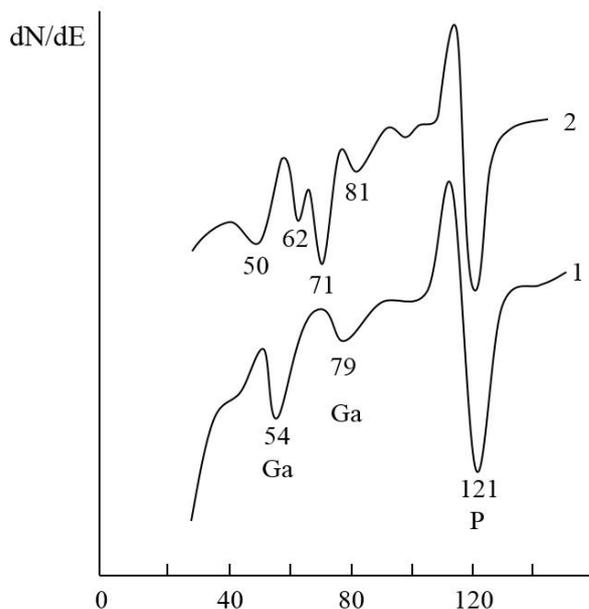


Рисунок 8. Начальная часть оже-спектров: 1– монокристалл GaP(111), 2–пленка $Ga_{0,6}Al_{0,4}P/GaP(111)$.

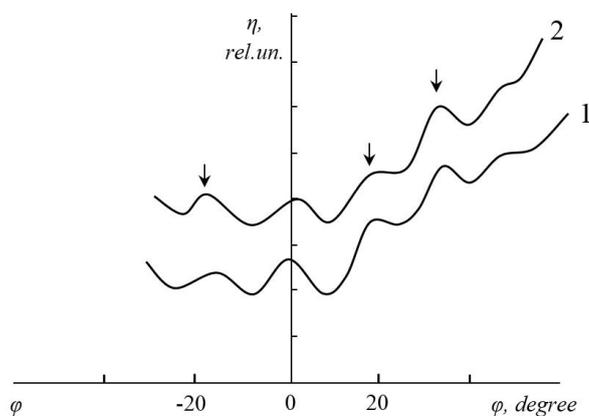


Рисунок 9. Зависимость η от угла падения φ пучка первичных электронов для: 1 – монокристалл GaP(111), 2 - GaP(111), с пленкой $Ga_{0,6}Al_{0,4}P$ толщиной 35-40 \AA .

На рисунке 10 приведены фотоэлектронные спектры GaP(111) и пленки $Ga_{0,6}Al_{0,4}P$, полученные при $h\nu = 10,8$ эВ. Эти спектры хорошо отражают плотность состояния электронов валентной зоны. На спектре GaP отчетливо проявляются 3 пика, вероятно обусловленные возбуждением электронов из 4p и 4p+4s состояний Ga и 3p состояний P. Изменение состава приводит к некоторому изменению плотности состояния валентных электронов и параметров энергетических зон. В случае пленки GaAlP обнаруживаются четыре пика, по-видимому, обусловленные возбуждением электронов из гибридных состояний 4p(Ga)+3p(Al), 4s(Ga)+3p(Al), 4s(Ga)+3p(Al)+3p(P), 4s(Ga)+3s(Al)+3p(P). Анализ спектров УФЭС, совместно с спектрами упруго отраженных электронов, показал, что E_g для GaP составляет $\sim 2,36$ эВ, а для $Ga_{0,6}Al_{0,4}P$ – 2,34 эВ.

Нами впервые оценены зависимость ширины запрещенной зоны от их поверхностных размеров d для нанокристаллических фаз $Ga_{0,6}Al_{0,4}P$ (рисунок

11). Во всех случаях толщина фаз $\sim 30 - 35 \text{ \AA}$. При $d \approx 10-12 \text{ нм}$ значение E_g составляет $\sim 3,1 \text{ эВ}$. С ростом E_g уменьшается и при $d \approx 40-45 \text{ \AA}$ устанавливается на уровне $\sim 2,3 \text{ эВ}$, что равно E_g сплошной пленки. Можно полагать, что при $d \leq 35-40 \text{ нм}$ в НК фазах $\text{Ga}_{0,6}\text{Al}_{0,4}\text{P}$ проявляются квантово-размерные эффекты.

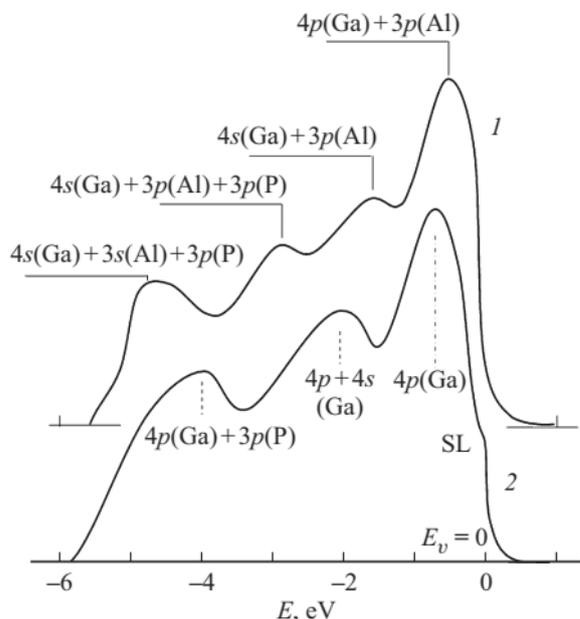


Рисунок 10. Фотоэлектронные спектры: 1 – монокристаллической $\text{GaP}(111)$; 2 - $\text{GaP}(111)$ с пленкой $\text{Ga}_{0,6}\text{Al}_{0,4}\text{P}$.

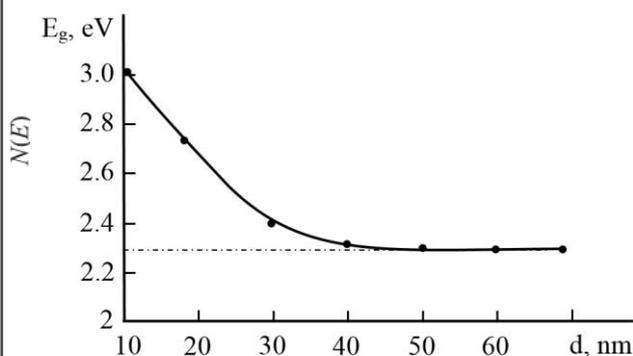


Рисунок 11. Зависимость ширины запрещенной зоны нанокристаллических фаз $\text{Ga}_{0,6}\text{Al}_{0,4}\text{P}$ от их размеров.

Отметим, что при $D < 10^{14} \text{ см}^{-2}$ четко не выделялись нанокристаллические фазы $\text{Ga}_{0,6}\text{Al}_{0,4}\text{P}$, а при $D \geq 10^{16} \text{ см}^{-2}$ происходило перекрытие границ отдельных фаз и формирование сплошной пленки.

Таким образом, имплантацией ионов Al^+ с $E_0 = 1 \text{ кэВ}$ в GaP в сочетании с отжигом получены нанокристаллические фазы ($5 \cdot 10^{14} - 8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) и нанопленки (при $4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) $\text{Ga}_{0,6}\text{Al}_{0,4}\text{P}$ с толщиной $35-40 \text{ \AA}$. Показано, что эти фазы и пленки кристаллизуются в кубическую решетку и параметры этой решетки приблизительно совпадают с параметрами решетки GaP ($a = 5,45 \text{ \AA}$). Ширина запрещенной зоны нанокристаллических фаз $\text{Ga}_{0,6}\text{Al}_{0,4}\text{P}$ в зависимости от их размеров, увеличивается от $2,4 \text{ эВ}$ (при $d = 30-35 \text{ нм}$) до $3,1 \text{ эВ}$ (при $d = 10-12 \text{ нм}$).

На основе совместного анализа спектров фото- и упруго отраженных электронов построены примерные зонно-энергетические диаграммы поверхности GaP с нанокристаллами $\text{Ga}_{0,6}\text{Al}_{0,4}\text{P}$ (рисунок 12). Эти системы могут быть полезными в создании нанотранзисторов, наноразмерных ИС, опто- и фотоэлектронных устройств.

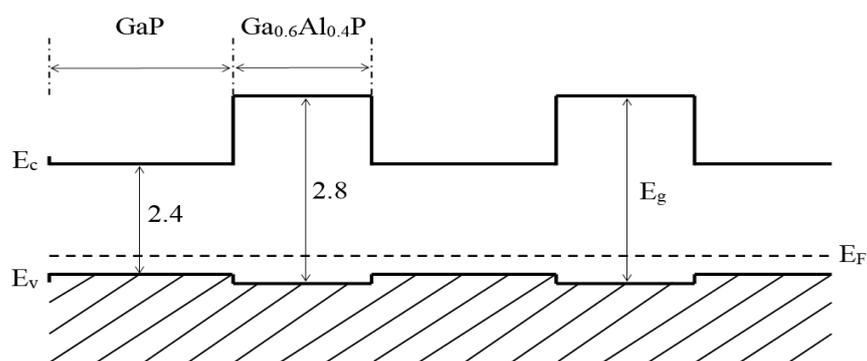


Рисунок 12. Зонно-энергетическая диаграмма поверхности GaP с нанокристаллами GaAlP.

Пятая глава «**Применение ионной и электронной бомбардировки для модификации свойств CaF_2 и создания на ее поверхности эпитаксиальных гетероструктур**» посвящена получению многослойных наноразмерных гетеропленочных структур и регулярно расположенных наночастиц на поверхности диэлектрических пленок CaF_2/Si (111). Для создания таких структур, наряду с МЛЭ, впервые использовался метод низкоэнергетической ионной бомбардировки.

При бомбардировке поверхности CaF_2 ионами Ar^+ , удаляется фтор с приповерхностной области, следовательно, происходит увеличение концентрации Ca. Увеличение концентрации атомов Ca и разупорядочение приповерхностного слоя приводит к образованию примесной зоны вблизи E_v с шириной 3,5 – 4 эВ и вблизи E_c – шириной 2 – 3 эВ. Следовательно, ширина запрещенной зоны уменьшается на 6 – 7 эВ, а условная ширина запрещенной зоны сильно легированного ($D = (6 - 8) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) CaF_2 составляет 4 – 5 эВ. Прогрев при $T = 850 - 900 \text{ К}$ пленки CaF_2/Si , облученного ионами Ar^+ приводит к кристаллизации разупорядоченных областей CaF_2 и формированию нанокристаллических фаз (при дозах $D \leq 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) и пленок (при $D > 10^{16} \text{ см}^{-2}$) Ca с толщиной до $h = 5 - 6 \text{ нм}$.

Изучение зависимости $\delta(E_p)$ показало, что для чистой пленки CaF_2 начальный рост δ начинается с $E = E_v \approx 12 \text{ эВ}$ В случае CaF_2 с нанокристаллами Ca увеличение значения δ наблюдается при двух энергиях $E_p \approx 5,5$ и 12 эВ . По-видимому, при $E_p \approx 5,5 \text{ эВ}$ истинно вторичные электроны начинают эмитироваться с атомов кальция, а при $E_p \sim 12 \text{ эВ}$ к ним прибавляются электроны, эмитируемые с необлученных участков CaF_2 .

В отличие от ионной бомбардировки при электронной бомбардировке $\sim 1/3$ часть облучаемой поверхности при исследуемых значениях плотности тока ($j_e = 20 - 500 \text{ мкА/см}^2$) изменяется практически одинаково, т.е. не происходит образование отдельных нанокластерных фаз. Толщина пленки, обогащенной Ca, зависит от энергии электронов (рисунок 13).

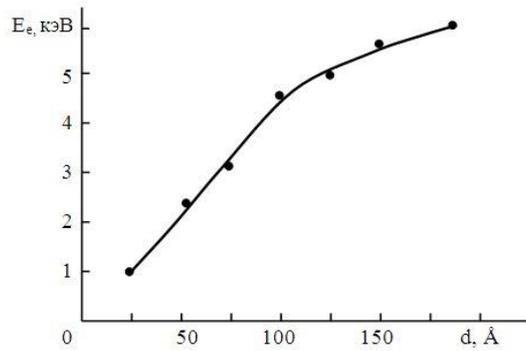


Рисунок 13. Зависимости толщины обогатщенной Ca пленки от энергии электронов.
 $j_e = 500 \text{ мкА/см}^2$.

Исследования профилей распределения атомов Si, Co, F, Ca по глубине МЛЭ системы $\text{CoSi}_2/\text{CaF}_2$ показали, что при $\theta \leq 200 - 300 \text{ \AA}$ в поверхностной области CoSi_2 концентрация атомов Co очень мала, а концентрация кремния очень высокая, т.е. пленка CoSi_2 растет неравномерно. Сплошная однородная пленка CoSi_2 формировалась только при $\theta \geq 600 - 700 \text{ \AA}$ и вследствие взаимодиффузии атомов на границе $\text{CoSi}_2/\text{CaF}_2$ образовался переходной слой толщиной $500 - 600 \text{ \AA}$.

Для выяснения влияния формирования тонкого слоя Ca на поверхности CaF_2 на перераспределение атомов на границе металл – диэлектрик были исследованы межфазная граница Al/CaF_2 , $\text{Al}/\text{Ca}-\text{CaF}_2$ (рисунок 14). На границе раздела Al/CaF_2 (111) глубина проникновения Al в CaF_2 составляет $350 - 400 \text{ \AA}$, глубина проникновения атомов F в пленку Al – $250-300 \text{ \AA}$, а Ca $150 - 200 \text{ \AA}$. Глубина взаимодиффузии атомов в случае $\text{Al}/\text{Ca}-\text{CaF}_2$ заметно уменьшается: глубина проникновения Al в $\text{Ca}-\text{CaF}_2$ составляет $\sim 200 - 250 \text{ \AA}$, уменьшаются также глубины диффузии Ca и F в Al. Это объясняется образованием на границе тонкого слоя ($\theta = 12 - 15 \text{ \AA}$) силицида кальция (CaSi_2).

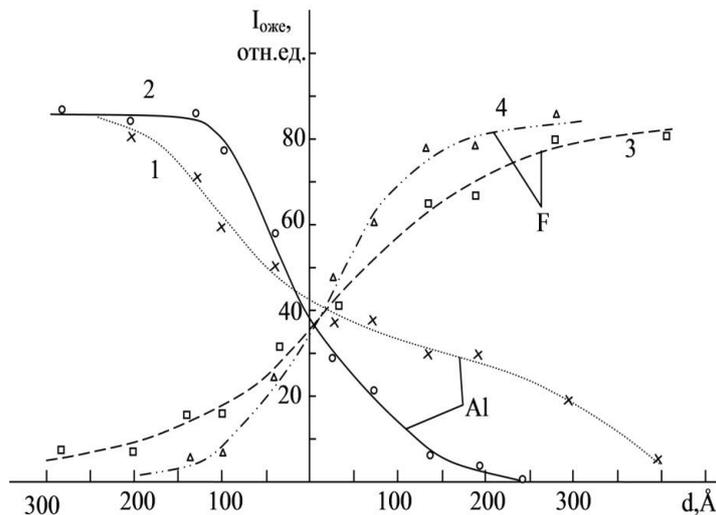


Рисунок 14. Зависимость интенсивности оже-пиков Al и F по глубине систем: 1, 3 – Al/CaF_2 ;
 2, 4 – $\text{Al}/\text{Ca} - \text{CaF}_2$.

Для получения упорядоченных структур Si на атомарно гладкой поверхности пленок $\text{CaF}_2(111)$ были специально созданы равномерно расположенные дефекты бомбардировкой ионов Ar^+ с энергиями $E_0 = 1 \text{ кэВ}$ при $D = 10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

Наиболее регулярные с одинаковыми размерами нанокластеры формировались при адсорбции атомов Si на CaF_2 , облученного ионами с $D = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Напыление атомов Si с толщиной θ примерно одного монослоя и

последующий прогрев при $T \approx 800$ К приводил к формированию на поверхности CaF_2 монокристаллических фаз Si с диаметром 10 – 15 нм (рисунок 15).

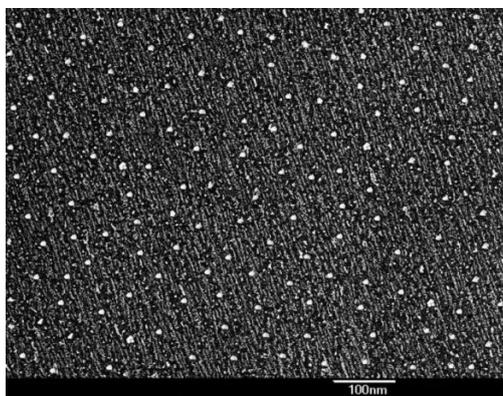


Рисунок 15. РЭМ-изображение поверхности $\text{CaF}_2(111)$ с зародышами, после покрытия атомами Si с $\theta = 1$ монослоя.

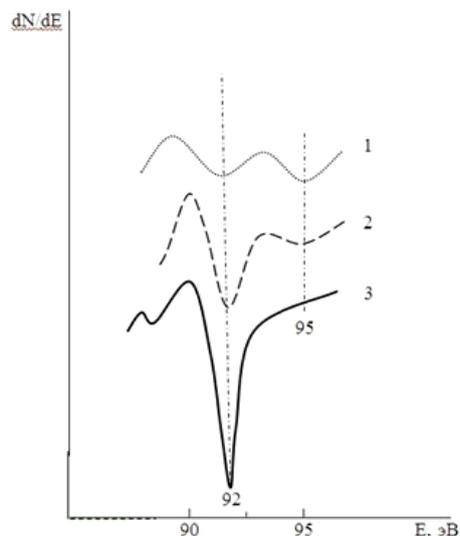
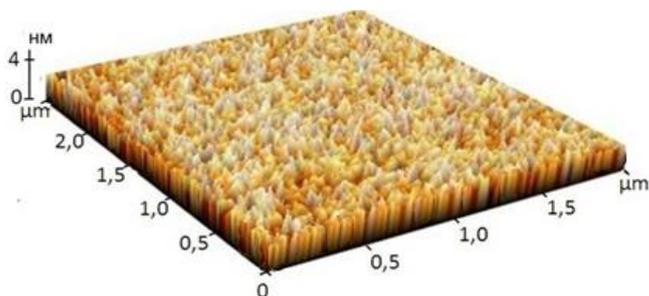
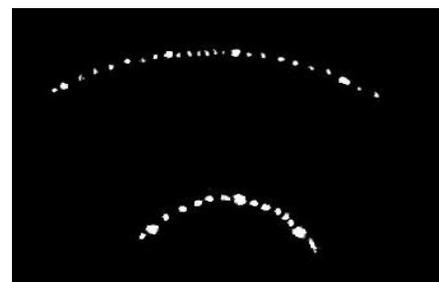


Рисунок 16. Оже-спектры поверхности $\text{CaF}_2(111)$ с зародышами после покрытия атомами Si с толщиной, монослоев: 1 – 1; 2 – 3; 3 – 10. Оже-спектры получены после прогрева при $T = 850$ К в течение 30 мин.

При этом в оже-спектре появляются мало интенсивные пики с энергиями 92 и 95 эВ (рисунок 16, кривая 1), характерные для Si и CaSi_2 . Интенсивность пика Si с ростом θ увеличивается, а CaSi_2 – резко уменьшается (рисунок 16, кривая 2). При $\theta_{\text{Si}} = 8$ монослоев средний диаметр островков составляет 40 – 50 нм, их высота – 15 – 20 Å, а границы островков начинают перекрываться. При $\theta \approx 10$ – 12 монослоев пленка Si растет послойно (рисунок 16, кривая 3).



а)



б)

Рисунок 17. АСМ – изображение (а) и ДБЭ – картина (б) поверхности системы $\text{Si}/\text{CaF}_2(111)$ с толщиной 10 монослоев после прогрева при $T \approx 850$ К.

Во всех случаях напыления островки и пленки Si были аморфными. Их кристаллизация происходила после высокотемпературного прогрева. В частности, после прогрева системы Si/CaF_2 с $\theta_{\text{Si}} = 10$ монослоев при $T \approx 850$ К

наблюдалось образование однородной эпитаксиальной пленки Si/CaF₂ (111) с гладкой поверхностью (рисунок 17, а) и структурой 7 × 7 (рисунок 17, б).

Анализ данных УФЭС, СУОЭ, и ДБЭ показал, что параметры решетки всех исследуемых эпитаксиальных наноструктур и пленок Si, CaSi₂, CaF₂ близки, а параметры их энергетических зон резко отличаются (таблица 2).

Таблица 2.

Параметры энергетических зон кристаллической решетки

Исследуемые объекты	Толщина h, нм	Φ, эВ	φ, эВ	E _g , эВ	χ, эВ	a, нм
CaF ₂ -пленка	60	10,1	5	9,1	0,8-1*	0,546
Si-пленка	50	5,1	4,7	1,1	4	0,543
Si-нанопленка	2 – 2,5	5	–	1,2	3,8	0,545
CaSi ₂ -нанопленка	1 – 2	4,7	4,7	0,6	4,1	–
НК Si, d ≈ 20 – 30 нм	1 – 1,5	5,3	–	1,6	3,7	0,548

Примечание: * – для CaF₂ значение χ ≈ 1 условно. Φ – фотоэлектронная работа выхода, φ – термоэлектронная работа выхода, E_g – ширина запрещенной зоны, χ – сродство к электрону, а – постоянная решетки.

При этом на границах раздела Si/CaSi₂ и CaSi₂/CaF₂ образуются пространственные заряды, что приводит к изгибу зон. Наибольшее значение изгиба зон V₀ на поверхности полупроводника можно определить по формуле:

$$V_0 = \varphi_B - (E_C - E_F),$$

где φ_B – высота потенциального барьера между Si – CaSi₂, а также CaSi₂ – CaF₂, E_C – дно зоны проводимости в объеме Si.

Разрыв краев зон проводимости ΔE_c определялись по разности значений электронного сродства двух полупроводников, а разрывы краев валентных зон по разности значений фотоэлектронных работ выхода (потолков валентных зон) контактирующих полупроводников: ΔE_C = χ₁ – χ₂, ΔE_v = Φ₂ – Φ₁. Расчеты показали, что для исследуемых многослойных систем: для контакта Si/CaSi₂ ΔE_c = 0,1 эВ, ΔE_v = 0,2 эВ, а для контакта CaSi₂/CaF₂ соответственно равны 3,7 и 4,8 эВ.

Заключение

1. Показано, что после прогрева на поверхности сплава Pd-Ba (Ba – 1.5 ат.%) имплантированного ионами Ba⁺ в зависимости от дозы облучения образуются аморфные нанокристаллические фазы и пленки Pd₂Ba. В валентной зоне пленки Pd₂Ba имеются два явно выраженных максимума заполненных состояний, а в зоне проводимости – три свободных состояния, два из которых расположены выше уровня вакуума.

2. Впервые определены параметры энергетических зон и плотности электронных состояний нанопленок TiON, полученных имплантацией ионов O₂⁺ в TiN в сочетании с отжигом. Установлено, что значение ширины запрещенной зоны Ti_{0,4}O_{0,6}N составляет 0,6 эВ.

3. Установлено, что пленки Ga_{0,5}Al_{0,5}As, полученные методами ионной имплантации и молекулярно-лучевой эпитаксии состоят из отдельных

нанокристаллических блоков с поверхностными размерами 10-20 нм. В случае пленок, полученных методом ионной имплантации, кристаллографическая ориентация пленки и подложки хорошо совпадают друг с другом.

4. Впервые показано, что глубины зоны выхода ИВЭ и фотоэлектронов λ нанопленки $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$ $\sim 1,5$ раза больше, чем λ GaAs ($\lambda \approx 100-120 \text{ \AA}$). Выявлено механизм увеличения значения квантового выхода фотоэлектронов K и коэффициента ИВЭ δ при образовании GaAlAs на поверхности GaAs . Прогрев системы $\text{GaAlAs}/\text{GaAs}$ при $T \approx 600 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 5-10 min приводит к некоторому уменьшению K в области интенсивного поглощения света ($\lambda \leq 580 \text{ nm}$). Одной из причин этого может быть наличие в пленках GaAlAs некоторых избыточных атомов Ga или As.

5. Впервые имплантацией ионов Al в пленку GaP получены нанокристаллические фазы и пленки GaAlP. Показано, что эти фазы и пленки кристаллизуются в кубическую решетку, а их параметры приблизительно совпадают с параметрами решетки GaP ($a = 5.45 \text{ \AA}$).

6. Изучены электронная и кристаллическая структура трехкомпонентных пленок GaAlP, GaNaAs и GaInAs. Определены глубины залегания собственных дефектов In и Al в Ga. В частности, показано, что ширина запрещенной зоны нанокристаллических фаз $\text{Ga}_{0,6}\text{Al}_{0,4}\text{P}$ в зависимости от их размеров увеличивается от 2.4 эВ (при $d = 30-35 \text{ nm}$) до 3.1 эВ (при $d = 10-12 \text{ nm}$).

7. Впервые проведено сравнительное исследование влияния бомбардировки ионов Ar^+ и электронов на состав, структуру и эмиссионных и оптических свойств пленки CaF_2 . Показано, что при бомбардировке пленок CaF_2 ионами Ar^+ при дозе $D = 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ сначала формируются нанокластерные фазы Ca с $d = 20 - 25 \text{ nm}$, затем с ростом дозы поверхностные диаметры d этих фаз увеличиваются, и при $D \geq 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ происходит перекрывание границ отдельных кластерных фаз. В отличие от ионной бомбардировки, в случае электронной бомбардировки при малых дозах вся облученная поверхность CaF_2 изменяется одинаково без образования отдельных фаз. Разложение CaF_2 на составляющие при $E_e = 5 \text{ кэВ}$ наблюдается при плотности тока $j_e > 80 - 100 \text{ мкА}\cdot\text{см}^{-2}$. Однако вплоть до $j_e = 500 \text{ мкА}\cdot\text{см}^{-2}$ не наблюдается полное испарение фтора с поверхностных слоев.

8. Впервые установлено, что наличие на поверхности CaF_2 тонкого слоя Ca ($\sim 10-115 \text{ \AA}$) резко уменьшает (до 2 раза) глубину диффузии контактируемого металла (Al) в CaF_2 .

9. Впервые метод ионной бомбардировки использован для создания однотипных центров (зародышей) на поверхности пленок CaF_2 . На поверхности $\text{CaF}_2(111)$ получены однородные эпитаксиальные нанofазы и нанопленки Si, определены их размеры и ширина запрещенной зоны. Показано, что в нанofазах Si с поверхностными размерами $d=20-25 \text{ nm}$ и толщиной $h=1-1.2 \text{ nm}$ начинают проявляться квантово-размерные эффекты.

10. Дано ряд рекомендаций по применению полученных результатов в создании перспективных приборов микро-, нано- и оптоэлектроники. В

частности, образцы Pd и Pd-Ba с нанокристаллическими фазами и слоями Pd₂Ba и BaO имеют перспективы в создании новых приборов СВЧ-электроники в качестве термо- и вторично-эмиссионных катодов. Структура GaMeP/GaP, GaMeAs/GaAs могут использоваться при разработке квантовых диодов и транзисторов. МДП и ПДП-структуры на основе CaF₂ имеют перспективы в создании СВЧ транзисторов, детекторов ионизирующих излучений, больших и ультрабольших интегральных схем.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.02 / 30.30.12.2019.FM.65.01 AWARD OF
SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF ION-PLASMA AND
LASER TECHNOLOGIES**

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

DONAEV SARDOR BURKHANOVICH

**ELECTRONIC STRUCTURE AND PHYSICAL PROPERTIES OF
NANOSTRUCTURES BASED ON TWO-COMPONENT MATERIALS
(PdBa, TiN, GaAs, GaP AND CaF₂)**

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/FMI166.

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 (rasume)) has been posted on the website of the Scientific Council (<http://iplt.uz/>) and on Information-education portal «ZiyoNet» (www.ziyo.net).

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

Official opponents: **Kremkov Mikhail Vitalevich**
doctor of physical and mathematical sciences

Tashatov Allanazar Karshievich
doctor of physical and mathematical sciences

Nimatov Samad Jaysanovich
doctor of physical and mathematical sciences

Leading organization: **Fergana polytechnical institute**

The defense will take place on "03" 12 2020 at 16⁰⁰ 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 № 6), (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent city, 33, Durmon yuli str. Phone: (+99871) 262-31-69).

The abstract of the dissertation is sent out on "26" 11 2020.
(Mailing report № 6 on "26" 11 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

Handwritten signature

INTRODUCTION (abstract of DSc thesis)

Topicality and necessity of the thesis. Recently, considerable attention has been paid to obtaining and studying the physical properties of nanoscale phases and multilayer structures, which are of interest, both from the point of view of solving fundamental problems in the physics of nanoscale systems and applied problems.

The studies carried out in recent years show that to obtain new nanoscale structures and multilayer quantum-well heterocompositions of device quality, it is necessary to use the MBE method in combination with low-energy ion bombardment.

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. Studies of the physicochemical properties of multicomponent materials such as semiconductor-insulator-semiconductor, metal-dielectric-semiconductor are carried out in research centers, institutes and universities of the leading countries of the world, in particular, FSUE "NPP Istok", Institute of Physics of Microstructures RAS (Russia), Center for crystal growth mechanisms (France), Georgia Institute of Technology, American Institute of Physics (USA) and others.

Problem development status. With the method of ion implantation, they were used for the first time to create nanoscale structures on the surface and in the near-surface region of metals, semiconductors and dielectrics. Their elemental and chemical composition, crystal and electronic structure, geometrical dimensions of an individual cluster phase and nanofilms, as well as the dynamics of their change upon annealing have been investigated. Nanostructures with specified physical properties are obtained and the main mechanisms of their formation are revealed.

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 to obtain nanoscale structures and layers on the surface and near-surface region of two-component materials, to comprehensively study their composition, phase structure, energy state, to study the mechanisms of the observed phenomena, to develop practical recommendations on the use of the discovered effects in new solid-state electronics devices.

Tasks of research work to obtain nanoscale structures of the TiN, GaAs, GaP, 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 polycrystalline films of Pd-Ba alloys, (Ba - 1.5 at.%); - single crystal films of TiN, GaAs, GaP, CaF₂.

The subject of the study is the regularities and physical mechanisms of the formation of nanocrystals and nanofilms on the surface of metals and metal alloys, semiconductors and dielectric films.

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 mechanisms of the change in the emission efficiency of the Pd-Ba alloy upon activation by various methods are revealed: heating under high vacuum conditions and in media of various gases, laser treatment, implantation of ions in a high vacuum and in an oxygen atmosphere.

for the first time, Ti_{0.4}O_{0.6}N nanofilms were obtained by implantation of O₂⁺ ions into TiN. It was found that the TiON film is a narrow-band degenerate n-type semiconductor and consists of individual single-crystal blocks with sizes of 50-100 nm.

the degree of correspondence between the crystallographic orientations of GaAlAs and GaAs (111) films at their boundaries has been estimated for the first time.

for the first time, the depth of the exit zone for true secondary electrons and photoelectrons from GaAs and GaAlAs films was determined. The main mechanisms of changes in the emission and optical properties of a GaAs film during the formation of a GaAlAs nanofilm on its surface are revealed.

the composition, electronic and crystal structure of three-component phases and GaAlP, GaNaAs and GaInAs films obtained by ion implantation in combination with annealing have been studied for the first time.

the main regularities of changes in the composition, structure and properties of the surface of CaF₂ films under bombardment with Ar⁺ ions and electrons have been studied. It is shown that, in both cases, the surface is enriched with Ca atoms. With ion bombardment, with increasing dose, separate areas enriched with Ca atoms first appear, and with electron bombardment, the entire irradiated surface changes in the same way. It was found that when a thin Ca film is formed on the CaF₂ surface, the diffusion depth of the contacting metal in CaF₂ decreases by 2 times.

for the first time, regularly spaced centers (nuclei) were created on the surface of CaF₂ films by bombardment with Ar⁺ ions, which makes it possible to obtain homogeneous phases of Si films.

Practical results of research work is ion- and laser-stimulated activation of Pd-Ba makes it possible to exclude the high-temperature annealing system from the cathode unit of magnetrons, which ensures their stable high-efficiency operation and

increases the operating time by 100 or more hours;

the optimal conditions (ion bombardment, annealing) for obtaining nanostructures of the $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ type with an energy-controlled band gap have been determined;

nanoepitaxial heterostructures of the $\text{Si} / \text{CoSi}_2 / \text{Si}$ type are recommended for use in the development of transistors with a metal base. Nanoepitaxial heterostructures of the $\text{Ca} / \text{CaF}_2 / \text{Si}$ and $\text{CoSi}_2 / \text{CaF}_2 / \text{Si}$ types are recommended for the development of new MIS transistors and high-frequency (X-ray and ultraviolet) detectors, photodetecting integrated structures with Schottky barriers.

Reliability of the obtained results of research is confirmed by the use of modern scientific and experimental methods and is ensured by the necessary statistics of experiments, the use of a set of independent methods for measuring and processing data, as well as the correspondence of individual results obtained with the results of other authors.

Scientific and practical value of the research results.

Scientific significance: scientific and practical foundations for the creation of thin-film systems with specified physical characteristics have been developed; The established features of the growth mechanisms of thin films and new results on their composition, structure, and electrophysical properties are the fundamental basis for constructing theoretical models of the processes of interaction of atoms in films and for the development of the theory of formation and growth of heteroepitaxial films based on semiconductors.

Practical significance: the technological developments created in this work are recommended for use in the development and creation of new multilayer heterostructured films of the MIS, PDL types, which are necessary for micro- and microwave electronics devices, for creating contacts to ultrathin layers, sensitive electronic sensors, solar cells and other semiconductor structures and devices.

Application of researches results. Based on the establishment of patterns of formation and change in the physical properties of nanoscale structures on the surface of two-component materials during ion bombardment and subsequent annealing:

used to establish the basic regularities of the formation of nanoscale phases and films on the surface of semiconductor and dielectric films in the implementation of scientific and technical tasks of the fundamental project No.OT-F3-13 "Mechanisms of the formation of free multilayer nanofilm structures silicon - silicide - metal and the study of their electronic and crystal structure "Completed in 2017-2020. in the IIP and LT RUz (Inquiry of Academy of Sciences of Republic of Uzbekistan from October 5, 2020, No.2/1255-2128).

Application of scientific results allowed:

determine the optimal modes of ion implantation (energy and dose of ions) and annealing temperatures for the formation of nanoscale heterostructures; to study the electronic structure of the $\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Cu}$ heterosystem obtained on the Si/Cu surface by ion implantation.

used in the division of JSC "Uzeltekhsanoat" of JSC "Foton" to obtain nanoscale structures based on Si and CaF_2 with high sensitivity to light radiation; for

obtaining diodes and optical devices, and ultrathin contacts to them based on GaAs, GaP and TiN (Inquiry of JSC "Uzeltexhsanoat" from September 25, 2020, No.04-1 / 1748).

used in JSC "Uzdonmahsulot" to increase the reliability and operating time of metal contacts (Inquiry of JSC "Uzdonmahsulot" from 9.10.2020, No.10-1-12/130-1653).

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, 2020).

Publication of the results. The results obtained on the topic of the dissertation are presented in 33 scientific works, including 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 207 pages of typewritten text, including 88 figures and 15 tables.

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

I часть (I бўлим, part I)

1. Монография: С.Б. Донаев, Б.Е. Умирзаков, Д.А. Ташмухамедова. Электронная структура нанопленок на основе бинарных материалов. LAP Lambert Academic Publishing. 2018, - 132 с.
2. S.B. Donaev. Nanodimensional CoSiO films obtained by ion implantation on a CoSi₂ surface // Technical Physics Letters, Vol. 46, No. 8 (2020), pp. 796–798. (№3. Scopus: IF = 1.7)
3. S.B. Donaev, B.E. Umirzakov. Effect of the implantation of Al⁺ ions on the composition, electronic and crystalline structure of the GaP(111) Surface // Semiconductors, Vol. 54, No. 8 (2020), pp. 860–862. (№3. Scopus: IF = 1.2)
4. S.B. Donaev, B.E. Umirzakov, A.A. Abduvayitov. Electronic properties of CoSi₂ film in ion bombing by oxygen ions // International Journal of Advanced Science and Technology Vol. 29, No. 11s, (2020), pp. 1423-1426. (№41. SCImago: IF = 0.11)
5. S.B. Donaev, B.E. Umirzakov, A.A. Abduvayitov. Influence of implantation ions on the electronic structure of GaP(111) surface // International Journal of Advanced Science and Technology Vol. 29, No. 11s, (2020), pp. 1427-1430. (№41. SCImago: IF = 0.11)
6. S.B. Donaev, B.E. Umirzakov, B.D. Donaev, B.Kh. Barotova, V. Karimova. Composition and electronic properties of film CoSiO by ion implantation. International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology [IJIERT], Paper ID: 141797 (2020), pp. 133-137. (№17. Open Academic Journals Index: IF = 0.101)
7. S.B. Donaev, B.E. Umirzakov, B.D. Donaev, B.Kh. Barotova, V. Karimova. Electronic and crystal structure of GaP(111) surface in implantation of Al⁺ ions. International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology [IJIERT], Paper ID: 141796 (2020), pp. 129-132. (№17. Open Academic Journals Index: IF = 0.101)
8. Б.Е. Умирзаков, Р.Х. Ашуров, С.Б. Донаев. Морфология и электронные свойства наноразмерных структур Si, созданных на поверхности CaF₂. // Журнал технической физики, 2019, том 89, вып. 2, с/264-267. (01.00.00, №20)
9. S.B. Donaev, B.E. Umirzakov, N.M. Mustafaeva Emissivity of laser-activated Pd–Ba alloy // Technical Physics, Vol.64, Issue 10 (2019), pp.1541-1543. (№3. Scopus: IF = 1.3)
10. B.E. Umirzakov, S.B. Donaev, N.M. Mustafaeva. Electronic and optical properties of GaAlAs/GaAs thin films // Technical Physics, Vol.64, Issue 10 (2019), pp.1506-1508. (№3. Scopus: IF = 1.3)
11. Umirzakov B.E., Donaev S.B. On the creation of ordered nuclei by ion bombardment for obtaining nanoscale si structures on the surface of CaF₂ films //

Journal of Surface Investigation, Vol.11, Issue 4 (2017), pp.746-748. (№3. Scopus: IF = 0.8)

12. Z.A. Isakhanov, B.E. Umirzakov, M.K. Ruzibaeva, S.B. Donaev. Effect of the O_2^+ -ion bombardment on the TiN composition and structure. // Technical Physics Vol. 60 (2015), pp.313–315. (№3. Scopus: IF = 1.3)
13. B.E. Umirzakov, D.A. Tashmukhamedova, M.K. Ruzibaeva, F.G. Djurabekova, S.B. Donaev. Investigation of change of the composition in structure of the CaF_2/Si films surface at the low energy bombardment // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 326 (2014), pp. 322–325. (№3. Scopus: IF = 2.4).

II часть (III бўлим, part II)

14. Б.Е. Умирзаков, С.Б. Донаев. Формирования одно- и многокомпонентных нанокристаллов и нанопленок при ионной бомбардировке пленок бинарных материалов (обзор) // Международная научная конференция «Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике» 9-10 октябрь 2020 г., Ташкент, с.80-83
15. С.Б. Донаев, А.А. Абдувайитов, Ё.С. Эргашов. Влияние имплантации ионов Al^+ на структуру, эмиссионные и оптические свойства поверхности монокристаллов GaP и GaAs // Международная научная конференция «Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике» 9-10 октябрь 2020 г., Ташкент, с.286-289.
16. С.Б. Донаев, Б.Е. Умирзаков. Эмиссионные свойства сплава Pd–Ba, активированного лазерным облучением // Тезисы докладов XLIX международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва 29 мая – 31 мая 2019, с.34.
17. S.B. Donaev, B.E. Umirzakov. Morphology and electron properties of nano-dimensional structures Si created on CaF_2 surface. // 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-2.28.
18. B.E. Umirzakov, S.B. Donaev Emission properties of the Pd – Ba alloy activated by laser irradiation // SYMPOSIUM F, Advanced materials, components & processes for integrated autonomous micro-power sources. E-MRS, Spring Meeting, Nice, France. May 27 – 31, 2019., p. F/p-6.8.
19. С.Б. Донаев, Б.Е. Умирзаков, Н.М. Мустафаева, А.Х. Рахимова Эмиссионные свойства сплава Pd–Ba, активированного лазерным облучением // Взаимодействие ионов с поверхностью ВИП-2019, Сборник трудов XXIV Международной конференции, Москва, 19-23 августа 2019 г. с.59-62.
20. С.Б. Донаев, Б.Е. Умирзаков. Эмиссионные свойства сплава Pd–Ba, активированного лазерным облучением // V международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛАПЛАЗ-2019, Москва, 2019 г. 12-15 февраль, с.370-372.

21. С.Б. Донаев, Д.А. Ташмухамедова, М.Омонова. Состав и параметры энергетических зон нанопленки CoSiO , полученный имплантацией ионов O^+ в CoSi_2 // Седьмая Международная конференция по физической электронике ИРЕС-7. 18-19 мая Ташкент, 2018 г.
22. Б.Е. Умирзаков, С.Б. Донаев, М.Омонова. Кристаллическая структура нанопленок GaAlAs/GaAs // Седьмая Международная конференция по физической электронике ИРЕС-7. 18-19 мая Ташкент, 2018 г.
23. B.E. Umirzakov, S.B. Donaev, N.M. Mustafaeva. Electronic and optical properties of thin films GaAlAs/GaAs // SYMPOSIUM R, Solid state ionics: advanced functional materials for solid state devices E-MRS, Spring Meeting, Strasbourg, France. May 18 – 22, 2018., p. R/p-P2.40.
24. B.E. Umirzakov, S.B. Donaev, D.A. Tashmukhamedova. Production of nanosized CoSiO films on the CoSi_2 surface by the ion implantation // 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. P/p-PI.27.
25. S.B. Donaev, B.E. Umirzakov. Nanoscale structures Si created by ion bombardment on the surface of CaF_2 // The International Symposium “New Tendencies of Developing Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements, Prospective”. November 10-11, Tashkent, 2016. p. 325-326.
26. Z.A. Isakhanov, B.E. Umirzakov, M.K. Ruzibaeva, S.B. Donaev. Effect of the O_2^+ -ion bombardment on the tin composition and structure // The International Symposium “New Tendencies of Developing Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements, Prospective”. November 10-11, Tashkent, 2016. p. 224-225.
27. С.Б. Донаев, Х.Х. Болтаев, Ш. Бегмаматов, Д.А. Ташмухамедова, Б.Е. Умирзаков. Получение упорядоченных наноразмерных структур Si на поверхности CaF_2 // Кремний – 2016, 12-15 сентября, Новосибирск, 2016 г. С.161.
28. B.E. Umirzakov, D.A. Tashmukhamedova, S.B. Donaev. Profiles of distribution of atoms on border of nanofilms Al - CaF_2 and Al - Ca - CaF_2 // E-MRS, Spring Meeting, Lille, France. May 2 – 6, 2016., p. BB6.8.
29. С.Б. Донаев, Б.Е. Умирзаков, З.Саидахмедова. Влияние предварительной ионной бомбардировки на профили распределения атомов на границе пленок Al/CaF_2 // Материалы Республиканской научно-практической конференции Микроэлектроника, физика наночастиц и технологии. Декабрь 4-5, 2015, Андижан, С.41-42.
30. Б.Е. Умирзаков, С.Б. Донаев. Применение ионной бомбардировки для получения однородных наноструктур Si на поверхности CaF_2/Si // Сборник тезисов докладов международной конференции. Фундаментальные и прикладные вопросы физики. 5 - 6 ноября, 2015, Ташкент, С.180-182.
31. Б.Е. Умирзаков, М.Т. Нормурадов, С.Б. Донаев. Применение ионной бомбардировки для получения упорядоченных зародышей на поверхности пленок CaF_2 // Материалы Республиканской конференции «Современные проблемы физики полупроводников» СПФП-2015, Нукус, с.89-91.

32. B.E. Umirzakov, D.A. Tashmukhamedova, S.B. Donaev, M. Yusupdjanova. Electronic properties of the surface of films $\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$ implanted by ions Ba^+ and Na^+ . E-MRS, Spring Meeting, Lille, France. May 11 – 15, 2015, p. Z.PI 4.
33. B.E. Umirzakov, S.B. Donaev. Investigation of the processes of nanodimensional structure formation in the surface area Pd and PdBa under ionic bombing. EMRS 2014 Spring Meeting, May 26th-30th - Lille 2014, p. EP2-12.

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 № 100.

Гувоҳнома № _____
“ _____ ” босмахонасида чоп этилган.
Босмахона манзили: _____