

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

**КОСИМОВ ИСРОИЛ ОДИНАЕВИЧ**

**КРЕМНИЙ ЮЗАСИДА ҲОСИЛ ҚИЛИНГАН Cu, CdSe ВА TiO<sub>2</sub> ЮПҚА  
ПЛЁНКАЛАРИНИНГ ЭЛЕКТРОН СПЕКТРОСКОПИЯСИ**

**01.04.04 – Физик электроника**

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

**Ташкент-2025**

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

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)  
По физика-математическим наукам**

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

**Косимов Исроил Одинаевич**

Кремний юзасида ҳосил қилинган Cu, CdSe ва TiO<sub>2</sub> юпка  
плёнкаларининг электрон спектроскопияси ..... **5**

**Косимов Исроил Одинаевич**

Электронная спектроскопия тонких пленок Cu, CdSe, TiO<sub>2</sub> созданных  
на поверхности кремния ..... **26**

**Kosimov Isroil Odinaevich**

Electronic spectroscopy of thin Cu, CdSe, TiO<sub>2</sub> films created on a  
silicon surface ..... **49**

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

Список опубликованных работ  
List of published works ..... **54**

**ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ  
ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ  
DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ  
ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ**

**КОСИМОВ ИСРОИЛ ОДИНАЕВИЧ**

**КРЕМНИЙ ЮЗАСИДА ҲОСИЛ ҚИЛИНГАН Cu, CdSe ВА TiO<sub>2</sub> ЮПҚА  
ПЛЁНКАЛАРИНИНГ ЭЛЕКТРОН СПЕКТРОСКОПИЯСИ**

**01.04.04 – Физик электроника**

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

**Ташкент-2025**

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Олий таълим, фан ва инновациялар вазирлиги хузуридаги Олий аттестация комиссияси B2022.3.PhD/FM765 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация А.У. Арифов номидаги Ион плазма ва лазер технологиялари институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус ва инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида ([www.iplt.uz](http://www.iplt.uz)) ҳамда «ZiyoNet» ахборот-таълим порталида ([www.ziyo.net](http://www.ziyo.net)) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Исаханов Зинаобидин Абилпейзевич  
физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оponentлар:

Максимов Сергей Евлантиевич  
физика-математика фанлари доктори, кат.и.х.

Ахроров Субхан Курбонович  
физика-математика фанлари номзоди, доцент

Етакчи ташкилот:

Ислом Каримов номидаги Тошкент давлат  
техника университети

Диссертация ҳимояси Ион-плазма ва лазер технологиялари институти хузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 рақамли илмий кенгашнинг 2025 йил «11» сентябрь соат 16<sup>00</sup> даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 33-уй. Тел./факс: (99871) 262-32-54, e-mail: [info@iplt.uz](mailto:info@iplt.uz), Ион-плазма ва лазер технологиялари институти мажлислар зали).

Диссертация билан Ион-плазма ва лазер технологиялари институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (4 рақами билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 33-уй. Тел: (99871) 262-31-69.)

Диссертация автореферати 2025 йил «30» сентябрь кuni тарқатилди.

(2025 йил «30» сентябрь даги 4 рақамли реестр баённомаси)



Х.Б.Ашуров  
Илмий даража берувчи  
Илмий кенгаш раиси, техника  
фанлари доктори, профессор

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

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

## **КИРИШ** (Фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг аннотацияси)

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурлиги.** Яримўтказгичли Si-Cu, TiO<sub>2</sub>, CdSe юпқа плёнкалари ва хусусан улар асосида ўстирилган гетероструктурали материаллардан, опто ва наноэлектрон қурилмалар, фотодетекторлар, сенсорлар, нурланиш резонаторлари, лазерлар, қуёш элементлари ишлаб чиқаришда кенг қўлланилади. Ушбу соҳаларда юпқа плёнкалар ва намуналарнинг таркиби, тузилиши ва сирт хоссалари, шунингдек, уларга магнетронли чангланиш ва ион бомбардимон қилишнинг таъсири кенг миқёсда ўрганилмоқда. Мис, кичик электр қаршилиги, электромиграция ва бўшлиқ (нуқсон) ҳосил бўлишида ажойиб хусусиятга эга бўлган муҳим элементлардан ҳисобланади. Шунинг учун мис ва кремний орасидаги боғланиш моҳиятини чуқур ўрганиш муҳим аҳамият касб этади.

Бугунги кунга қадар Cu нинг Si билан бирикиши, ҳар хил усулларда ўстирилган бирикмалар ҳақидаги тадқиқотлар, мақолалар, бошқа кремний билан бирикма ҳосил қилган элементлар ҳақидаги маълумотларга нисбатан камроқ нашр этилган ва ўрганилган. Cu ва Si нинг ўзаро диффузияланиши хажмий буғ диффузияси сифатида ўрганилган. Сирт морфологиясини ўзгартириш, фаза параметрларини ўрганиш ва кремний таглик сиртига қатлам ўстиришнинг оптимал усулларини ишлаб чиқиш замонавий электрониканинг долзарб муаммоларидан биридир.

Ўзбекистон Республикасида истиқболли фундаментал ва амалий тадқиқотлар йўналишларини, хусусан янги наноматериаллар яратиш, уланинг фундаментал физик хусусиятларини ўрганиш ва олинган тадқиқот натижаларини амалиётда қўллашни ривожлантиришга катта эътибор қаратилмоқда.

Ушбу диссертация маълум даражада Ўзбекистон Республикаси Президентининг «2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича Ҳаракатлар стратегиясини амалга ошириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли фармони ҳамда «Фанлар академияси фаолияти, илмий-тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги 2017 йил 17 февралдаги № 4ПҚ-2789-сонли қарори доирасида кўзда тутилган вазифаларни бажаришга хизмат қилади.

**Диссертациянинг Республика фан-техника тараққиётининг устувор йўналишларига мувофиқлиги.** Диссертация Ўзбекистон Республикаси фан ва техникасини ривожлантиришнинг устувор йўналишига мувофиқ амалга оширилди: «Энергия ва энергия ресурс тежамкорлик; замонавий электроника; микроэлектроника; фотоника; электрон қурилмаларини ривожлантириш» каби устувор йўналишлар доирасида амалга оширилган

**Муаммони ўрганилганлик даражаси.** Янги электрон қурилмаларни яратиш истиқболлари кўп жиҳатдан аниқланган физик хусусиятларга эга бўлган юпқа плёнкали кўп қатламли гетероструктураларнинг синтези билан белгиланади. Бундай ҳолда, фақат ўзига хос физик-кимёвий хусусиятларга эга

бўлган "нанофаза - матрица", "нано-қатлам"- "таглик" алоҳида қизиқиш уйғотади. Шу муносабат билан кейинги йилларда ушбу тизимларнинг таркиби, тузилиши ва хусусиятларини ўрганиш борасида жуда кўп ишлар амалга оширилган. Шулар жумласидан Демчик Б.Г. (Demczyk B.G. ва бошқалар) хона ҳароратида Si(100) да Cu нинг юқори энергияли электрон дифракцияси (ЮЭЭД) да ўсиши натижаларини тақдим этди. Ушбу ишда Si (111) таглик сиртига Cu нинг дискрет ориентацияларига эга бўлган эпитаксиал Cu қатлами устирилганлиги кўрсатилган. Айтиш жоизки, ушбу тадқиқотда мис силицидининг фазалараро жойлашиш ҳудуди Si(100) да Cu нинг эпитаксиал қатлами ўсишига Si(100) нинг кристалл панжараларининг мос келиши орқали амалга ошганлигини тасдиқлаган.

Krastev E.T., Voice L.D., Tobin R.G юзадаги мис оролчаларининг электр ўтказувчанлиги сирт, оралиқ ёки зарра чегарасига боғлиқлигини аниқлаган.

Ушбу ишда Sadowski J., Domagała J.Z., Zajkowska W., Kret S ва бошқалар Si(001) тагликка Cu атомларининг ўтириши ва тавлашнишини ўрганиш учун модификацияланган киришма атомлар усули ёрдамида молекуляр динамика моделлаштиришидан фойдаланганлар.

Қиздирилганидан сўнг плёнканинг тузилиши аморф ҳолатдан кристалл тузилишга сезиларли даражада ўзгариши кўрсатилган. Дж Олеа. ва бошқалар, тўйинган TiSi олиш учун биринчи марта микротўлқинли қиздириш жараёнларидан фойдаланганлар.

Ti нинг юқори дозалари Si тагликка ион имплантация қилинган ва кейин аморф қатламни қайта кристаллаштириш учун микротўлқинли қиздириш усулида ишлов берилган. Олинган қатламлар монокристалликка эга юқори зичликдаги нуқсонлардан иборат бўлган. Пандарам П. ва бошқаларнинг ишларида, TiO<sub>2</sub>-Si юпқа плёнкаси учун рентген нурлари дифракция спектрлари олинган ва TiO<sub>2</sub> юпқа плёнкасининг барча намуналарда анатаз фаза тузилиши ва қиздириш натижасида анатаз фазадан рутил фазага ўтишини кўрсатган. Рентген нурлари дифрактометри қурилмаси ёрдамида Ti/TiO<sub>2</sub>/p+Si юпқа плёнкасининг кристалл тузилиши ҳақида барча маълумотларини ҳисоблаш тизими ишлаб чиқилган ва намуна структурасини аниқлаш учун фойдаланилган. Стачура Р., ва бошқалар, синхротрон нурланишига асосланган рентген дифрактометри усули билан ўзгартирилмаган ва паст энергияли нурланган юқори зарядланган Хе<sup>+</sup> ионлари билан TiO<sub>2</sub> наноқатламларининг морфологиясини, TiO<sub>2</sub> наноқатламларининг зичлиги, қалинлиги ва сирт ғадир-будурлигини аниқлаган ва ушбу таҳлил натижалари TiO<sub>2</sub> наноқатламлари юза зичлиги, ҳажмий зичлигига нисбатан анча паст эканлигини кўрсатган.

Пандарам П. ва шогирдлари гамма-нурланишнинг p- типли кремний (Si) ва ғовак кремний (PSi) устида тўпланган юпқа титан диоксиди (TiO<sub>2</sub>) плёнкасига таъсирини ўрганиб чиқдилар ва гамма нурланиши туфайли турли хил структуравий, оптик, электр хусусиятларининг ўзгаришини кремний устидаги гетероўтишлар ва кремнийнинг ғоваклилиги текстурасини аниқладилар.

Б. Э. Умирзаков, М. Т. Нормурадов ва уларнинг шогирдлари томонидан биринчи марта паст энергияли ион имплантацияси усули билан

наноплёнчалар, сиртдаги нанофазалар, яримўтказгичларнинг турли чуқурликларида нано ўлчамдаги кристаллар ва уларнинг шаклланиш механизмлари, хар хил қатламлар учун ўрганилган.

**Диссертация тадқиқотнинг диссертация бажарилган олий таълим муассасаси ёки илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация иши Ион плазмаси ва лазер технологиялари институтининг илмий-тадқиқот режасига асосан қуйидаги лойиҳалар доирасида амалга оширилди: № ОТ-ФЗ-13 «Кремний-силицид-металлнинг эркин кўп қатламли наноплёнка структураларини шакллантириш механизмлари ва уларнинг электрон ва кристалл тузилишини ўрганиш» (2017–2020) ва Ф-ФА-2021-509-сон «Метал ионлари билан имплантация қилиш ва фаол органик бирикмалар молекулалари томонидан адсорбцияланганда ноорганик ( $Ti$ ,  $W$ ,  $WO_x$ ,  $TiO_2$ ,  $Si$ ,  $SiO_2$ ) ва органик (полимерлар) материаллар юзасида кўп компонентли наноструктураларни ҳосил қилиш механизмлари»

**Тадқиқотнинг мақсади**  $TiO_2$ ,  $CdSe$ ,  $Si/Cu$  нинг нано ўлчамдаги тузилмаларининг ҳосил бўлиш қонуниятларини ва уларнинг электрон тузилиши, таркиби ва хусусиятларига ион бомбардимон қилиш ва қиздиришнинг таъсирини ўрганишдан иборат.

**Тадқиқот вазифалари:** Юқоридаги мақсадни амалга ошириш учун қуйидаги вазифалар куйилди :

магнетронли чанглатиш усули ёрдамида кремнийнинг моно- ва поликристаллари сиртида  $TiO_2$  наноплёнчаларини олиш;

раман спектроскопия усули (РС) ёрдамида  $Si$  сиртига ўстирилган  $CdSe$  плёнчаларининг кристаллик даражасини ўрганиш;

$Si$  ва  $CdSe$  юзасида паст қаршиликли контактларни яратиш;

актив металл ионларини имплантация қилиш орқали  $Si/Cu$  эркин плёнка системаларининг сирт хоссаларини модификациялаш;

$Cu$  ионлари билан имплантация қилинган  $Si$  таркиби ва хоссаларига ионлар бомбардимони ва ундан кейинги қиздиришнинг таъсирини ўрганиш;

$Cu-Si$  наноплёнчаларининг тормозлаш қобилиятини назарий ўрганиш;

**Тадқиқот объекти**  $Cu$ ,  $TiO_2$ ,  $CdSe$  нинг поликристал плёнчалари,  $Cu/Si$   $TiO_2/Si$  (111) ва  $CdSe/Si$  нинг поли- ва монокристалл намуналари.

**Тадқиқот предмети**  $Cu/Si$ ,  $TiO_2/Si(111)$  ва  $CdSe/Si$  лар юзаси ва юза остида нано-ўлчамдаги тузилмалар электрон структураси ва тузилмаларни ҳосил қилишнинг физик механизмларидан иборатдир.

**Тадқиқот усуллари.** Оже – электрон спектроскопияси (ОЭС), иккиламчи ионлар масс-спектрометрияси (ИИМС), магнетрон чанглатиш усули, ультрабинафша фотоэлектрон спектроскопияси (УФЭС), энергиясини характерли йўқотган электронлар спектроскопияси (ЭХЙЭС), тезлаштирилган электрон дифракцияси (ДБЭ), Раман спектроскопияси (РС), атом кучи микроскопияси (АСМ), сканерловчи электрон микроскопияси (СЭМ), рентген фазавий таҳлили (РФТ).

**Тадқиқотларнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

Илк бор Si(111) юзасида турли қалинликдаги TiO<sub>2</sub> плёнкалари олинди ва Миллер индекслари ва панжара параметрлари аниқланди. Плёнка таркибида TiO<sub>x</sub>, TiO<sub>x</sub>C<sub>y</sub> каби бирикмалар ҳолида O, C ва баъзан H нинг микро ёки нанозаррачалари атомлари борлиги кўрсатилган, TiO<sub>2</sub> нинг кристалли ва аморф фазаларининг фоизи аниқланади: кристалл қисми 19%, аморф қисми 81%;

кремний юзасига ўстирилган CdSe плёнкаларини дастлаб хона ҳароратида ва 800°C гача қиздирилганда аморфлик ва кристаллик даражалари Раман спектроскопия усулида аниқланди. Кадмий селениддаги аморф фазанинг улуши 46% дан 17% гача камайганлиги аниқланди. Олинган натижалар қуёш элементлари, микроэлектроника, нуқсонларнинг пайдо бўлиш соҳаларида, шунингдек, оптоэлектроника ва нанотехнология соҳалари учун материаллар яратиш тадқиқотлар учун катта қизиқишлар уйғотади;

кремний таглик юзасида миснинг юпқа кичик қаршиликли контакт қатлами олинди, ва бу ўстирилган мис қатлами юпқа ва силлиқ бўлиб, юзасининг тузилиши ва морфологиясини ўзгартирмайди, шу билан бирга кремний юзасида ўстирилган фотоэлементлар юза рельефи (силлиқланганлиги) ток оқимининг йўқотишларини камайтиришга, ва шунга мос равишда уларнинг самарадорлигини оширишга имкон беради;

қалин ва эркин юпқа плёнкалар валент электронларининг ҳолат зичликлари бир-биридан кескин фарқ қилиши аниқланди. Ba<sup>+</sup> ионларини имплантация қилиш ва сўнгра қиздириш натижасида BaSi типидagi наноплёнка ҳосил бўлиши ва маълум миқдорда боғланмаган Si атомлари борлиги аниқланди. Кремнийнинг қалинлиги d≤400Å бўлган эркин Si–Cu плёнкаларига актив металл ионларини имплантация қилишда қуйидаги чекловлар мавжудлиги аниқланди: ион энергияси E<sub>0</sub> =4–5 кэВ дан кам бўлиши керак; имплантациядан кейинги қиздириш T ≤ 800 K да амалга оширилиши керак. BaSi плёнкалари поликристал тузилишга эга бўлиб, Si атомларининг бир оз кўплиги билан ажралиб туради;

ИИМС ва ОЭС усули ёрдамида Cu нинг элементар ва кимёвий таркибидаги ўзгаришларни, Cs<sup>+</sup> ионларини имплантация қилиш ва сўнгра қиздириш орқали сиртини тозалашнинг самарали усули ишлаб чиқилди. Cs<sup>+</sup> атомлари юқори фаоллиги туфайли кислород ва углерод атомлари билан кимёвий боғ ҳосил қилиши ва қиздирилгандан сўнг Cs+O, Cs+C ҳолатда буғланиши аниқланди;

Ba<sup>+</sup> ва Cs<sup>+</sup> ионлари билан бомбардимон қилинганда Cu–Si наноплёнкасининг тормозлаш қобилияти назарий тадқиқотлари Si–Cu контакт қатламигача кириб борганида энергия йўқотилиши сезиларли даражада ошиши аниқланди. Ҳисоблашлар шуни кўрсатдики, контакт қатламларидаги диамис (Cu<sub>2</sub>Si) ва триамис (Cu<sub>3</sub>Si) силицидлари концентрацияси ортиб бориши билан, имплантация қилинаётган ионларнинг энергия йўқотиши кескин ошиши аниқланди. Буни плёнкада кремний ионларининг мисга ва мис ионларининг кремнийга диффузияланиши натижасида бўлиши аниқланди, бу эса сочилиш марказларининг ошиб боришига олиб келиши аниқланди.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

- магнетрон чанглатиш усули ёрдамида кремний юзасига механик ишлов бериш ва уни милтиллама разряд ионлари ёрдамида тозалагандан сўнг, миснинг контактини ҳосил қилиш усули ишлаб чиқилди. Бу усул бир хил калинликдаги ва сиртга юқори адгезияланган мис қатламини (3-3,5 мкм) олиш имконини беради. Бундай ҳолда, Si сиртининг тузилиши ва морфологияси ўзгармайди;

- мисни маълум вақт давомида  $T \approx 1200$  К га қиздиргандан сўнг, фаол металл ионларини имплантация қилиб, сўнгра  $T \approx 1000$  К да қиздириш орқали мис юзасини тозалаш режими ишлаб чиқилди;

-  $Ba^+$  ионларининг имплантацияси ва сўнгра қиздириш  $BaSi$  типигаги наноплёнкаларни олишга ёрдам бериши ва Si атомларининг ортиқча миқдори борлиги аниқланди.

**Тадқиқот натижаларининг ишончилиги** Тадқиқот иши замонавий илмий ва экспериментал усуллардан фойдаланиш, тажрибаларнинг зарур статистик маълумотлари, ўлчаш ва маълумотларни қайта ишлашнинг мустақил усуллари мажмуасидан фойдаланиш, шунингдек, олинган натижаларнинг замонавий назарий тушунчаларга мувофиқлиги билан тасдиқланади.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** *Илмий аҳамияти:* ушбу ишда олинган экспериментал натижалар тавланиш билан биргаликда инерт газлар ва фаол металл ионлари билан бомбардимон қилиш пайтида бинар яримўтказгичларнинг юзасида ва сиртга яқин қатламларида нано ўлчовли тузилмаларнинг шаклланишининг асосий механизмларини аниқлаш имконини беради ҳамда ўлчамлари кичрайтирилган материаллар назариясини ривожлантириш учун алоҳида аҳамиятга эга.

*Амалий аҳамияти:* берилган физик хусусиятларга эга нано ўлчамдаги тузилмаларни ишлаб чиқиш учун таклиф қилинган технологиялар янги микро, нано ва оптоэлектроника асбобларини ишлаб чиқишда истиқболга эга эканлигидан иборат.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Диссертация иши доирасида фойдаланилган мақолага “Isakhanov, Z.A., Kosimov, I.O., Umirzakov, B. E., & Erkulov, R. M. (2020). Modification of the surface properties of free Si–Cu films by implantation of active metal ions. *Technical Physics*, 65(1), 114-117”, скопус илмий базасида 3 та ҳавола берилган. Ушбу ҳавола мақолалар қуйидаги мавзуда келтирилган:

1. Sharopov U. B. et al. Comparison of electron irradiation on the formation of surface defects in situ and post thin-film LiF/Si (111) deposition //Thin Solid Films. – 2021. – Т. 735. – С. 138902. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.138902>

2. Theodosiou A. et al. Formation of cesium carbonate in ion-implanted graphite, examined with dual-source x-ray photoelectron spectroscopy, density functional theory calculations and thermodynamic modelling //Carbon. – 2022. – Т. 197. – С. 226-237. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.06.034>

3. Бернацкий Д. П., Павлов В. Г. Полевая десорбция цезия и бария с нанокластеров графена на поверхности иридия //Физико-химические аспекты

изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2023. – Вып. 15 -2023. -С.40-45.

4. Sharopov, U.B., Kaur, K., Kurbanov, M.K. *et al.* Controlling the Low-temperature Ionic Purification of a Silicon Surface by Electron Spectroscopy. *Silicon* **14**, 4661–4667 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01268-0>

Диссертация ишида олинган натижа асосида энг яхши жаҳон аналоглари даражасида электрофизик параметрларнинг прототиплари ишлаб чиқарилди. (“Фотон АЖ” “Махсулотлар сиртига комбинацияланган қатлам ўстиришда тажриба наъмунасида ишлатиш” бўйича директор ўринбосарининг 06.12.2023 даги илмий тадқиқот ишларининг натижалари бўйича жорий этиш № 236 рақамли маълумотномаси):

диссертация ишида таклиф қилинган магнетрон ионли чанглатиш манбаси ёрдамида юпқа мис қатламини қўллаш орқали кремний поликристаллига Cu-Si паст қаршиликли контакт яратиш, унинг юқори ўтказувчанлиги ва қалинлиги 3,0 - 3,5 микрон бўлганлиги сабабли, унинг кичик қаршиликка эришиш имконини беради.

диссертация ишида келтирилган раман усули ёрдамида хона ҳароратидан 800<sup>0</sup>С гача қиздирилганда CdSe плёнкаларида аморф ва кристалланиш даражасининг ўзгариши ўрганилди. Бунда кадмий селен таркибида аморф фазанинг улуши 17% гача камайиши аниқланди. Олинган натижалар микроэлектроника, нуқсонларни шакллантириш, шунингдек, опто- ва наноэлектроника учун материаллар яратиш соҳасидаги тадқиқотлар учун катта қизиқиш уйғотади.

Олинган натижалар микроэлектрон қурилмаларни яратишда ФОТОН АЖда жорий этилди ва фойдаланилди. Илмий натижалардан фойдаланиш «ФОТОН» акциядорлик жамиятида термик барқарор параметрларга эга яримўтказгичли қурилмаларни яратиш ҳамда ишлаб чиқарилаётган махсулотлар таннархини пасайтириш ва шундай параметрларга эга қурилмаларнинг рентабиллигини таъминлашга имкон беради.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Диссертация иши натижалари (22 та тезис) маҳаллий ва 14 та ҳалқаро конференцияларда муҳокама қилинган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.** Диссертация мавзуси доирасида жами 7 та илмий мақола чоп этилган, шулардан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг фалсафа доктори (PhD) диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этишга тавсия этилган илмий журналларда, жумладан 5 та республика ва 2 та чет эл илмий журналларида мақолалар нашр этилган.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертация ишининг тузилиши кириш, тўрта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертация ҳажми 134 бет матндан, шу жумладан 54 расм ва 5 жадвалдан иборат.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

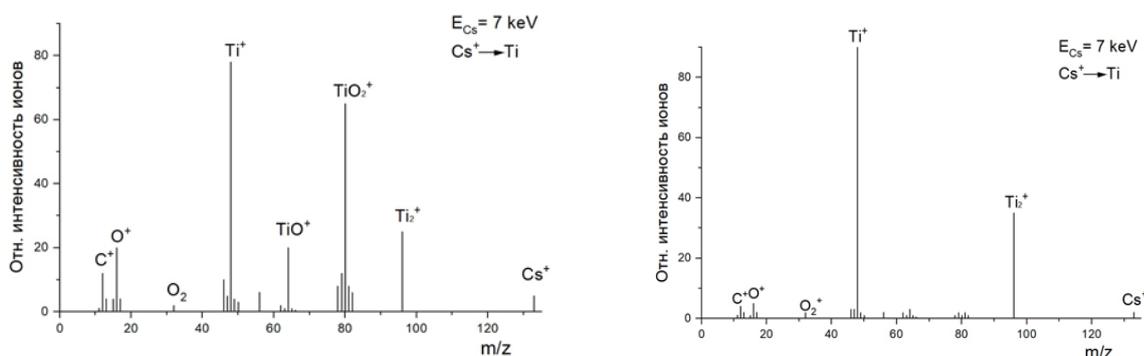
**Диссертация ишининг кириш қисмида**, диссертация мавзусининг ахамияти ва долзарблиги асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари шакллантирилган, тадқиқот объектлари, предмети ва усуллари ҳақида маълумот берилган, тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва техникани ривожлантиришнинг устувор йўналишларига мувофиқлиги аниқланган. Олинган натижаларнинг илмий янгилиги ва илмий- амалий ахамияти тақдим этилган, натижаларнинг ишончлилигига асосланиб, уларни амалга ошириш, ишнинг апробация натижалари ва диссертация тузилмаси ҳақида маълумотлар келтирилган.

**Диссертация ишининг биринчи бобида** "Бинар ярим ўтказгичларнинг электрон ва оптик хусусиятларига техник ишлов беришнинг таъсири" бўйича адабиётлар шарҳида замонавий адабиётлар таҳлили ҳақида умумий маълумот берилган. Экспериментларни таҳлил қилиш натижалари шуни кўрсатадики, ҳозирги вақтда қуйидаги масалаларни ўрганишга катта эътибор қаратилмоқда: турли хил юпқа қатламларни олиш; қатламларнинг тузилишини ўрганиш; катализаторлар учун ишлатиладиган оксидли материалларнинг физик ва кимёвий хусусиятлари; плёнка ва кукун материалларининг морфологияси. Бу тозалиги юқори даражадаги металл контактларни яратиш, имплантация технологияларидан фойдаланиш ва турли хил қопламаларни олиш учун фан ва технология истиқболлари билан боғлиқ. Ўрганилган адабиётлар таҳлили натижасида шуни айтишимиз мумкинки  $TiO_2$ ,  $CdSe$  асосида олинган кристалллар морфологияси,  $Si/Cu$  кичик қаршиликка эга (омик) контакт морфологияси жуда кам ўрганилганлигини кўрсатди. Ушбу кам ўрганилган муаммолар диссертация ишининг мақсадларини аниқлаш ва вазифаларини амалга ошириш учун асос бўлиб хизмат қилди.

**Иккинчи боб "Экспериментал қурилма ва тадқиқотлар методологияси"** ҳақида бўлиб,  $TiO_2$ ,  $CdSe$  ва  $Si/Cu$  поликристалларини спектроскопик таҳлил қилиш ва ўрганиш бўйича тажриба тавсифи ва тадқиқот усуллари кўриб чиқилган. Асосий тажрибалар Ўзбекистон Республикаси фанлар академияси У. А. Арифов номидаги Ион-плазма ва лазер технологиялари институтининг "Адсорбцион ва эмиссион ҳодисалар" физикаси лабораториясида яратилган вакуум қурилмаларида ўтказилди. Ишда қўйилган вазифаларни бажариш учун кремний сиртида ўстирилган  $Cu$ ,  $TiO_2$  ва  $CdSe$  юпқа плёнкаларини, шунингдек,  $Si/Cu$  эркин плёнкалари юзасини ўзгартириш ва вакуум шароитида уларнинг физик хусусиятларини ўрганишдан иборат. Олинган натижалар сирт ғадир-будурлигини атом кучи микроскопияси (АСМ), XRD-6100 Shimadzu дифрактометри, раман спектроскопия усули ва сканерловчи электрон микроскоп (СЭМ) ёрдамида таҳлил қилинди. Ушбу усуллар биргаликда қуйидагиларни таъминлашга имкон берди: намунанинг ишлов берилган юзасининг ғадир-будурлигини ўрганиш; унинг сирт ости соҳанинг қаттиқлиги; ҳарорат таъсиридан кейин материал юзасидаги таркибий ўзгаришларни таҳлил қилиш, намуна юзасидаги элементларни баҳолаш.

**Учинчи боб “Фотоэлементлар учун Si/Cu, TiO<sub>2</sub> ва CdSe плёнчаларини олиш режимларининг, плёнчалар кристаллиги ва морфологиясига таъсири”.** Тадқиқот давомида TiO<sub>2</sub> кукуни ва кристалларининг дастлабки намуналарининг қиздиришдан олдинги ва кейинги хусусиятлари ўрганилди. TiO<sub>2</sub> кукунининг аморфлик даражасини, кукун ва плёнчаларнинг кристаллигини, шунингдек, кукун ҳолатидаги ўлчамларини ва атомлар орасидаги масофани аниқлаш учун таҳлил ўтказилди.

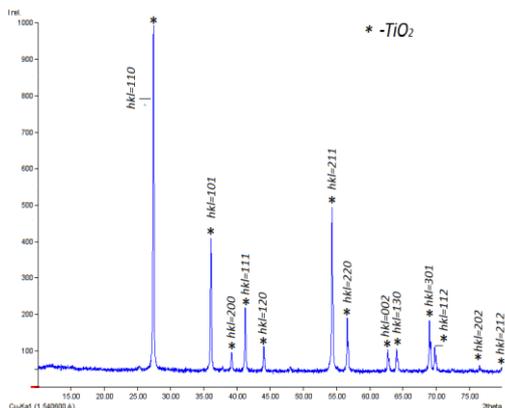
Бошида олинган намуналарнинг яхши тозаланган юзаларининг таркиби ўрганилди. Мисол тариқасида 1(а)-расмда юқори вакуум ( $P \approx 10^{-7}$  Па) шароитида дастлабки қиздиришдан олдин, ва (б)  $T \approx 1600$  К ҳароратда 2-2,5 соат давомида қиздириш усули ёрдамида тозаланган Ti поликристалл юпка плёнка намунасининг масс-спектрлари кўрсатилган. Бу тадқиқот ишида Ti сиртини  $E_0 = 7$  кэВ энергияда Cs<sup>+</sup> ионлари билан бомбардимон қилиш орқали масс-спектрлари олинган. Тозалашдан кейин Ti юзасида жуда кам миқдорда (0,5-1%) углерод ва кислород сақланиб қолиши мумкинлиги аниқланган.



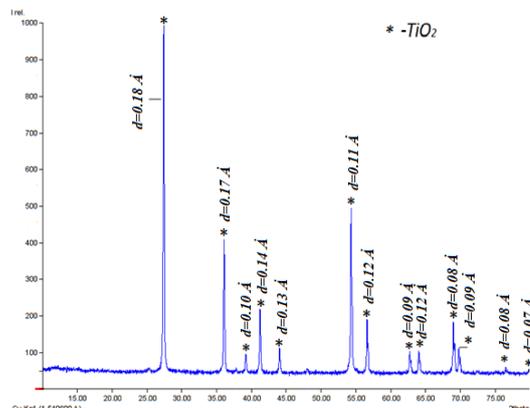
**1-расм.** Поликристалл Ti намунасининг масс-спектрограммаси: (а) қиздиришдан олдин ва(б) кейин. Ион энергияси  $E_0 = 7$  кэВ.

Рентген дифрактометр қурулмасида TiO<sub>2</sub> кристаллининг структура тузилиши, таркиби, ҳамда 900<sup>0</sup>С ҳарорат таъсирида қиздирилиб фазаларининг ўзгариш хусусиятлари ўрганилди. TiO<sub>2</sub> нинг оптика ва фотокатализ учун асосий камчилиги унинг фақат ультрабинафша (УБ) нурланиш таъсирида фаоллигидир, бу ер юзасига етиб келаётган бутун қуёш спектрининг атиги 5-8% ни ташкил қилади. Титан кукуни таркибининг рентген фазасини таҳлил қилиш шунингдек, таркибида нафақат кислород, азот ва бошқаларнинг қаттиқ фазали эритмаси кўринишидаги титан металининг кубик, гексоганал ва бошқа фазалари мавжуд, балки углерод-  $\alpha$ -титан (бу фаза кейинги ўринларда матнда макрофаза деб аталади), шунингдек стехиометрик бўлмаган фазаларида  $TiX_z$ ,  $TiX_mY_n$ , бунда  $\{X, Y\} = \{O, C, N\}$  кўринишда бўлади. Шу билан бирга TiO<sub>2</sub> нинг кукун материалида кам миқдорда микро ва нанофазалар шаклида бўлади ва терминологик жиҳатдан микро ва нанофазалар деб аталади. Бир жинслиликка эга бўлган бу фазаларнинг нисбий ҳажм қиймати ва таркиби ҳароратнинг ўзгариши билан ўзгаради. 2-3 расмда (XRD -6100) кукунли дифрактометрда ўлчанган TiO<sub>2</sub> нинг, турли чўққилар учун  $2\theta$  рентген нурунининг тушган ва қайтган бурчакларда анатаз фазали TiO<sub>2</sub> нинг Миллер индекслари ( 200, 111, 120, 211, 220, 002, 130, 112, 202, 212) ҳамда, ушбу намуна учун текисликлараро масофалари  $d_{hkl}$  аниқланди.

2- ва 3-расмдан кўриниб турибдики  $\text{TiO}_2$  намуналарининг (қиздирилган ва қиздирилмаган) ҳолати учун олинган натижалар адабиётлар билан таққосланди ва олинган натижалар билан мос келиши аниқланди. Энг юқори интенсивлик шуни кўрсатадики, юқори дифракция чўққиси  $2\theta=27,58^\circ$  бурчакда  $\text{TiO}_2$  учун энг юқори интенсивликка эга  $hkl(110)$  анатаз фазасига тегишли эканлигини тасдиқлайди.

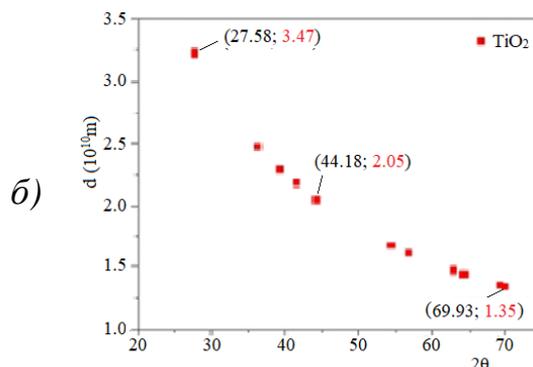
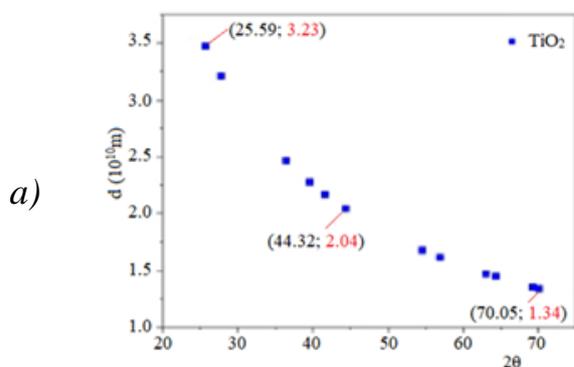


2-расм. Кукунли дифрактометр усулида олинган  $\text{TiO}_2$  нинг спектрал боғлиқлиги.



3-расм. Кукунли дифрактометр усули билан олинган  $\text{TiO}_2$  нинг спектрал боғлиқлиги. Ушбу намуна учун текисликларо масофа  $d_{hkl}$  аниқланган.

Қиздирилмаган ва қиздирилган  $\text{TiO}_2$  намуналар учун турли хил текисликларо масофаси аниқланди (5-6 расм). Рентген фаза таҳлили  $\text{TiO}_2$  кристалл структурасидаги ўзгаришлар содир бўлиши ҳароратга боғлиқ эканлигини кўрсатди. 4а-расмда  $\text{TiO}_2$  дастлабки (қиздирилмаган) намунасининг текисликлар орасидаги масофаси  $d_{hkl}=3,478 \text{ \AA}$  эканлиги келтирилган. Рентген нурунининг тушган ва қайтган нурлар орасидаги бурчакларда  $2\theta=25.590$  текисликларо масофаси  $d_{hkl}=2,042 \text{ \AA}$  ва бурчаги  $2\theta=44.32$  бўлганда текисликларо масофаси  $d_{hkl}=1,342 \text{ \AA}$  га тенг эканлиги аниқланди.



4-расм. а)  $\text{TiO}_2$  қиздиришдан олдинги ва б)  $900^\circ\text{C}$  ҳароратда қиздирилганда атомлар орасидаги масофанинг ўзгариши келтирилган.

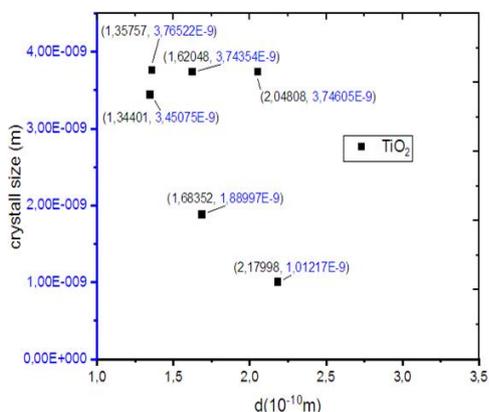
$\text{TiO}_2$  кристаллини  $900^\circ\text{C}$  температурада 1 соат давомида қиздирилгандан сўнг, текисликларо масофаси қуйидагича ўзгарганлиги аниқланди:  $d_{hkl}=3,231 \text{ \AA}$  учун бурчаги  $2\theta=27.580$ ;  $d_{hkl}=2,048 \text{ \AA}$  учун бурчаги  $2\theta=44.180$ ;  $d_{hkl}=1,344 \text{ \AA}$  учун бурчаги  $2\theta=69.930$ .  $\text{TiO}_2$  нинг кристалли тузилишини,

атомлараро масофасини ва ўртача кристалл ўлчамини аниқлаш учун Дебай-Шеррера формуласидан фойдаланиб, қуйидагиларни аниқладик:

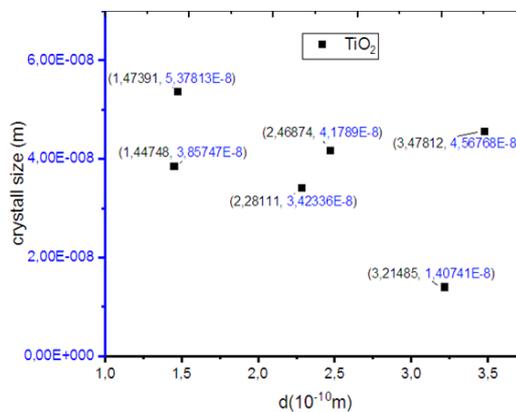
$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \dots \dots \dots (1)$$

бу ерда D-кристаллнинг ўртача ўлчами, K- заррача шакли коэффиценти (Шеррера доимийси);  $\lambda$ -рентген нурланиши тўлқин узунлиги;  $\beta$  -бу пик (чўкки) ярим баландлигидаги чўкки кенглиги (радианда ва  $2\theta$  бирликда);  $\theta$  -бу дифракция бурчаги (Бреег бурчаги). K- коэффицент заррачалар шаклига қараб ҳар хил қийматларни қабул қилиши мумкин. Масалан, сферик зарралар учун K одатда 0,9 деб қабул қилинган. Шеррера доимийси  $\text{TiO}_2$  атомлари орасидаги масофа (d) функцияси сифатида ифодаланади. 6-расмда  $\text{TiO}_2$  атомларини қиздиришдан олдин атомлари орасидаги масофа (d)- (1.342 Å; 2.042 Å; 3.214 Å) эканлиги ва ўртача кристалл ўлчами -  $D = (5.37 \cdot 10^{-8}; 1.40 \cdot 10^{-8})$  м эканлиги аниқланди. Ушбу  $\text{TiO}_2$  намунанинг кристаллик ва аморфлик даражаси улушлари “Sarch and Match3!” дастурий таъминоти ёрдамида аниқланган.

Титан оксиди учун аморф фаза -81% ни, кристаллик фаза эса -197% ни ташкил этганлиги аниқланди. Бу натижа эса бизнинг  $\text{TiO}_2$  намунамиз асосан аморф фазали эканлигини кўрсатади. Юқоридаги 7-расмдан  $\text{TiO}_2$  намунамиз учун максимал интенсивлик бир соат давомида  $900^\circ\text{C}$  ҳароратда қиздирилгандан сўнг,  $2\theta$  (27,31,36,08,54,21) бурчакларга мос пиклар, қиздирилмаган намунага қараганда 2-3 баробар юқори интенсивликка эга бўлганлигидан далолат беради.



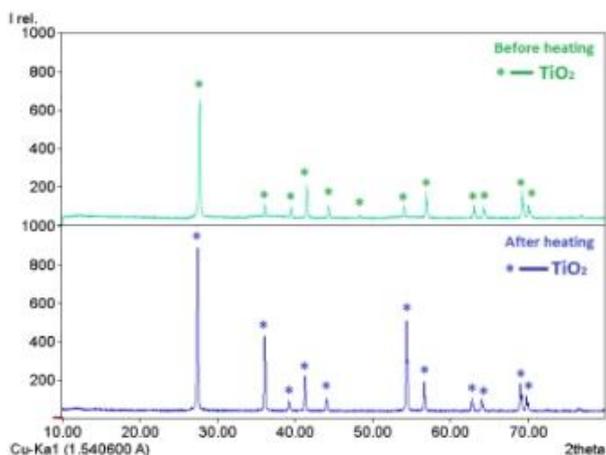
**5-расм.** Дастлабки намуна учун  $\text{TiO}_2$  Шеррер доимийси атомлар орасидаги масофага боғлиқлиги (d).



**6-расм.** Қиздирилгандан кейин  $\text{TiO}_2$  учун Шеррер доимийси атомлар орасидаги масофага боғлиқлиги (d).

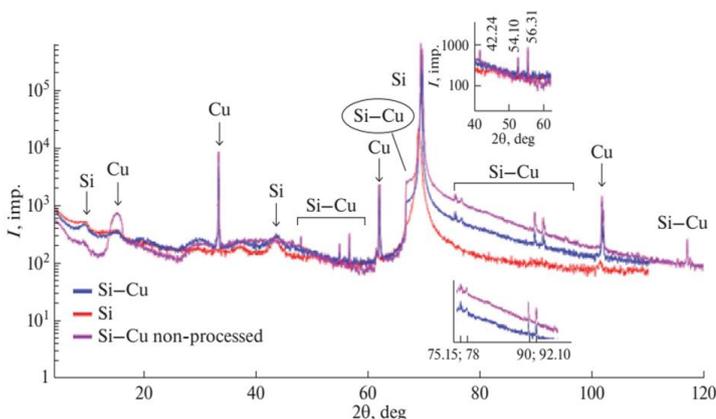
Ҳозирги кунгача, кремний пластинасининг юзасига ўстирилган айрим материалларнинг, масалан, мис каби яхши ўтказувчи контакт материаллардан тайёрланган кремний асосидаги қуёш элементларининг кристалл тузилиши ва морфологияси амалда ўрганилмаган. Магнетронли чанглатиш усулидан кремний қуёш элементлари юзасига кичик қаршиликли Cu металл ўтказгич қопламаларини олишда фойдаланилмаган. Шунинг учун ҳам ушбу ишда, магнетрон чанглатиш усули ёрдамида кремний пластинаси юзасида ўстирилган мис қатлам сифатини, морфологиясини ва унинг таркибини босқичма-босқич комплекс усуллар асосида таҳлил қилишда, рентген фазали

тахлил (РФТ), сканерловчи электрон микроскоп (СЭМ) ва атом кучи микроскопия (АКМ) усулларида фойдаланиб амалга ошириш жуда долзарб ечим ҳисобланади.



**7-расм.** Даствлабкн ва кнзднрнлган  $\text{TiO}_2$  намуналарнн таққослаш натнжаларн.

Мнс қатлами кремннн пластнкнннг юзаснга намунанн олдндан механнк, кнмёвнн ишлов бернш, ультратовушли ваннада тозалаш, шунннгдек вакуумда мнлнллама плазма нонларн билан тозалашдан сўнг, манетронлн чанглатнш орқалн ўстнрнлган.



**8-расм.** Кремннн  $\text{Si}(111)$  пластнкнннг юзаснга  $\text{Si-Cu}$  юпқа пленкаларнннг рентген днффрактограммаларн келтнрнлган: 1 -(қнзл рангда), даствлабкн кремннн пластнка таглк 2 -(пушн рангда) кремннн пластнка юзаснга  $\text{Si-Cu}$  мнс қатлам ўстнрнлган ва тозаланган, 3- (кўк рангда) кремннн пластнка юзаснга  $\text{Si-Cu}$  мнс қоплама ўстнрнлган ва ҳеч қандай ишлов бернлмаган.

Днффрактограмма шунн кўрсатаднкн, (қнзл рангда)-  $\text{Si}(111)$  намунанннг чўққиларн паст ннтенснвлнкдагн 3 та  $2\theta$  нурлннш бурчақларнга мос келаднган чўққилар  $2\theta = 12.48$ ,  $\text{Si}(110)$ ;  $2\theta = 43.25$ ,  $\text{Si}(111)$  ва  $2\theta = 70.12$   $\text{Si}(220)$  кўрсатнлган орнентацияларга мос келади, шунннгдек,  $\text{Si-Cu}$  фазалн тузнлншга эга бўлган юпқа мнс қатлам қопланган кремннн намунасн днффрактограммасн, бунда  $2\theta$  нурлннш бурчақларнга мос келаднган чўққилар 4 град/мнн донмнн айланнш тезлнглн билан  $2\theta$  оралнғнда 10 дан 120 градусгача айланаднган детекторнннг нурлннш бурчақларнга мос келаднган чўққилар мавжуд бўлнб,  $2\theta = 12,24$ ;  $54,10$ ;  $56,31$ ;  $75,15$ ;  $78$ ;  $90$ ; шунннгдек катта бурчақларда  $90$ ,  $92.10$  ва  $119$  чўққиларн номоён бўлади.

Намоён бўлган чўққилар шунн кўрсатаднкн, мнлнллама разряд ёрдамада ишлов бернлган намуналарда-(кўк ранг), қўллннладнган мнс қопламасн

билан, умуман олганда, диффракция чўққилари сони ортади, бу миснинг контакт қатламининг кремний намунаси сиртига бир хил тақсимланишига боғлиқ. Шу билан бирга, ишлов берилмаган кремний намунаси ва ишлов берилган кремний намунасининг диффракция чўққилари сони бир хил, ammo ишлов берилмаган кремний намунасида, юзанинг ғадир-будирлиги туфайли, яъни баъзи жойларда мис қатлами бир текис қопланмаганлиги сабабли, чўққиларнинг интенсивлиги юқори бўлади.

Шундай қилиб, магнетронли чанглатиш манбаи ёрдамида кремний намунаси юзасига мис контакт қатламини қоплашда, механик ишлов бериш ва милтиллама разряди ёрдамида тозалашдан сўнг, бир хил қалинликдаги ва сиртга юқори даражада сирт билан ёпишган мис қатламини олиш мумкин, чунки диффракция чўққилари ҳосил бўлган Si-Cu фаза тузилишини характерлайдиган янги чўққилар мавжуд. Яъни, кремний юзасига мис қопламалар ҳосил қилинганда, дастлабки кремний намунаси билан солиштирганда ҳосил бўлган намунанинг сиртга яқин қатламларида структуравий ва фазавий параметрларнинг ўзгариши содир бўлади.

Ушбу ҳодисада дастлабки намуна қаршилигининг ўзгариши муҳим роль ўйнайди. Кремний таглик юзасига мис контакт қўйилганда, кремний юзаси мис билан легирланади, натижада намунанинг сирт қаршилиги ўзгаради. Бундай ҳолда, умумий қаршилиқни қуйидаги формула билан аниқлаш мумкин:

$$R = \rho_k \frac{1}{al} \left[ a \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_k}} \left( \frac{e^{a\sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_k}} + e^{-a\sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_k}}}}}{2} \right) \right] = \rho_n \frac{a}{l} \left[ \frac{e^{a\sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_k}} + e^{-a\sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_k}}}}}{2ak} \right], \quad (2)$$

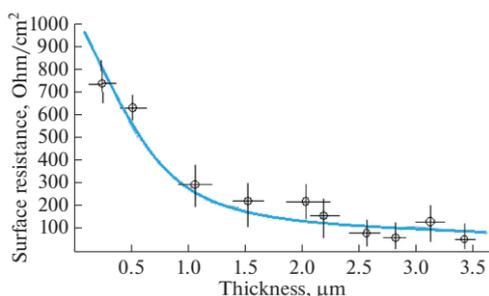
бу ерда  $a$ -контактнинг кенглиги,  $l$ -контакт узунлиги,  $\rho_k$ -мис контактнинг қаршилиги,  $\rho_n$ -кремний сиртининг қаршилиги.

Кичик концентрацияларда киритилган металл атомлари билан кремний сиртининг тузилиши учун  $\rho_k$  контакт қаршилиги нисбати билан аниқланади:

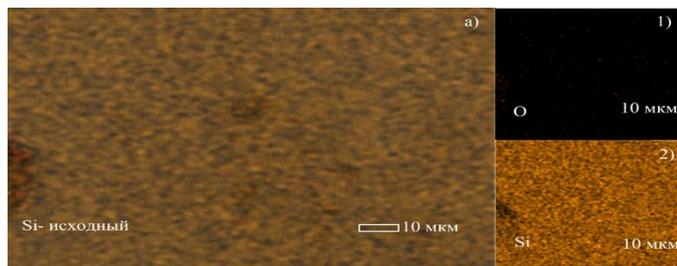
$$\rho_k = \frac{k}{eAT} e^{\frac{e\phi}{kT}}, \quad (3)$$

Бу ерда  $A$  - Ричардсон доимийси,  $\phi$  - металл-ярим ўтказгич потенциал тўсиғининг баландлиги,  $k$  - Больцман доимийси.

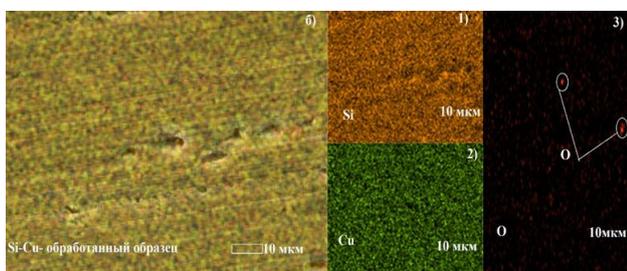
Олинган натижаларнинг таҳлили шуни кўрсатадики, ток оқими мис контактли қатламнинг қалинлигини ортиши, сирт қаршилигининг пасайишига олиб келади, бу ўлчам эффекти назарияси билан тавсифланади. 9-расмда мис плёнка сирт қаршилигининг қалинликга боғлиқлиги келтирилган. расмдан кўришиб турибдики, контакт қопламасининг қалинлиги ошиши билан сирт қаршилиги гиперболик равишда камаяди. Контакт қатламининг қалинлиги 1,5 мкм га етганда сирт қаршилиги тўйинишга яқинлашади. Олинган натижалар шуни кўрсатдики, мис контактли қатламининг сирт қаршилиги, унинг қалинлиги 3 мкм етганидан кейин ўзгармайди. Шундай қилиб, 1,5 мкм бўлган мис контактли қатлам қалинлиги оптимал қалинлик ҳисобланади деб айтиш мумкин.



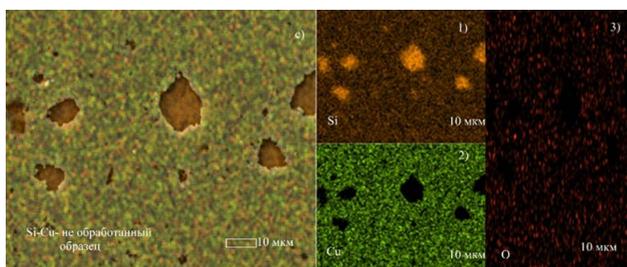
**9-расм.** Мис контакт қопламасининг қалинглигининг сирт қаршилиғига боғлиқлиги



*a) кремний таглик намуна*



*б) Магнетрон чанглатиш усулида кремний таглик юзасига Si-Cu мис қатлам ўстирилган ва милтиллама разряд ионлари билан тозаланган намуна*

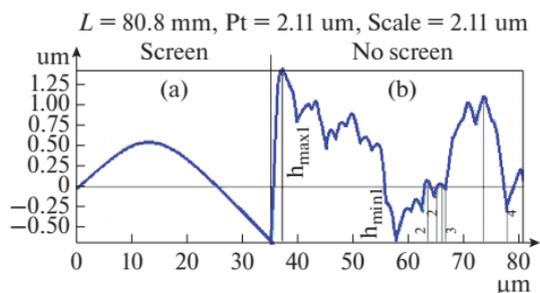


*с) Магнетрон чанглатиш усулида кремний пластинка юзасига Si-Cu мис қатлам ўстирилган ва (ҳеч қандай ишлов берилмаган) тозаланмаган намуна*

**10-расм.** Кремний пластинанинг сиртининг СЭМ тасвири

10а-расмда кўрсатилган дастлабки кремний намунаси сиртида кислороднинг юза бўйлаб тақсимланишини кўриш мумкин. Бундан ташқари 10б расмда кремний намунаси милтиллама разряд ёрдамида тозаланган, бунда сиртда кислород деярли кузатилмайди (фақат иккита нуқтада аниқланади). 10с-расмда магнетрон чанглатиш усулида кремний пластинка юзасига Si-Cu мис қатлам ўстирилган ва (ҳеч қандай ишлов берилмаган) тозаланмаган намуна тасвири келтирилган, кўриниб турибдики, сиртда катта миқдордаги кислород ороллари ҳосил бўлганлигини ва ётқизилган мис қатламида сирт киришма моддаларни ҳам кўриш мумкин. Шундай қилиб, 10 (а, б, с) расмда келтирилган СЭМ тасвирларидан кўриниб турибдики, милтиллама разряд ёрдамида тозаланган кремний намунасида магнетронли чанглатиш усулида

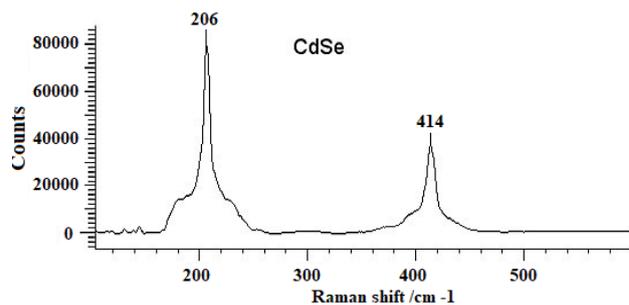
кўлланиладиган миснинг контактли қопламаси қалинлиги бир текис эканлиги ҳамда сирт билан яхши ёпишганлиги ўз исботини топади. Магнитрон чанглатиш усулида ёрдамида ўстирилган мис қопламасининг қаршилигини таҳлил қилиш мақсадида магнитрон чанглатишдан олдин ва кейин кремний тагликнинг юзасидаги ғадир-будирлигини солиштирувчи тадқиқот ўтказилди. Бунда намуна юзаси икки қисмга бўлинди, уларнинг бирининг юзасига мис қатлам ўстирилган ва иккинчи намуна ўстирилмаган.



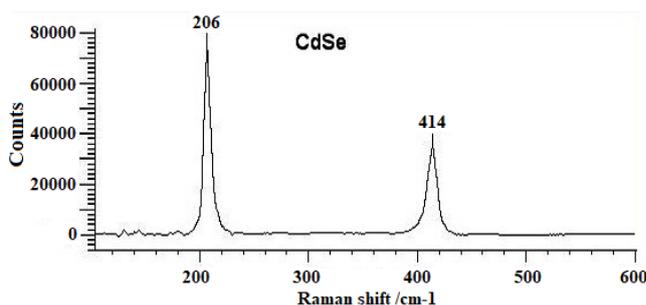
**11-расм.** Кремний пластинанинг сирт ғадир-будирлиги профилограммаси: а – экранланган қисм (мис қопламасиз), б - кремний таглигининг экранланмаган қисми, яъни мис контактли қоплама қопланган.

Профилограммаларнинг ушбу икки бўлимини таққослаш шуни кўрсатдики, бутун намунанинг асосий узунлиги  $L = 80,8$  мкм, экранланган қисми мис қоплама ўстирилмаган намуна юзасининг ғадир-будирлигидаги дўнгликлар қиймати эса  $R_{\max} = 1,23$  нм эканлиги (11-расм), ҳада кремнийнинг мис билан қопланган юзасидаги бу параметрнинг қиймати  $R_{\max} = 1,34$  нм га ошганлиги ва профиль ғадир-будирлиги  $R_z = 0,26$  нм га тенг эканлиги аниқланди.

12-расмда селенида кадмия ( $CdSe$ ) пленка билан қопланган монокристалл кремний намунасининг КРС спектри келтирилган, бу пленка вакуумли буғлатиш усули билан олинган. Ушбу спектрдан селенид кадмий пленканинг аморф фазалари  $\sim 180$   $cm^{-1}$  частотада ва кристаллик фазалари  $\sim 206$   $cm^{-1}$  частотада кузатиш мумкин, яъни бу пленка аморф-кристаллик тузилмасига эга.



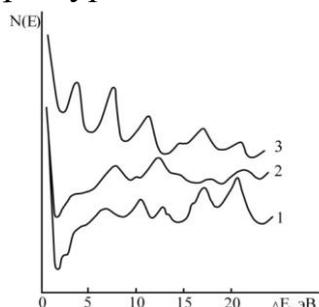
**12-расм.** Монокристалл кремний юзасида вакуумли буғлатиш усули билан қопланган ( $CdSe$ ) пленка намунасининг комбинацион тарқалиш спектри келтирилган.



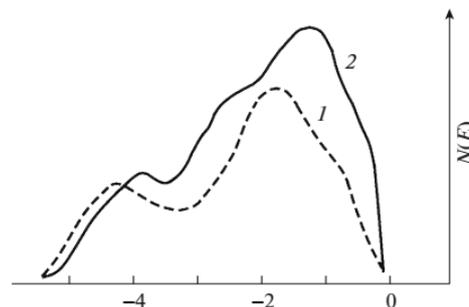
**13-расм.** Монокристалл Si таглик юзасига вакуумли буғлатиш усули била қопланган  $CdSe$  пленка  $800^{\circ}C$  ҳароратда қиздирилган намуна КРС спектри келтирилган.

13-расмда монокристаллик кремний таглик юзасига вакуумли буғлатиш усули билан кадмий селенид (CdSe) пленкаси қопланган намунасининг КРС спектри келтирилган бўлиб, бунда тадқиқ қилинаётган намуна 800°C хароратда қиздирилганида, пленка қопламасининг кристаллик тузилиши сезиларли даражада ортганлигини комбинацион тарқалиш спектрининг ўзгаришларга мувофиқ аниқланган.

**Тўртинчи боб “Фаол металл ионларини имплантация қилиш йўли билан эркин плёнкалар юзасини ўзгартириш ва ион бомбардимон қилиш ва кейинчалик қиздиришнинг эркин Cu наноплёнкалари ва қатламли Si–Cu тузилмаларининг таркиби, тузилиши, хусусиятлари ва тормозлаш қобилиятига таъсирини ўрганиш”** га бағишланган бўлиб, бу ишда илк бор энергияси 0,5 дан 10 кэВ гача бўлган Ва<sup>+</sup> ионларини имплантация қилиш ва сўнгра қиздиришнинг эркин Cu(100) плёнка юзасида ўстирилган Si наноплёнкаларининг таркиби, электрон ва кристалл тузилиши, ҳамда электрофизик хусусиятларига таъсири ўрганилган. Тадқиқот учун бир хил шароитда олинган қалинлиги 0, 50, 100 ва 400 Å бўлган Si наноплёнкаси асосида Cu(100) намуналари тайёрланган. Ушбу намуналар T = 750 K хароратда 2-3 соат давомида 10<sup>-6</sup> Па дан паст бўлмаган вакуум шароитида қиздирилган. 12-расмда соф Cu(100) плёнка ва 50 ва 400 Å қалинликдаги Si плёнкали Cu(100) учун бошланғич энергияси E<sub>p</sub>=300 эВ да олинган ЭХЭЙ спектрлари кўрсатилган.



**14-расм.** Эркин плёнкалар ЭХЭЙ спектрлари. 1 - Cu(100); 2 - Cu<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>/Cu и 3 – Si/Cu<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>/Cu. E<sub>p</sub> = 300 эВ.



**15-расм.** Кремний поликристал плёнкалар учун фотоэлектронлар спектрлари: 1 – қалин пленка, қалинлиги d≈1 мкм; 2 – эркин пленка, қалинлиги d≈400 Å. hv=10.8 эВ.

Ушбу олинган намуналар ўлчашдан олдин 30 дақиқа давомида T= 700 K да қиздирилган. Соф Cu(100) плёнкаси спектрида ΔE: 7,3; 10,3; 17,6 ва 21,6 эВ энергиясини йўқотган электронларнинг интенсив чўққилари аниқланди (14-расм, 1-чи эгри чизик). Ушбу спектрнинг тузилиши, шакли, интенсивлиги ва чўққиларининг сони массив Cu(100) плёнкалар спектрида келтирилган массив Cu(100) плёнкалар спектрининг тузилишидан сезиларли даражада фарқ қилиши аниқланди. Ушбу спектрнинг тузилиши, шакли, интенсивлиги ва энг юқори рақамлари массив Cu (100) плёнкалари учун спектр тузилишидан сезиларли даражада фарқ қилади. Бироқ, аксарият чўққиларнинг энергия ҳолати тахминан мос келади. Қалинлиги d =50 Å бўлган Si плёнкаси пуркалгандан сўнг, интердиффузия туфайли (700 K да) Cu(100) юзасида тахминан Cu<sub>2</sub>Si<sub>3</sub> таркибига эга поликристалли силицид плёнкаси ҳосил

бўлади. Бунда  $\Delta E=10,3$  эВ йўқотишда мис чўққисининг интенсивлиги кескин пасаяди ва Cu нинг бошқа чўққилари бутунлай йўқолиб, янги чўққилар пайдо бўлади (14-расм, 2-эгри чизик).  $d \geq 100$  Å да уч қаватли Si - Cu<sub>2</sub>Si<sub>3</sub> - Cu (100) система ҳосил бўлади.  $d \approx 300-400$  Å да ХЭЙ спектрида тўлиқ ўрнатилган «соф» Si чўққилари пайдо бўлади (14-расм, 3-эгри чизик).

ЭХЭЙ спектрларини ОЭС маълумотлари билан биргаликда таҳлил қилиш асосида биз плазмон жунбуши билан боғлиқ ЭХЭЙ спектридаги асосий чўққиларнинг энергия позицияларини аниқладик (1-жадвал). 1-жадвалдан кўриниб турибдики, мис, мис силицид ва кремнийнинг плазмон жунбушга келиш энергияси бир-биридан сезиларли даражада фарқ қилади ва уларнинг қийматлари массив Cu, Cu<sub>2</sub>Si<sub>3</sub> ва Si плёнкаларниқига яқин. Бироқ, Si массив плёнкалари спектрида қуйидаги чўққилар аниқланди: 3.3 эВ; 5.5 эВ; 6.7 эВ ва 9.7 эВ энергияли зона ўтишлари сабабли ва Si эркин плёнкасида фақат 3.6, 7.5 эВ энергияли 2 та чўққи аниқланди. Кўриниб турибдики, Si юпқа эркин плёнкалари валент зонасининг (шунингдек, ўтказувчанлик диапазонининг) электрон зичлиги қалин плёнкалардан сезиларли фарқ қилиши аниқланди.

#### 1-жадвал.

Плазма тебранишларининг кўзғалиши билан боғлиқ бўлган ЭХЭЙ спектридаги асосий чўққиларнинг энергия ҳолатлари

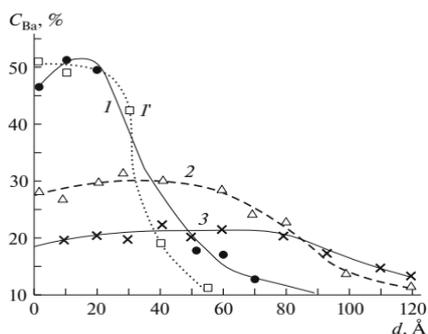
	$\hbar\omega_s$ , эВ	$\hbar\omega_v$ , эВ	$2\hbar\omega_s$ , эВ	$\hbar\omega_s+\hbar\omega_v$ , эВ	$2\hbar\omega_v$ , эВ
Cu(100)	7.0	10.8	14.5	17.5	21.2
Cu <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> , поликр.	8.5	12.6	17.5	21.8	-
Si, поликр.	10.4	17	21.3	28	-

15-расмда  $h\nu = 10,8$  эВ энергияда олинган массив ва эркин Cu плёнкаси учун фотоэлектронларнинг спектрлари кўрсатилган. Маълумки, бу спектрларнинг эгри чизиги ўрганилаётган объектнинг валент электрон ҳолатининг зичлигини яхши акс эттиради. Кўриниб турибдики, ушбу плёнкалар спектрининг кенглиги деярли бир хил, аммо уларнинг зичлиги сезиларли даражада фарқ қилади. Агар металллар ва ярим ўтказгичлар учун  $h\nu=10-15$  эВ энергия зонасида фотоэлектрон эмиссия чуқурлиги 60-80 Å эканлигини ҳисобга олсак, у ҳолда Si плёнкаси ҳолатининг зичлигига таъсирини эътиборсиз қолдириш мумкин. Бундан кўринадики, бу фарқ эркин Si плёнкасида массив плёнканинг сирт қатламларида боғланмаган Si ва O атомларининг концентрациясининг фарқи, шунингдек, ушбу плёнкаларнинг алоҳида қисмларининг кристалл панжараси параметрларининг идентификацияланмаганлиги билан боғлиқ.

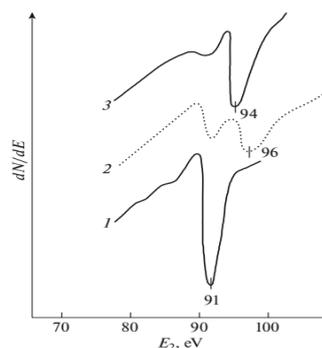
16-расмда  $E_0=0,5$ ; 3 ва 8 кэВ энергияга эга бўлган Ва<sup>+</sup> ионлари билан имплантация қилинган ва  $T=800$  К ҳароратда 2 соат давомида қиздирилган учта бир хил намуналар учун ( $d_{Si} \approx 400$  Å) Si/Cu(100) профилларда Ва нинг чуқурликлар бўйича концентрация тақсимооти кўрсатилган.

Кўриниб турибдики,  $E_0=0,5$ кэВ қиздирилгандан сўнг, сиртдаги Ва концентрацияси  $\sim 50$  ат.% ни ташкил қилади ва у амалда 20-25 Å чуқурликгача ўзгармайди. ОЭС таҳлили шуни кўрсатдики, бу ҳолда асосан ВаSi типидagi бирикма ҳосил бўлади.  $E_0=3$  кэВ энергияда қалинлиги  $d \approx 60-70$  Å бўлган Ва<sub>0,3</sub>Si<sub>0,7</sub> плёнка,  $E_0=8$  кэВ да қалинлиги  $d \approx 80-100$  Å бўлган Ва<sub>0,2</sub>Si<sub>0,8</sub> плёнка

ҳосил бўлади. Барча ҳолатларда сирт қатламлари боғланмаган Si атомларини ўз ичига олади ва BaSi/Si қатлам қалинлиги 50 ( $E_0 = 0,5$  кэВ) дан 120 Å ( $E_0 = 8$  кэВ) гача бўлган ўтиш қатлами ҳосил бўлади, бу ерда  $C_{Ba}$  маълум бир қийматдан нолгача камаяди. Таққослаш натижалари шуни кўрсатдики, юпқа эркин Si плёнкаси ҳолатида ўтиш қатламининг қалинлиги қалин Si плёнкасига қараганда сезиларли даражада каттароқдир (16-расм, 1'-эгри чизик). Шуни алоҳида таъкидлаш керакки, қалин Si плёнкаси бўлса, имплантациядан кейинги тавланиш  $T \approx 1300$  К гача амалга оширилиши мумкин. Бундай ҳолда, монокристалл стехиометрик BaSi<sub>2</sub> силитсиди ҳосил бўлди.



**16-расм.** Ba<sup>+</sup> ионлари билан имплантация қилинган ва  $T=800$  К да қиздирилган Si/Cu(100) чуқурлиги бўйича Ba<sup>\*</sup> атомларининг тарқалиш профиллари. Ион энергияси  $E_0$ , кэВ: 1, 1' – 0,5; 2 – 3; 3 – 8.



**17-расм.**  $E=90-100$  эВ энергия оралиғидаги Оже-спектрлар: 1 – Si; 2 – BaSi; 3 – BaSi<sub>2</sub>.

Эркин Si - Cu плёнка ҳолатида ҳароратнинг 900 К гача кўтарилиши Ba атомларининг Si - Cu тизимига ва Cu нинг Si га ўзародиффузиясининг кучайишига олиб келди. Ион-имплантация қилинган қатлам юзасига  $T \approx 950$  К ҳароратда Cu атомлари диффузиялана бошлайди. Ион энергияси  $E_0 \geq 5$  кэВ да Ba нинг Si - Cu<sub>2</sub> Si<sub>3</sub> га диффузияси аниқланди.

17-расмда қалинлиги 20-25 Å қалинликдаги BaSi плёнкали Si/Cu ҳамда қалинлиги 20-25 Å бўлган BaSi<sub>2</sub> плёнкали массив Si(111) тизимлари учун  $E=90-100$  эВ энергия оралиғида оже спектрлари (кремнийнинг L<sub>2,3</sub> VV оже чизиғи) кўрсатилган. Кўришиб турибдики, Si/Cu юзасида олинган BaSi плёнкаси спектрида  $E_2=91$  эВ и 96 эВ да 2 та чўққи бор. Биринчи чўққи Si га, иккинчи чўққи эса BaSi тегишли. Биз, асосан, биринчи чўққининг мавжудлигини BaSi юзасида боғланмаган (~5-10 ат.%) Si атомлари мавжудлиги билан изоҳладик. Афтидан,  $T \approx 800$  К қиздирилганда барча Si атомлари Ba атомлари билан кимёвий боғланишга киришмайди. Қалин Si плёнкаси 1200 К ҳароратда қиздирилиб Ba<sup>+</sup> ионлари билан имплантация қилингандан кейин, BaSi<sub>2</sub> плёнкаси ҳосил бўлади ва спектрада  $E=94$  эВ да янги чўққи пайдо бўлади. 2-жадвалда эркин ва қалин Si плёнкаси юзасида яратилган юпқа силицид плёнкасининг энергетик сатҳи параметрлари, тури ва кристалл панжара параметрлари кўрсатилган.

#### 2-жадвал

Қиздириш билан биргаликда ион имплантацияси қилиш натижасида эркин ва қалин Si плёнкаси юзасида Ba Si силицид наноплёнкаларининг энергетик сатҳи ва кристалл панжарасининг параметрлари келтирилган.

Плётка типи Si	Ba <sup>+</sup> →Si	T <sub>квзд.</sub> в К	Сирт таркиби	E <sub>g</sub> , эВ	χ, эВ	Кристалл структураси	
						Тип	a, Å
Эркин. плётка d <sub>Si</sub> =400 Å	E <sub>0</sub> =1кэВ D=6·10 <sup>16</sup> см <sup>-2</sup>	800	Ba <sub>0,5</sub> Si <sub>0,5</sub> +Si	0,3	3,6	поликр.	-
Массив плётка d <sub>Si</sub> ≈1000 нм	E <sub>0</sub> =1кэВ D=6·10 <sup>16</sup> см <sup>-2</sup>	800	BaSi+Si	0,4	-	поликр.	-
		1100	BaSi <sub>2</sub>	0,6	4,2	кубик.	5,9

Жадвалдан кўришиб турибдики, BaSi плёткасида маълум миқдорда боғланмаган Si атомларининг мавжудлиги силициднинг тақиқланган зонаси кенглиги 0,3-0,4 эВ гача камайишига олиб келади.

Олинган экспериментал натижалар шуни кўрсатдики, эркин Si/Cu тизимига Ba<sup>+</sup> ионларини имплантация қилиш билан бирга қиздириш орқали яхши стехиометрияга эга булган бир жинсли BaSi типигаги наноплёткаларни олиш имконини бермайди. Хусусан, BaSi плёткаси 10 ат.% боғланмаган Si атомларини ўз ичига олади ва тақиқланган зонаси E<sub>g</sub> кенглигининг қиймати 0,3 эВ ни ташкил қилади. Яхши стехиометрияга эга бўлган BaSi<sub>2</sub> монокристалл плёткаси учун тақиқланган зона кенглиги E<sub>g</sub> қиймати ~0,6 эВ ни ташкил қилади.



**18-расм.** Мис ионлари билан бомбардимон қилинган Si намунаси юзаси майдонининг тасвири.

КРС усули орқали кремнийнинг кристаллик решетка микроскопик тузилиши ва унинг динамик хусусиятлари турли имплантация ва лазерли отжиг режимларида тадқиқ қилинди (18-расм). Олинган КРС спектрларидан имплантация дозаси ва лазер нурланиш энергияси оширилганида намуна юзасида ~100 нм қалинликдаги Cu ва Si атомларининг қатлами ҳосил бўлганлиги кузатилди.

Si–Cu плёткаларининг хоссаларини назарий ўрганиш. Ba<sup>+</sup> ва Cs<sup>+</sup> каби фаол металл ионларини ҳар хил энергия ва дозаларда имплантация қилинганда Si–Cu намунанинг Ba<sup>+</sup> ва Cs<sup>+</sup> ионларни тормозлаши ҳисоблаб чиқилган. Ионларнинг тўхташ кучи, маълум бир θ бурчаги бўйлаб сочилишида, намунага кириб боришида ионларнинг энергияларини йўқотиши тушунилади ва қуйидаги формула билан аниқланади:

$$dE/dx = n(S_n + S_e) \quad (4)$$

бу ерда  $dE/dx$  - намунанинг тормозлаш қобилияти,  $x$  - ионларнинг кириб бориш чуқурлиги,  $n$  - нишондаги атомлар концентрацияси, Si–Cu намунанинг  $S_n$  ядро ва  $S_e$  электронларининг мос равишда тўхтатувчи кучлари. θ бурчак остида

тушаётган  $S_n$  ионнинг энергия йўқотилишини ҳисоблаш қуйидагича ифодаланади:

$$E_1 = 2Em_1m_2/(m_1+m_2)^2 \cdot (1-\cos\theta) \quad (5)$$

бундан,  $90^\circ$  бурчак остида тушаётган ионнинг максимал энергия йўқотиши қуйидагича аниқланади:

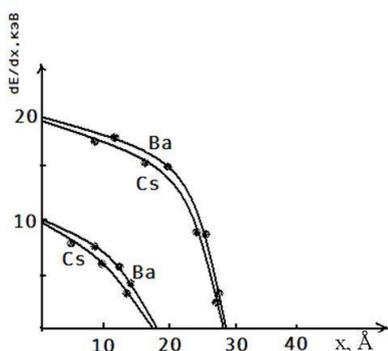
$$E_1 = 4Em_1m_2/(m_1+m_2)^2 \quad (6)$$

Эластик қайтган  $S_e$  нинг ион энергиясини йўқотишларни ҳисоблаш қуйидаги формула бўйича аниқланди:

бу ерда  $k$  - кинематик коэффициент,  $E_0$  - ионларнинг бошланғич энергияси.

$$k \approx \frac{0.08Z_1^{2/3}Z_2^{1/2}}{(Z_1^{2/3}+Z_2^{2/3})^{3/4}} \cdot \frac{(m_1+m_2)^{3/2}}{m_1^{3/2}m_2^{3/2}} \quad (7)$$

Si-Cu структурада  $Ba^+$  ва  $Cs^+$  ионларининг энергия йўқотишларини (4) формуладан фойдаланиб, (5) ва (6) формулаларда ва  $k$ - кинематик коэффициентини (7) ҳисоблашларда қуйидаги доимий қийматлардан фойдаланилади:  $Z_1 = 55(Cs)$ ,  $Z_2 = 56(Ba)$ ,  $m_1 = 133(Cs)$  ва  $137(Ba)$ ,  $m_2 = 28(Cu)$ , 155 диамед ( $Cu_2Si$ ), 218 триамед, ( $Cu_3Si$ )  $Cu_m = 63,5$ .



19-расм. Si-Cu нинг  $Ba^+$  ва  $Cs^+$  ионлари учун тормозлаш қобилияти.

## ХУЛОСА

Диссертациянинг асосий натижалари қуйидагилардан иборат:

1. Si нинг моно- ва поликристаллари юзасига магнетрон чанглатиш усули ёрдамида  $TiO_2$  титан оксидининг наноплёнкалари олинди. Титан оксиди  $TiO_2$  плёнкаларининг рентген фазали таҳлили ёрдамида Миллер индекслари ва панжара параметрлари аниқланди.

2. Дастлабки ва қиздирилган  $TiO_2$  ни таҳлил қилиш натижасида  $TiO_2$  атомлари орасидаги масофа ҳароратга қараб ўзгариши,  $TiO_2$  нинг кристалланиш даражаси эса ортиши аниқланди (Дебай-Шеррера формуласидан фойдаланган ҳолда ҳисоблаш амалга оширилди).  $TiO_2$  намуналарининг кристаллик ва аморфлик даражаси бунда: аморф фаза - 81% ва кристаллик фаза - 19% ташкил этиши аниқланди

3. CdSe намунасининг  $800^\circ C$  ҳароратда қиздирилгандан сўнг аморф фазанинг сезиларли пасайишига олиб келиши ва у 17% ни ташкил этиши аниқланди.

4. Магнетрон чанглатиш усули ёрдамида кремний поликристалида паст қаршиликка эга, қалинлиги 3,0 - 3,5 мкм бўлган юпқа мис қатламли контакт ҳосил қилинди. Бунда, кремний сиртининг тузилиши ва морфологияси ўзгармайди ҳамда юзаси текисланган (силлик) рельефга эга бўлгани учун ток оқимини йўқотишларини камайтиради ва шунга мос равишда уларнинг самарадорлигини ошириши аниқланди.

5. Энергиясини характерли йўқотган электронлар спектроскопияси ва эластик қайтган электрон спектроскопияси усулларида  $\text{Cu}_2\text{Si}_3$  ва Si нинг қалин ва эркин юпқа плёнкаларнинг валент электронлари ҳолат зичлиги бир-биридан сезиларли даражада фарқ қилиши, Si нинг қалин ва эркин юпқа плёнкаларнинг кристалл панжаралари тузилишига боғлиқ эканлиги аниқланди.

6.  $\text{Ba}^+$  ионларининг кремнийга имплантация қилиниши ва сўнгра қиздирилиши натижасида  $\text{BaSi}$  типдаги наноплёнкалари ҳосил бўлиши ҳамда боғланмаган Si атомларининг маълум миқдорда борлиги аниқланди. Кремний қалинлиги  $d \leq 400 \text{ \AA}$  бўлган эркин Cu -Si плёнкаларига фаол металл ионларини имплантация қилишда қуйидаги шартлар қўлланилиши аниқланди: ион энергияси  $E_0 = 4-5 \text{ кэВ}$  дан кам бўлиши шарт ҳамда имплантациядан кейинги қиздириш  $T \leq 800 \text{ К}$  да амалга оширилиши кераклиги аниқланди.

7.  $\text{Cs}^+$  ионларини қиздириш билан биргаликда имплантация қилишга асосланган Si сиртини тозалашнинг самарали усули таклиф қилинди, ҳамда  $\text{Cs}^+$  атомлари юқори фаоллиги туфайли кислород ва углерод атомлари билан кимёвий боғ ҳосил қилиши ва қиздирилгандан сўнг  $\text{Cs}+\text{O}$ ,  $\text{Cs}+\text{C}$  шаклида буғланиши аниқланди.

8.  $\text{Ba}^+$  ва  $\text{Cs}^+$  ионлари учун Si-Cu тизимининг тормозлаш қобилияти деярли бир хил эканлиги ва Si-Cu контакт қатламига яқинлашганда энергия йўқотишлари сезиларли даражада ортиши аниқланди. Ҳисоблашлар натижасида контакт қатламида триамис ва диамис кремний контцентрациясининг ошиши билан имплантация қилинган ионларнинг энергия йўқотилиши кескин ортганлиги аниқланди.

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

---

**ИНСТИТУТ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**КОСИМОВ ИСРОИЛ ОДИНАЕВИЧ**

**ЭЛЕКТРОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК Cu, CdSe,  
TiO<sub>2</sub> СОЗДАНЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ**

**01.04.04- Физическая электроника**

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

**Ташкент – 2025**

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшая аттестационная комиссия при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за № B2022.3.PhD/FM765.

Диссертация выполнена в Институте ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А. Арифова.

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

Научный руководитель:	Исаханов Зинаобидин Абилпейзевич доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Максимов Сергей Евлантиевич доктор физико-математических наук, с.н.с. Ахроров Субхан Курбонович кандидат физико-математических наук, доцент
Ведущая организация:	Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова

Защита диссертации состоится «11» февраль 2025 г. в 16<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 по присуждению ученых степеней при Институте ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз (адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 33. Тел./Факс: (99871) 262-32-54, e-mail: [info@iplt.uz](mailto:info@iplt.uz)).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ионно-плазменных и лазерных технологий (зарегистрирована за № 4). Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 33. Тел.: (99871) 262-31-69).

Автореферат диссертации разослан «30» январь 2025 года.

(Реестр протокола рассылки 4 от «30» январь 2025 года).



**Х.Ш.Ашуров**  
председатель Научного  
совета по присуждению учёных  
степеней, д.т.н., профессор

**И.Д.Ядгаров**  
учёный секретарь Научного  
совета по присуждению ученых  
степеней, д.ф-м.н., профессор

**У.К. Махманов**  
председатель Научного  
семинара при Научном совете по  
присуждению ученых степеней,  
д.ф-м.н., профессор

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** Полупроводниковые материалы, в частности, пленки Si-Cu, TiO<sub>2</sub>, CdSe и гетеросистемы на их основе, широко используются в производстве различных типов фотоприемников, сенсоров, излучающих резонаторов, лазеров, солнечных элементов и имеют перспективы своего развития в современных опто - и нанoeлектронных устройствах. В связи с этим в последние годы интенсивно исследуются состав, структура и свойства поверхности тонких пленок и массивных образцов, а также влияние на них магнетронного распыления и ионной бомбардировки.

В технологии интегральных схем сохранение тенденции к сокращению размеров является востребованной задачей. В этом плане хорошо себя зарекомендовала медь с ее низким электрическим сопротивлением и превосходной устойчивостью к образованию пустот и электромиграции. Взаимная диффузия между Cu и Si изучалась с использованием объемных диффузионных пар. До настоящего времени было опубликовано мало работ, по соединению Cu с Si и исследованию диффузии меди в кремний с образованием тонкопленочной структуры. Изменение морфологии поверхности, исследование фазовых параметров и разработка оптимальных методов при осаждении слоя на поверхность кремниевой подложки является одной из актуальных задач современной электроники.

Данное диссертационное исследование в определенной степени соответствует задачам, предусмотренных Указом Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 года<sup>1</sup>, Постановлениями Президента Республики Узбекистан № ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организаций, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года и № ПП- 4422 «Об ускоренных мерах по повышению энергоэффективности отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии» от 22 августа 2019 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в Республике за последние годы в данной сфере.

**Соответствие исследования с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике.** Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике: II – «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение, развитие и использование возобновляемых источников энергии».

**Степень изученности проблемы.** Перспективы создания новых приборов твердотельной электроники во многом определяются синтезом тонкопленочных многослойных гетероструктур с заданными физическими свойствами. При этом особый интерес представляет граница раздела “нанофаза–матрица”, “нанослой–подложка”, которые обладают уникальными,

присущими только им физико – химическими свойствами. В связи с этим, изучению состава, структуры и свойств указанных систем в последнее годы посвящено большое число работ. Demczyk B.G. et al. методом ДБЭО исследован рост Cu на Si(100) при комнатной температуре. Эти исследования подтверждают, что межфазная область силицида Cu помогает эпитаксиальному росту Cu на Si(100) за счет согласования решеток.

Krastev E.T., Voice L.D., Tobin R.G. показали, что зависимость электрической проводимости медных островков подразумевает высокий уровень поверхностного, межфазного или зернограничного рассеяния, характеризующийся почти нулевым параметром кажущейся зеркальности ( $r$ ). Schaefer S. et al. Исследовали методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) рост тонких пленок CdSe, почти согласованных по решетке с ориентированными подложками InAs(100). Результаты показали, что кристаллическая фаза CdSe и морфология тонких пленок очень чувствительны к температуре роста, соотношению потоков Cd/Se и подготовке полярной (111) поверхности. Sadowski J., Domagała J.Z., Zajkowska W., Kret S. et al. использовали моделирование молекулярной динамики с использованием метода модифицированных внедренных атомов для изучения осаждения и отжига атомов Cu на подложку Si(001). Показано, что после процесса отжига структура пленки существенно изменяется от аморфного состояния до кристаллической структуры. Olea J. и др. для получения перенасыщенного TiSi впервые использовали процессы микроволнового отжига. Высокие дозы Ti были ионно имплантированы на подложки Si, а затем обработаны микроволновым отжигом для перекристаллизации аморфного слоя. Полученные слои были монокристаллическими с высокой плотностью дефектов. Stachura R. и др. методом рентгеновской рефлектометрии на основе синхротронного излучения определили морфологию немодифицированных и облученных низкоэнергетическими высокозаряженными ионами  $He^+$  нанослоев  $TiO_2$ , плотность, толщину и шероховатость нанослоев  $TiO_2$ . Результаты показали, что плотность нанослоев намного ниже плотности объема  $TiO_2$  из-за их нанометровой толщины. Ими также были исследованы влияние гамма-облучения, на тонкую пленку диоксида титана ( $TiO_2$ ), нанесенную на кремний р-типа (Si) и пористого кремния (PSi) и выявлены изменения структурных, оптических и электрических свойств из-за гамма-облучения, которые различаются по гетеропереходу на кремнии и текстуре пористого кремния. Б.Е. Умирзаковым, М.Т. Нормурадовым и их учениками впервые, методом низкоэнергетической ионной имплантации, были получены нанопленки, нанофазы на поверхности, наноразмерные кристаллы и слои на различных глубинах полупроводников и изучены механизмы их формирования.

**Связь темы диссертации с исследованиями научно – исследовательской организации, где выполнена диссертационная работа.** Диссертационная работа была выполнена по плану научно-исследовательских работ Института ионно-плазменных и лазерных технологий в рамках следующих проектов: ОТ-ФЗ-13 «Механизмы формирования свободных

многослойных нанопленочных структур кремний–силицид–металл и изучение их электронной и кристаллической структуры» (2017–2020) и Ф-ФА-2021-509 «Механизмы формирования многокомпонентных наноструктур на поверхности неорганических (Ti, W, WO<sub>x</sub>, TiO<sub>2</sub>, Si, SiO<sub>2</sub>) и органических (полимеры) материалов при имплантации ионами металлов и адсорбции молекулами активных органических соединений»

**Целью** настоящей диссертационной работы является изучение закономерностей формирования наноразмерных структур TiO<sub>2</sub>, CdSe и Cu на поверхности кремния и их влияния на состав, электронную и кристаллическую структуру и свойства кремния.

**Задачи исследования:**

- получение нанопленок TiO<sub>2</sub> на поверхности моно- и поликристаллов кремния методом магнетронного распыления;
- изучение степени кристалличности пленок CdSe, осажденных на поверхности Si, методом комбинационного рассеяния света;
- создание низкоомных контактов на поверхности Si;
- модификация свойств поверхности свободных пленочных систем Si/Cu имплантацией ионами активных металлов;
- изучение влияние ионной бомбардировки на состав и свойства Si, имплантированного ионами Cu;
- теоретическое исследование тормозной способности нанопленок Cu-Si.

**Объектами исследования являются** поликристаллические пленки Cu, TiO<sub>2</sub>, CdSe, поли- и монокристаллические образцы Cu/Si TiO<sub>2</sub>/Si(111) и CdSe/Si.

**Предметом исследования являются** электронная структура и физические механизмы формирования наноразмерных структур на поверхности и в приповерхностной области образцов Cu/Si TiO<sub>2</sub>/Si и CdSe/Si.

**Методы исследования:** Оже–электронная спектроскопия, ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия, спектроскопия характеристических потерь энергии электронами, дифракция быстрых электронов, растровая электронная микроскопия, атомно–силовая микроскопия, сканирующая электронная микроскопия, порошковый рентгенофазовый анализ, комбинационное рассеяние света.

**Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:**

- впервые на поверхности Si(111) получены пленки TiO<sub>2</sub> разной толщины в состоянии анатаза и определены индексы Миллера и параметры решетки. После нагрева, в течении 1 часа, при температуре 900<sup>0</sup> С TiO<sub>2</sub> из фазы анатаза переходил в фазу рутила. Показано, что в составе пленки содержится микро и наночастицы состоящие из соединения типа TiO<sub>x</sub>, TiO<sub>x</sub>C<sub>y</sub>, и определена степень кристалличности TiO<sub>2</sub>: кристаллическая часть 19 %, аморфная часть– 81 %.

- методом комбинационного рассеяния света (КРС) изучено изменение степени аморфности и кристалличности пленок CdSe, при прогреве от комнатной температуры до 800<sup>0</sup>С. Обнаружено, что при этом доля аморфной

фазы в структуре селенида кадмия уменьшается на 17%. Полученные результаты представляют существенный интерес для исследований в области микроэлектроники, дефектообразования, а также при создании материалов для оптоэлектроники и нанoeлектронике;

- получены тонкие низкоомные контактные слои меди на поверхности кремния, при этом структура и морфология поверхности кремния не изменяются, а нанесенный слой меди является тонким, со сглаженным рельефом (менее шероховатым), что позволит на поверхности кремниевых фотоэлементов уменьшить токовые потери и, соответственно, повысить их эффективность;

- показано, что плотности состояния валентных электронов толстой и свободной тонкой пленок заметно отличаются друг от друга. Показано, что имплантация ионов  $Ba^+$  и последующий отжиг способствуют получению нанопленки типа  $BaSi$  с некоторым избытком несвязанных атомов  $Si$ . Установлено, что при имплантации ионов активных металлов в свободные пленки  $Si-Cu$  с толщиной кремния  $d \leq 400 \text{ \AA}$  имеются следующие ограничения: энергия ионов  $E_0$  должна быть меньше 4–5 keV; постимплантационный отжиг необходимо проводить при  $T \leq 800 \text{ K}$ . Пленки  $BaSi$  имеют поликристаллическую структуру с некоторым избытком атомов  $Si$ .

- впервые методами ВИМС и ОЭС изучены изменения элементного и химического состава меди при очистке температурным прогревом и имплантацией ионов цезия в сочетании с отжигом. Установлено, что из-за высокой активности атомов  $Cs$  при ионной бомбардировке образуется химической связь с атомами кислорода и углерода, а после прогрева испаряется в виде  $Cs+O$  и  $Cs+C$ . Следовательно, поверхность меди максимально очищается от примесных атомов;

- теоретические исследования тормозной способности нанопленки  $Cu-Si$  при бомбардировке ионами  $Ba^+$  и  $Cs^+$  показали, что потери энергии сильно увеличиваются с приближением контактного слою  $Si-Cu$ . При расчете определено, что с увеличением концентрации триамеди и диамеди силиция в контактном слое, потери энергии имплантированных ионов резко возрастают. Это может быть объяснено как следствие диффузии ионов кремния в медь и меди в кремнии, приводящей к увеличению рассеивающих центров.

**Практические результаты** исследования заключается в следующем:

- разработан метод нанесения контактного слоя меди на поверхность кремния с помощью метода магнетронного напыления, после механической обработки и его очистки с помощью тлеющего разряда, позволяющий получить слой меди с равномерной толщиной и высокой адгезией к поверхности. Получен на поверхности  $Si$  тонкий слой (3–3,5 мкм) омического контакта меди. При этом структура и морфология поверхности  $Si$  не изменяется.

- установлен режим очистки поверхности меди имплантацией ионов активных металлов с последующим отжигом при  $T \approx 1000 \text{ K}$ , после прогрева меди до  $T \approx 1200 \text{ K}$  в течение определенного времени.

- показано, что имплантация ионов  $Ba^{+}$  и последующий отжиг способствуют получению нанопленки типа  $BaSi$  с некоторым избытком несвязанных атомов  $Si$ .

**Достоверность полученных результатов** исследований подтверждается использованием современных научных и экспериментальных методов, необходимой статистикой экспериментов, применением комплекса независимых методик для измерения и обработки данных, а также соответствием полученных результатов актуальным теоретическим представлениям.

#### **Научная и практическая значимость.**

**Научная значимость:** полученные в работе экспериментальные результаты позволяют выявить основные механизмы формирования наноразмерных структур на поверхности и в приповерхностных слоях бинарных полупроводников при бомбардировке ионами инертных газов и активных металлов в сочетании с отжигом и имеют особое значение для развития теории материалов с пониженной размерностью.

**Практическая значимость:** заключается в том, что предложенные технологии получения наноразмерных структур с заданными физическими свойствами, разработка нанесения контактного слоя меди на поверхность материалов имеют перспективы при разработке новых приборов микро, нано- и оптоэлектроники.

**Внедрение результатов.** К статье в диссертационной работе: Исаханов З.А., Косимов И.О., Умирзаков Б.Е. и Еркулов Р.М. (2020) «Модификация поверхностных свойств свободных пленок  $Si-Cu$  имплантацией ионов активных металлов». Техническая физика, 65(1), 114–117. DOI: 10.1134/S1063784220010090, в научной базе данных Scopus было сделано 3 ссылки:

1. Sharopov U. B. et al. Comparison of electron irradiation on the formation of surface defects in situ and post thin-film  $LiF/Si(111)$  deposition //Thin Solid Films. – 2021. – Т. 735. – С. 138902. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.138902>

2. Theodosiou A. et al. Formation of cesium carbonate in ion-implanted graphite, examined with dual-source x-ray photoelectron spectroscopy, density functional theory calculations and thermodynamic modelling //Carbon. – 2022. – Т. 197. – С. 226-237. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.06.034>

3. Бернацкий Д. П., Павлов В. Г. Полевая десорбция цезия и бария с нанокластеров графена на поверхности иридия. Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2023. – Вып. 15 С. 40-44

4. Sharopov, U.B., Kaur, K., Kurbanov, M.K. et al. Controlling the Low-temperature Ionic Purification of a Silicon Surface by Electron Spectroscopy. Silicon 14, 4661–4667 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01268-0>

Следующие результаты диссертационной работы:

-создан омический контакт к кремниевому поликристаллу путем нанесения тонкого слоя меди толщиной 3,0 – 3,5 мкм методом магнетронного ионного распыления, что обеспечивает низкоомное электрическое

сопротивление контакта Cu – Si. При этом структура и морфология поверхности кремния не изменяются, а нанесенный слой меди является тонким, со сглаженным рельефом (менее шероховатым), уменьшает токовых потерь и, соответственно, повышает их эффективности.

-с помощью метода комбинационного рассеяния света, изучено изменение степени аморфности и кристалличности пленок CdSe при нагревании от комнатной температуры до 800<sup>0</sup>C. Установлено, что доля аморфной фазы в составе кадмий-селена снижается до 17%. Полученные результаты представляют большой интерес для исследований в области микроэлектроники, дефектообразования, а также создания материалов для опто- и нанoeлектроники.

Данные результаты были внедрены и использованы в АО «ФОТОН» при создании устройств микроэлектроники. Использование научных результатов позволило создать в АО «ФОТОН» полупроводниковые приборы с термически стабильными параметрами и снизить себестоимость выпускаемой продукции и рентабельность аналогичных устройств с такими же параметрами (заместитель директора АО «Фотон» «Использование в опытном образце для выращивания комбинированного слоя на поверхности изделий» по результатам научного исследования от № 236., 12.06.2023).

**Апробация результатов исследования.** Результаты данного исследования были представлены и обсуждены на 14 международных и 8 республиканских научно-практических конференциях.

**Опубликованность результатов исследований.** По материалам диссертации опубликовано 7 научных трудов, из них 2 статьи в зарубежных реферируемых журналах, 5 статей в местных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией РУз, и 22 работы в сборниках трудов научных конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списков опубликованных работ и использованной литературы. Работа содержит 134 страниц машинописного текста, включая 54 рисунка и 5 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** обоснованы актуальность и востребованность исследований по темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи диссертации, определены объекты, предметы и методы исследований, а также связь диссертационных исследований с приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике. Изложена научная новизна исследований, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены данные о внедрении результатов, их апробации, а также сведения об объёме и структуре диссертации.

**В первой главе диссертации «Литературный обзор по влиянию технических обработок на электронные и оптические свойства бинарных**

**полупроводников»** приводится обзор современных литературных данных. Результаты анализа экспериментов показывают, что в настоящее время большое внимание уделяется изучению следующих вопросов: получение различных тонких слоев; исследование структуры слоев; физические и химические свойства оксидных материалов, используемых для катализаторов; морфология пленочных и порошковых материалов. Это связано с перспективами науки и техники получения сверхчистых металлических контактов, использования технологий имплантации и получения различных покрытий.

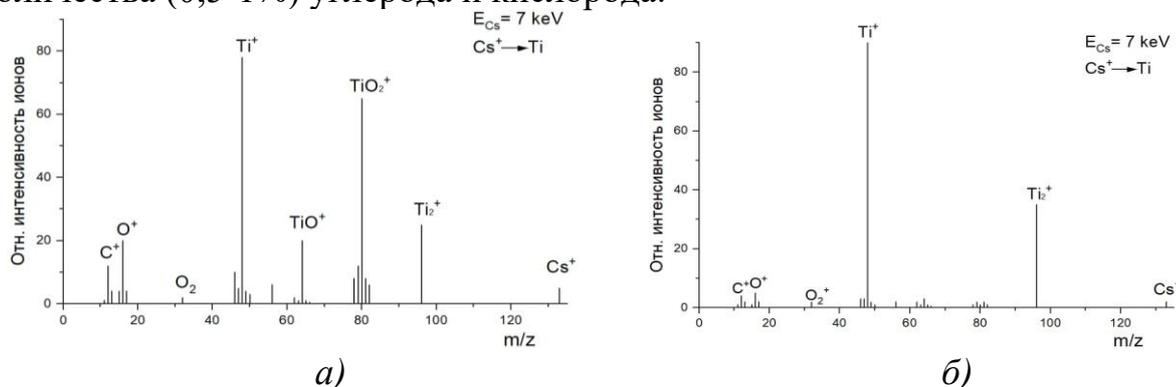
На основе анализа было показано, что морфология кристаллов  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CdSe}$  и морфология омических контактов  $\text{Si}/\text{Cu}$  недостаточно изучены. Эти мало изученные проблемы послужили основой для определения целей и реализации задач диссертационной работы.

**Вторая глава «Методы исследования»** посвящена описанию эксперимента и методам исследования по изучению и спектроскопическому анализу  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CdSe}$ ,  $\text{Cu}/\text{Si}$  и  $\text{Si}/\text{Cu}$ . Основные эксперименты проводились на вакуумных установках, разработанных и изготовленных в лаборатории «Адсорбционных и эмиссионных явлений» Института ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А.Арифова АН РУз. Для выполнения поставленных в работе задач была проведена модификация поверхности тонких пленок  $\text{Cu}$ ,  $\text{TiO}_2$  и  $\text{CdSe}$  на кремниевой подложке, а также свободных плёнок  $\text{Si}/\text{Cu}$ , и изучены их физические свойства в условиях вакуума методами ВИМС и ОЭС. Метод ОЭС использован для определения элементного и химического состава поверхности ионно-имплантированных образцов, а также профилей распределения примесей и их процентного содержания в изучаемых материалах. Значения энергии характеристических потерь энергии электронов (ХПЭЭ), играет исключительно важную роль, так как эти энергии служат для определения электронной структуры и других свойств твердых тел, как в объеме, а также на поверхностных слоях. Полученные результаты анализировались с помощью атомно-силового микроскопа АСМ, дифрактометра XRD-6100 Shimadzu, комбинационного рассеяния света КР и СЭМ микроскопа. Эти методы в совокупности позволили обеспечить: исследование шероховатости обработанной поверхности образца; его приповерхностной твердости; анализ структурных изменений на поверхности материала после температурного воздействия, проведение оценки элементов на поверхности образца.

**В третьей главе исследованы «Влияние режимов получения на кристалличность и морфологию  $\text{Cu}/\text{Si}$ ,  $\text{TiO}_2$  и  $\text{CdSe}$  пленок».** В ходе исследования были изучены характеристики исходных образцов порошка и кристаллов оксида титана до и после нагрева. Анализ проводился с целью определить степень аморфности, кристалличности порошка и пленок, а также размеры порошка оксида титана в порошкообразном состоянии и расстояния между атомами.

Сначала были изучены состав хорошо очищенных поверхностей исследуемых образцов. В качестве примера на рисунке 1 (а, б) приведены

масс-спектры Ti до и после обезгаживания в условиях сверхвысокого вакуума ( $P \approx 10^{-7}$  Па). Титан очищался при  $T \approx 1600$  К в течение 20-25 часов. Масс-спектры сняты бомбардировкой поверхности Ti ионами  $\text{Cs}^+$  с энергией  $E_0 = 7$  кэВ. На поверхности Ti после очистки обнаружено содержание очень малого количества (0,5-1%) углерода и кислорода.



**Рис. 1.** Масс- спектрограмма образца поликристаллического Ti: до (а) и после (б) обезгаживания. Энергия ионов  $E_0 = 7$  кэВ.

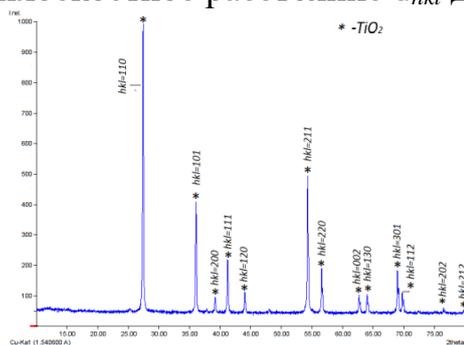
В последние годы объектами пристального внимания исследователей являются сенсорные, адсорбционные, оптические, электрические и каталитические свойства  $\text{TiO}_2$ . Диоксид титана широко исследуется благодаря своей высокой фотокаталитической активности, которая может найти потенциальное применение для фотоиндуцированного очищения от вредных органических сложных соединений в воздухе и в воде. Разработка фотокатализаторов на его основе в настоящее время является перспективным направлением, поскольку  $\text{TiO}_2$  — недорогой, химически стойкий материал. Особый интерес представляет синтез диоксида титана в тонкопленочном состоянии. Основным недостатком  $\text{TiO}_2$  для оптики и фотокатализа является его активность под действием только ближнего ультрафиолетового (УФ) излучения, которое составляет лишь 5–8% от всего солнечного спектра, достигающего поверхности Земли.

Нами были исследованы плёночные структуры диоксида титана, полученные на поверхности Si методом магнетронного напыления Ti с последующим окислением при напуске кислорода. Толщины плёнок составляли 250-300 нм.

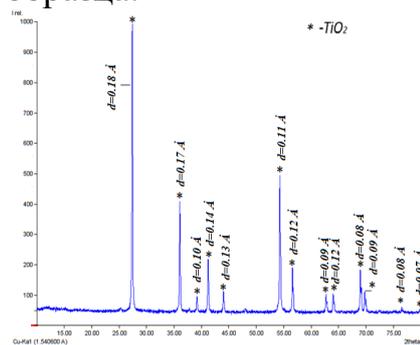
Рентгенофазовый анализ состава порошкового титана показал, что исходный материал содержит не только преобладающую гексагональную  $\alpha$ -фазу металлического титана, но также и фазу кислорода, азота и углерода в виде твёрдого раствора в  $\alpha$ -титане (эта фаза называется макрофазой), а также нестехиометрические фазы внедрения  $\text{TiXZ}$ ,  $\text{TiXYN}$ , где  $\{X, Y\} = \{O, C, N\}$ . Последние присутствуют в порошковом материале в незначительном количестве в форме микро- и, возможно, нанofазы, и далее обозначены как микро- и нанofазы.

С помощью рентгенофазового анализа (XRD) были выявлены различные пики в спектре образцов диоксида титана  $\text{TiO}_2$ . На рис.2-3 представлены спектральные зависимости  $\text{TiO}_2$  полученная методом порошкового

дифрактометра. Кроме того, приведены индексы Миллера, а также межплоскостное расстояние  $d_{hkl}$  для данного образца.

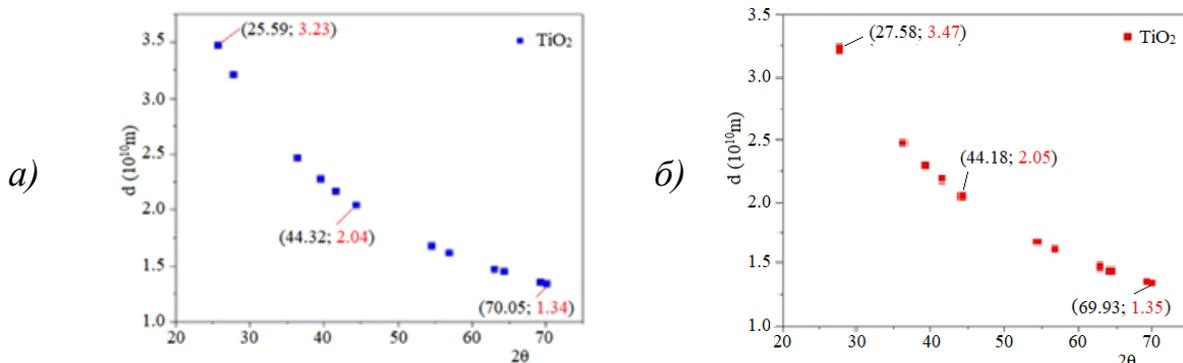


**Рис.2.** Спектральная зависимость  $\text{TiO}_2$  полученная методом порошкового дифрактометра. Приведены индексы Миллера.

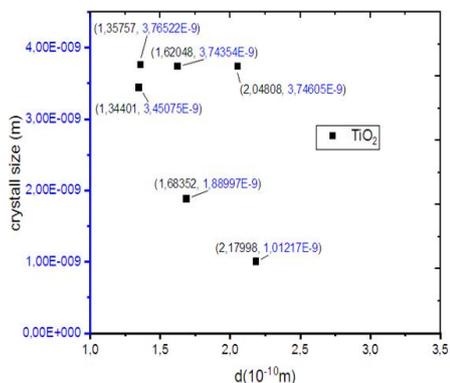


**Рис.3** Спектральная зависимость  $\text{TiO}_2$  полученная методом порошкового дифрактометра. Приведено межплоскостное расстояние  $d_{hkl}$  для данного образца.

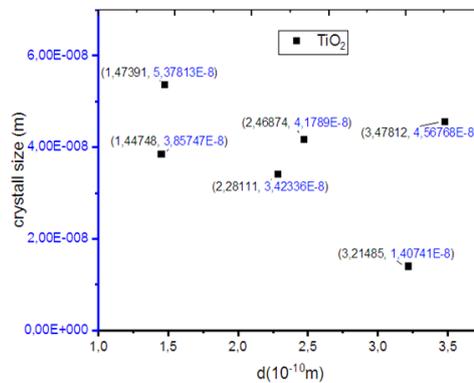
Результаты, полученные для образцов  $\text{TiO}_2$  (исходный и отожженный) (XRD-6100) сравнивали с литературными данными, и была обнаружена хорошая согласованность с полученными результатами. Как видно из рис.4. интенсивность пика показывает, что сильный дифракционный максимум пика при  $2\theta=27,58^\circ$  относится к фазе анатаза с наивысшими интенсивностями для  $\text{TiO}_2$ . Пики  $2\theta=36,31^\circ$  и  $2\theta=69,08^\circ$  относятся к пикам с наименьшими интенсивностями, которые наблюдались для перехода данного материала из анатазы в рутил.



**Рис.4.** Расстояние между атомами в образце  $\text{TiO}_2$  до и после нагрева  $900^\circ\text{C}$ .



**Рис.5.** Размеры кристаллов до нагревания  $\text{TiO}_2$  для межплоскостного расстояния  $d$ -от 1.35 до 2.17 $\text{\AA}$ .



**Рис.6.** График зависимости размера кристалла  $\text{TiO}_2$  от межплоскостного расстояния ( $d$ ) после нагрева.

Определены индексы Миллера (110, 101, 200, 111, 120, 211, 220, 002, 130, 301, 112, 202, 212) для различных пиков.  $d_{hkl}$  межплоскостное расстояние различных плоскостей  $TiO_2$  для исходного и отожженного образцов (рис. 4 и 5). Данные, измеренные методом порошковой дифрактометрии (XRD-6100) показали, что на многоатомных ячейках  $TiO_2$ , происходит изменение в зависимости от температуры. На рис.5 приведено межплоскостное расстояние между атомами в  $TiO_2$ :  $d_{hkl}=3,478\text{\AA}$  для угла  $2\theta=25.59^\circ$ ;  $d_{hkl}=2,042\text{\AA}$  для угла  $2\theta=44.32$ ;  $d_{hkl}=1,342\text{\AA}$  для угла  $2\theta=70.05^\circ$  соответственно.

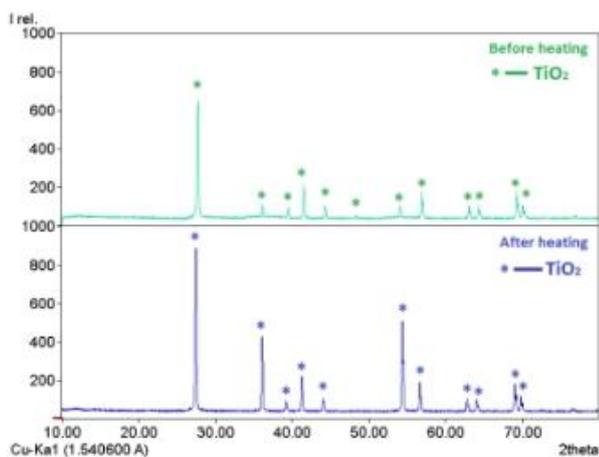
После нагревания  $TiO_2$  порошка при  $900^\circ\text{C}$  в течение 1 часа (рис.6.) было обнаружено изменение межплоскостного расстояния:  $d_{hkl}=3,231\text{\AA}$  для угла  $2\theta=27.58^\circ$ ;  $d_{hkl}=2,048\text{\AA}$  для угла  $2\theta=44.18$ ;  $d_{hkl}=1,344\text{\AA}$  для угла  $2\theta=69.93^\circ$ . Также были определены используя формулу Дебая-Шеррера

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

для кристаллической структуры  $TiO_2$  средние размеры кристаллов  $D=1,1-3,7$  нм. Здесь  $D$ -средний размер кристаллов,  $K$ - безразмерный коэффициент формы частиц (постоянная Шеррера);  $\lambda$ -длина волны рентгеновского излучения;  $\beta$ -ширина пика на полувысоте (в радианах и  $2\theta$  единицах);  $\theta$ -угол дифракции (угол Брэгга). Коэффициент  $K$  может принимать различные значения в зависимости от формы частиц. Например, для сферических частиц  $K$  обычно принимается равной 0,9. Постоянная Шеррера представлена как функция расстояния ( $d$ ) между атомами  $TiO_2$ . Степень кристалличности и аморфности образцов  $TiO_2$  оценивали методом рентгеноструктурного анализа с использованием программы Search and Match. Для оксида титана аморфная фаза составляет 81%, а кристаллическая фаза всего 19%. Это указывает на то, что наш порошок в основном является аморфным.

Как видно из приведенного рис.7, интенсивности пиков для образца  $TiO_2$  после нагрева при температуре  $900^\circ\text{C}$  в течение одного часа,  $2\theta=(27,31, 36,08, 54,21)$  для данных углов в 2-3- раза превышают значения интенсивностей пиков по сравнению с ненагретыми образцами.

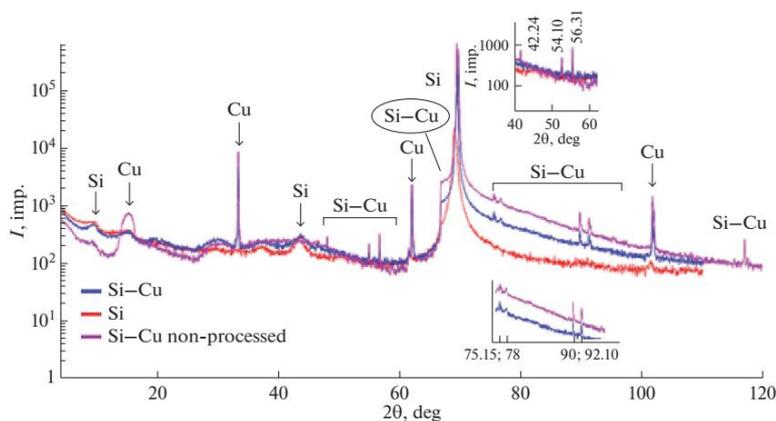
До настоящего времени влияние меди на кристаллическую структуру и морфологию кремниевого фотоэлемента практически не изучалось. Не применялся также метод магнетронного распыления для нанесения низкоомных металлических проводящих покрытий на поверхность кремниевых фотоэлементов. Поэтому изучение нанесения медного покрытия на поверхности пластины кремния методом магнетронного распыления, а также морфологии нанесённого слоя и его состава на основе комплекса методов рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ) весьма актуально, что и осуществлено в этой работе.



**Рис.7.** Результаты сравнения исходных и нагретых образцов  $\text{TiO}_2$ .

Нанесение медного покрытия на лицевую поверхность кремниевой пластины осуществлялось после предварительной её подготовки (механической, химической обработки, очистки в ультразвуковой ванне, а также ионами плазмы тлеющего разряда в вакууме), методом магнетронного распыления медной мишени. На рис.8 представлены полученные дифрактограммы (преимущественной ориентацией Si (111)) необработанного поликристаллического кремния с нанесенным токопроводящим медным покрытием на лицевую поверхность кремниевой пластины. Представлены рентгенодифрактограммы: исходной кремниевой пластины – 1 (красный цвет); неполированной исходной кремниевой пластины с нанесенным на её поверхность медного покрытия (Si-Cu) – 2 (розовый цвет) и полированной исходной кремниевой пластины с нанесенным на её поверхность медного покрытия (Si-Cu) – 3 (синий цвет).

На дифрактограмме видно, что имеются три пика Si (красный пик), а также малоинтенсивный пик для угла  $2\theta = 12,48$ , соответствует отражению от граней Si(110);  $2\theta = 43.25$ , соответствует отражению от граней Si(111) и  $2\theta = 70.12$ , соответствует отражению от граней Si(220), соответствующие указанным углам в дифрактограмме. На дифрактограмме поверхности образца кремния с нанесенным покрытием меди с фазовой структурой Si-Cu присутствуют пики, соответствующие углам облучения вращающегося детектора с постоянной скоростью вращения 4 град./мин в интервале углов  $2\theta$  от 10 до 80 град  $2\theta = 42,24; 54,10; 56,31; 75,15; 78; 90$ ; а также для углов 90, 92,10 и 119 градусов. Полученные пики указывают на то, что в образцах, обработанных тлеющим разрядом (синий цвет), с нанесенным медным покрытием увеличивается количество пиков на дифрактограмме в целом, что связано с равномерным распределением контактного слоя меди по поверхности пластины образца кремния. Однако, количество пиков на дифрактограмме необработанного образца кремния, как и обработанного образца кремния, одинаково. Но в необработанном образце кремния интенсивность пиков выше вследствие того, что из-за шероховатости поверхности, слой меди на некоторых её участках не растёт равномерно.



**Рис. 8.** Рентгенодифрактограммы: 1 - исходной кремниевой пластины (красный цвет), 2 - неполированной исходной кремниевой пластины с нанесенным покрытием меди (розовый цвет), 3 - полированной исходной пластины с нанесенным на её поверхность медного покрытия Si-Cu (синий цвет).

Таким образом, при нанесении контактного слоя меди на поверхность образца кремния с помощью источника магнетронного напыления, после механической обработки и его очистки с помощью тлеющего разряда, можно получить слой меди с равномерной толщиной и высокой адгезией к поверхности, поскольку на дифрактограмме присутствуют новые пики, характерные для образовавшейся фазовой структуры Si-Cu. То есть, при нанесении медных покрытий на поверхности кремния в приповерхностных слоях полученного образца происходят изменения структурных и фазовых параметров по сравнению с исходным образцом кремния.

Важную роль в этом явлении играет изменение сопротивления исходного образца. При нанесении медного контакта на поверхность кремниевой пластины происходит легирование поверхности кремния медью, приводящее к изменению поверхностного сопротивления образца. В этом случае полное сопротивление можно определить по следующей формуле:

$$R = \rho_k \frac{1}{al} \left[ a \sqrt{\frac{\rho_{\Pi}}{\rho_k}} \left( \frac{e^{a \sqrt{\frac{\rho_{\Pi}}{\rho_k} + e}} - a \sqrt{\frac{\rho_{\Pi}}{\rho_k}}}{2} \right) \right] = \rho_{\Pi} \frac{a}{l} \left[ \frac{e^{a \sqrt{\frac{\rho_{\Pi}}{\rho_k} + e}} - a \sqrt{\frac{\rho_{\Pi}}{\rho_k}}}{2ak} \right], \quad (2)$$

где  $a$  - ширина контакта,  $l$  - длина контакта,  $\rho_k$  - сопротивление медного контакта,  $\rho_{\Pi}$  - сопротивление поверхности кремния.

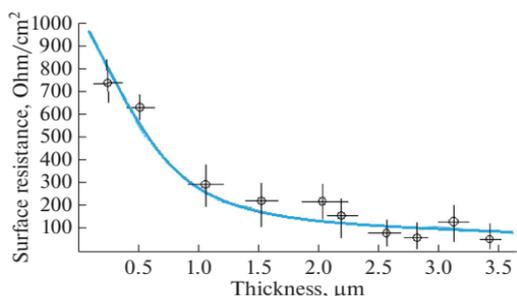
Для структуры поверхности кремния с атомами металла, вводимых в малых концентрациях, контактное сопротивление  $\rho_k$  определяется выражением:

$$\rho_k = \frac{k}{eAT} e^{\frac{e\phi}{kT}}, \quad (3)$$

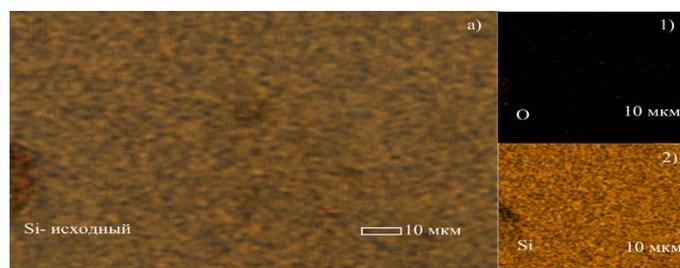
где  $A$  - постоянная Ричардсона,  $\phi$  - высота потенциального барьера металл - полупроводник,  $k$  - постоянная Больцмана.

Анализ полученных результатов показывает, что при протекании тока увеличение толщины контактного медного слоя приводит к уменьшению поверхностного сопротивления. Полученная зависимость поверхностного сопротивления омической плёнки меди от ее толщины представлена на рис.9.

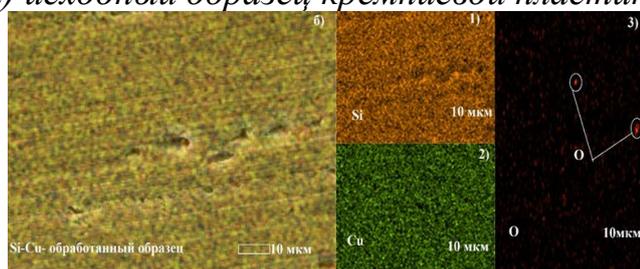
Из рис. 9 видно, что с увеличением толщины контактного покрытия поверхностное сопротивление уменьшается гиперболически. При достижении толщины контактного слоя до 1,5 мкм поверхностное сопротивление приближается к насыщению. Полученные результаты показали, что поверхностное сопротивление контактного медного слоя по достижению его толщины 3 мкм, в дальнейшем не изменяется. Таким образом, толщина контактного слоя меди 1,5 мкм является оптимальной толщиной.



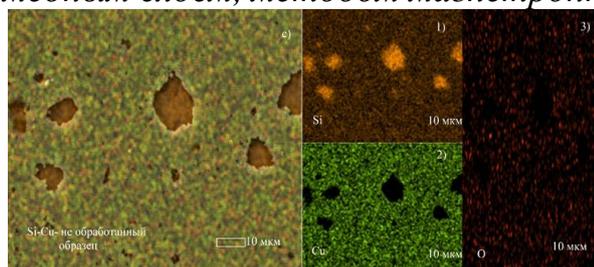
**Рис.9.** Зависимость поверхностного сопротивления контактного покрытия меди от толщины нанесенного слоя.



*а) исходный образец кремниевой пластины*



*б) образец кремния, очищенный тлеющим разрядом, с нанесенным контактным медным слоем, методом магнетронного напыления*



*с) исходный образец кремния (без какой-либо обработки) с нанесенным контактным медным слоем, методом магнетронного напыления.*

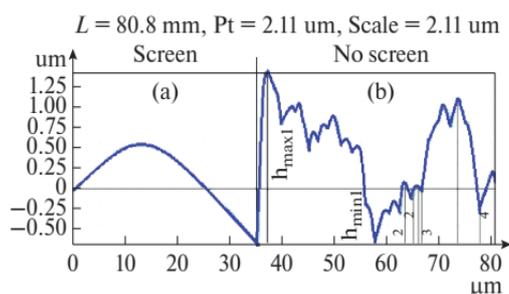
**Рис.10.** Фотографии поверхности исходного, необработанного и обработанного образца кремниевой пластины и с нанесенным контактным медным слоем, полученные на сканирующем электронном микроскопе JSM-IT200.

На рис. 10 представлены фотографии поверхности кремниевой пластины, полученные на сканирующем электронном микроскопе. На изображении поверхности исходного необработанного образца кремниевой пластины,

представленного на рис. 10а, имеются небольшие красные вкрапления. Это указывает на то, что на поверхности кремниевой пластины присутствуют островковые включения, обусловленные образованием окислов кремния. На рис.10б представлены фотографии образца кремния, очищенного тлеющим разрядом, с нанесённым методом магнетронного напыления контактным медным слоем толщиной 3 мкм, а на рис 10в изображение исходного образца кремния (без какой-либо обработки) с нанесённым методом магнетронного напыления контактным медным слоем, полученные на сканирующем электронном микроскопе. Из сравнения фотографий СЭМ-изображений на рис.10а и рис.10б четко видно, что на поверхности нанесённого на кремниевую пластину медного покрытия имеется ряд островковых включений, образованных на неровностях поверхности кремния.

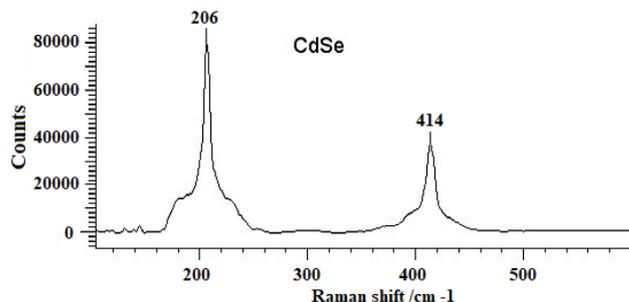
На рис. 10а видно, что кислород распределен по всей поверхности исходного кремниевого образца, а на образце кремниевой пластины рис. 10б, очищенной тлеющим разрядом, кислород практически не наблюдается (обнаружен только в двух точках). На изображении исходного образца кремния (без какой-либо обработки) с нанесённым контактным медным слоем, рис.10в, видно, что на поверхности образовались островки из большого количества кислорода, а также имеются загрязнения поверхности в нанесённом медном слое. Таким образом, из представленных СЭМ-изображений на рис. 10(а, б, в) видно, что в образце кремния, очищенном тлеющим разрядом, нанесенное методом магнетронного напыления контактное покрытие меди равномерное и однородное.

Для анализа влияния нанесенного контактного покрытия меди на шероховатость поверхности кремниевой пластины проведено сравнительное изучение шероховатости участков поверхности кремниевой пластины до и после магнетронного нанесения покрытия меди. Для этого поверхность образца была разделена на две части, одна из которых была экранирована от напыления. На экранированную часть образца медное покрытие не наносится в процессе напыления, а на неэкранированную часть поверхности наносится покрытие меди. На рис. 11 представлены профилограммы этих двух участков поверхности кремниевого образца. Сравнение этих двух участков профилограмм показало, что, при базовой длине всего образца составляет  $L=80,8$  мкм, и в экранированной части величина параметра  $R_{max} = 1,23$  нм. А на участке кремниевой пластины с нанесенным покрытием меди значение этого параметра увеличивается до  $R_{max} = 1,34$  нм, при этом, а шероховатость профиля составляет  $R_z = 0,26$  нм.

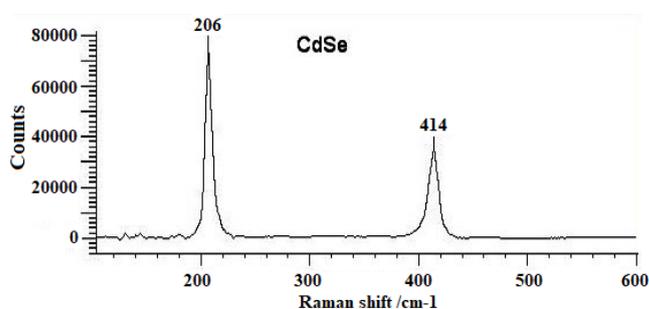


**Рис. 11.** Профилограммы шероховатости поверхности кремниевой пластины: а-экранированного участка (без покрытия меди), б-неэкранированного участка кремниевой пластины с нанесенным на неё слоем контактного покрытия меди.

На Рис.12 представлен спектр КРС образца монокристаллического кремния с пленочным покрытием из селенида кадмия CdSe, нанесенным методом вакуумного испарения. В спектре наблюдаются как моды аморфного селенида кадмия  $\sim 180 \text{ см}^{-1}$ , так и моды, отвечающие за наличие кристаллической фазы в плёнке  $\sim 206 \text{ см}^{-1}$ , т.е. плёнка имеет аморфно-кристаллическую структуру.



**Рис.12.** Спектр комбинационного рассеяния образца монокристаллического кремния, с пленочным покрытием из селенида кадмия CdSe, нанесенным методом вакуумного испарения.



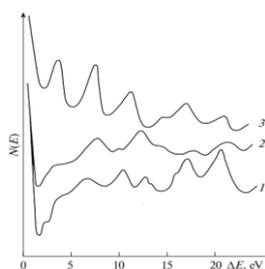
**Рис.13.** Спектр комбинационного рассеяния образца монокристаллического кремния, с пленочным покрытием из селенида кадмия CdSe, нанесенным методом вакуумного испарения, подвергнутого процедуре последующего отжига в вакууме при температуре  $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

На Рис.13 представлен спектр КРС образца монокристаллического кремния, с пленочным покрытием из селенида кадмия CdSe, нанесенным методом вакуумного испарения, подвергнутого последующему отжигу в вакууме при температуре  $800^{\circ}\text{C}$ . Отжиг исследуемого образца при температуре порядка  $800^{\circ}\text{C}$  приводит к видоизменению соответствующего спектра комбинационного рассеяния что свидетельствует о существенном восстановлении кристаллической структуры пленочного покрытия.

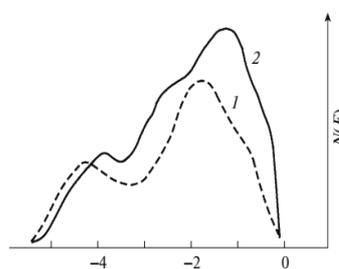
**Четвёртой глава «Модификация поверхности свободных плёнок имплантацией ионов активных металлов и изучение влияния ионной бомбардировки и последующего нагрева на состав, структуру, свойства и тормозную способность свободных нанопленок Cu и слоистых структур Si-Cu»** посвящена изучению путей изменения свойств плёночных структур. В данной работе впервые изучено влияние имплантации ионов  $\text{Ba}^+$  с вариацией энергии ионов от 0,5 до 10 кэВ и последующего отжига на состав, электронную, кристаллическую структуру и электрофизические свойства нанопленок Si, выращенных на поверхности свободной пленки Cu(100).

Для исследования в одинаковых условиях были подготовлены образцы Cu(100) с нанопленками Si толщиной 0, 50, 100, и 400 Å. Эти образцы обезгаживались при  $T=750 \text{ K}$  в течение 2-3 часа при вакууме не хуже, чем  $10^{-6}$  Па. На рис.12 приведены спектры ХПЭЭ, снятые при начальной энергии  $E_p=300 \text{ эВ}$ , для чистой пленки Cu(100) и для Cu(100) с пленкой Si толщиной 50 и 400 Å. Перед измерением исследуемые образцы прогревались при  $T=700 \text{ K}$

в течении 30 мин. На спектре чистой пленки Cu(100) обнаруживаются интенсивные пики с потерей энергии  $\Delta E$ : 7.3; 10.3; 17.6 и 21.6 эВ (рис.12, кривая 1). Структура, форма, интенсивность и число пиков этого спектра существенно отличаются от структуры спектра для массивных пленок Cu(100), приведенной на спектре для массивных пленок Cu (100). Однако энергетическое положение большинства пиков приблизительно совпадает. После напыления пленки Si с толщиной  $d=50 \text{ \AA}$ , вследствие взаимодиффузии (при 700 К) на поверхности Cu(100) формируется поликристаллическая пленка силицида с примерным составом  $\text{Cu}_2\text{Si}_3$ . При этом интенсивность пика меди с потерей  $\Delta E=10.3 \text{ эВ}$  резко уменьшается, а другие пики Cu полностью исчезают и появляются новые пики (рис.12, кривая 2). При  $d \geq 100 \text{ \AA}$  формируется трехслойная система Si -  $\text{Cu}_2\text{Si}_3$  - Cu(100). На спектре ХПЭ появляются пики «чистого» Si, который полностью устанавливается при  $d \approx 300-400 \text{ \AA}$  (рис.12, кривая 3).



**Рис.12.** Спектры ХПЭЭ для свободных пленок: 1 - Cu(100); 2 -  $\text{Cu}_2\text{Si}_3/\text{Cu}$  и 3 – Si/ $\text{Cu}_2\text{Si}_3/\text{Cu}$ .  $E_p = 300 \text{ эВ}$ .



**Рис.13.** Спектры фотоэлектронов для поликристаллических пленок кремния: 1 – толстая пленка толщиной  $d \approx 1 \text{ мкм}$ ; 2 – свободная пленка толщиной  $d \approx 400 \text{ \AA}$ .  $h\nu=10.8 \text{ эВ}$ .

На основе анализа спектров ХПЭЭ совместно с данными ОЭС нами определено энергетические положения основных пиков на спектре ХПЭЭ, связанных с возбуждением плазменных колебаний (табл.1).

**Таблица 1**

Энергетические положения основных пиков на спектре ХПЭЭ, связанных с возбуждением плазменных колебаний

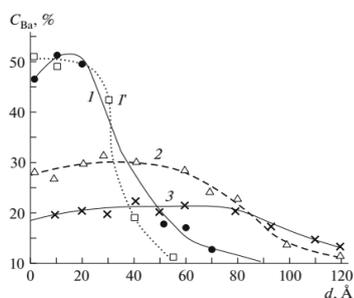
	$\hbar\omega_s$ , эВ	$\hbar\omega_v$ , эВ	$2\hbar\omega_s$ , эВ	$\hbar\omega_s+\hbar\omega_v$ , эВ	$2\hbar\omega_v$ , эВ
Cu(100)	7.0	10.8	14.5	17.5	21.2
$\text{Cu}_2\text{Si}_3$ , поликр.	8.5	12.6	17.5	21.8	-
Si, поликр.	10.4	17	21.3	28	-

Из таблицы видно, что энергия возбуждения плазменных колебаний меди, силицида меди и кремния существенно отличается друг от друга и их значения близки к значениям массивных пленок Cu,  $\text{Cu}_2\text{Si}_3$  и Si. Однако, на спектре в массивных пленках, Si содержатся пики с энергиями 3.3; 5.5; 6.7 и 9.7 эВ обусловленные межзонными переходами, а в свободных пленках Si обнаруживаются всего лишь 2 пика с энергиями 3.6 и 7.5 эВ. По-видимому, плотности состояний электронов валентной зоны (а также зоны проводимости) тонких свободных пленок Si, заметно отличаются от таковых для толстых пленок.

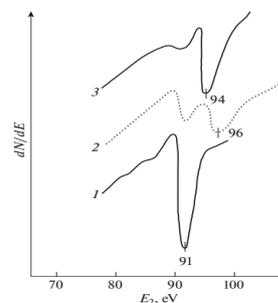
На рис.13 приведены спектры фотоэлектронов для массивной и свободной пленки Si, полученные при  $h\nu=10.8$  эВ. Известно, что ход кривых этих спектров хорошо отражают плотности состояния валентных электронов исследуемого объекта. Видно, что ширины спектра этих пленок практически одинаковы, однако их плотности состояний заметно отличаются. Если учесть, что для металлов и полупроводников глубина выхода фотоэлектронов в области энергии  $h\nu=10-15$  эВ составляет  $60-80$  Å, то влиянием подложки на плотности состояния пленки Si можно пренебречь. По-видимому, это отличие связано с отличием концентрации несвязанных атомов Si, O, в поверхностных слоях массивной пленки от свободной пленки Si, а также с неидентичностью параметров кристаллических решеток отдельных блоков этих пленок.

На рис.14 приведены концентрационные профили распределения Ba по глубине для трех одинаковых ( $d_{Si}\approx 400$  Å) образцов Si/Cu(100) имплантированных ионами  $Ba^+$  с энергиями  $E_0=0,5; 3$  и  $8$  кэВ и отожженных при  $T=800$  К в течение  $\sim 2$  часов. Видно, что при  $E_0=0,5$  кэВ после прогрева концентрация Ba на поверхности составляет  $\sim 50$  ат.%, и она до глубины  $20-25$  Å практически не изменяется. Анализ ОЭС показал, что при этом преимущественно образуется соединение типа BaSi. При энергии  $E_0=3$  кэВ образуется пленки  $Ba_{0,3}Si_{0,7}$  с толщиной  $d\approx 60-70$  Å, а при  $E_0=8$  кэВ- пленка  $Ba_{0,2}Si_{0,8}$  с толщиной  $d\approx 80-100$  Å. Во всех случаях в поверхностных слоях содержались не связанные атомы Si, а на границе раздела BaSi/Si образуется переходной слой с толщиной от  $50$  ( $E_0=0,5$  кэВ) до  $120$  Å ( $E_0=8$  кэВ), где  $C_{Ba}$  уменьшается от определенного значения до нуля.

Результаты сравнения показали, что толщина переходного слоя в случае тонкой свободной пленки Si существенно больше, чем в случае толстой пленки Si (рис.14, кривая 1'). Отметим, что в случае толстой пленки Si постимплантационный отжиг можно было проводить до  $T\approx 1300$  К. При этом образовался монокристаллический стехиометрический силицид  $BaSi_2$ . В случае свободной пленки Si-Cu увеличение температуры до  $900$  К приводило к усилению взаимодиффузий атомов Ba в систему Si-Cu, Cu в Si. При  $T\approx 950$  К атомы Cu начинают диффундировать к поверхности ионно-имплантационного слоя. При энергии ионов  $E_0\geq 5$  кэВ наблюдается диффузия Ba в область Si-Cu<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>.



**Рис. 14.** Профили распределения атомов  $Ba^*$  по глубине Si/Cu(100) имплантированный ионами  $Ba^+$  и отожженной при  $T=800$  К. Энергия ионов  $E_0$ , кэВ: 1, 1' – 0,5; 2 – 3; 3 – 8.



**Рис.15.** Оже-спектры в интервале энергии  $E=90-100$  эВ для: 1 – Si; 2 – BaSi; 3 – BaSi<sub>2</sub>.

На рис.15 приведены оже-спектры в интервале энергий  $E=90-100$  эВ (оже-линия  $L_{2,3}VV$  кремния) для системы Si/Cu с пленкой BaSi толщиной 20-25 Å, а также для массивного Si(111) с пленкой BaSi<sub>2</sub> толщиной 20-25 Å. Видно, что в спектре пленки BaSi, полученной на поверхности Si/Cu имеется 2 пика при  $E_2=91$  эВ и 96 эВ. Первый относится к Si, а второй пик - силициду BaSi. Наличие первого пика нами объясняется наличием на поверхности BaSi несвязанных атомов Si (~5-10 ат.%). По-видимому, при  $T\approx 800$  К не все атомы Si входят в химический связь с атомами Ba. В случае толстой пленки Si имплантированного ионами Ba<sup>+</sup> после прогрева при  $T\approx 1200$  К, формируется пленка BaSi<sub>2</sub> и на спектре появляется новый пик при  $E=94$  эВ. В таблице 2 приведены зонно-энергетические параметры, тип и параметры кристаллической решетки тонкой силицидной пленки созданной на поверхности свободной и толстой пленки Si.

**Таблица 2**

Параметры энергетических зон и кристаллической решетки нанопленки силицида Ba, созданной имплантацией ионов в сочетании с отжигом.

Тип пленки Si	Ba <sup>+</sup> →Si	T <sub>нагр.</sub> в К	Состав поверхности	E <sub>g</sub> , эВ	χ, эВ	Кристал. структура	
						Тип	a, Å
Свободн. пленка d <sub>Si</sub> =400 Å	E <sub>0</sub> =1кэВ D=6·10 <sup>16</sup> см <sup>-2</sup>	800	Ba <sub>0,5</sub> Si <sub>0,5</sub> +Si	0,3	3,6	поликр.	-
Массивн. пленка d <sub>Si</sub> ≈1000 нм	E <sub>0</sub> =1кэВ D=6·10 <sup>16</sup> см <sup>-2</sup>	800	BaSi+Si	0,4	-	поликр.	-
		1100	BaSi <sub>2</sub>	0,6	4,2	кубич.	5,9

Из таблицы видно, что наличие в пленке BaSi некоторого количества несвязанных атомов Si приводит к сужению ширины запрещенной зоны силицида до 0,3-0,4 эВ. Для монокристаллической пленки BaSi<sub>2</sub> с хорошей стехиометрией значение E<sub>g</sub> составляет ~0,6 эВ. Результаты экспериментов показали, что имплантация ионов Ba<sup>+</sup> в свободную систему Si/Cu в сочетании с отжигом не позволяет получить однородные с хорошей стехиометрией нанопленки типа BaSi. В частности в пленке BaSi содержится ~10 ат.% несвязанные атомы Si, и значение E<sub>g</sub> составляет ~0,3 эВ.



**Рис. 16.** Изображение участка поверхности образца Si, бомбардированной ионами меди.

Методом КРС было исследовано преобразование микроскопической структуры кристаллической решетки кремния и ее динамических свойств, при различных режимах имплантации и лазерного отжига (рис.16). Полученные спектры КРС позволили проследить трансформацию структуры

приповерхностного слоя толщиной  $\sim 100$  нм и локализацию атомов Cu в матрице Si по мере повышения дозы имплантации, а также при увеличении энергии лазерного облучения.

При возникновении напряжений и дефектов в кристаллической решетке образца происходит соответствующее изменение положения и формы пика кремния в спектре комбинационного рассеяния. Используя эти спектры, можно оценить наличие, или отсутствие таких напряжений и дефектов, исходя из изменения частоты собственных колебаний монокристаллического кремния и изменения отношения площадей левого и правого Region на соответствующих спектрах.

При теоретическом изучении свойств полученных тонких пленок Cu-Si была рассчитана тормозная способность системы Cu-Si, имплантированной ионами активных металлов с различной энергией и дозой. Тормозная способность ионов, как потери энергии на единицу длины их пробега в мишени, после рассеяния на угол  $\theta$  определяется формулой:

$$dE/dx = n(S_n + S_e) \quad (4)$$

здесь  $dE/dx$  - тормозная способность мишени,  $x$  - глубина проникновения ионов,  $n$  - концентрация атомов в мишени,  $S_n$  и  $S_e$  - соответственно ядерная и электронная тормозные способности мишени. Расчеты потерь энергии иона на неупругое  $S_e$  рассеяние определялось следующей формулой:

$$dE/dx = kE_0^{1/2} \quad (5)$$

где  $k$  - кинематический коэффициент,  $E_0$  - начальная энергия ионов.

$$k \approx \frac{0.08Z_1^{2/3}Z_2^{1/2}}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{3/4}} \cdot \frac{(m_1 + m_2)^{3/2}}{m_1^{3/2}m_2^{3/2}} \quad (6)$$

Оценки показывают, что тормозная способность системы Si-Cu для ионов  $Ba^+$  и  $Cs^+$  практически одинакова (рис.17). Потери энергии сильно увеличиваются с приближением к контактному слою Si-Cu. При расчете, с увеличением концентрации триамеди и диамеди силиция в контактном слое, потери энергии имплантированных ионов резко возрастают. Это может быть объяснено как следствие диффузии ионов кремния и меди в противоположные стороны пленки, приводящей к увеличению рассеивающих центров.

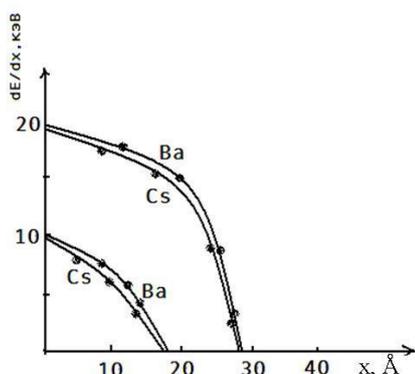


Рис. 17. Тормозная способность Si-Cu к ионам  $Ba^+$  и  $Cs^+$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертации сформулированы следующим образом:

1. Методом магнетронного распыления на поверхности моно- и поликристаллов Si, получены наноплёнки оксида титана TiO<sub>2</sub>. Методом рентгенофазового анализа для пленок оксида титана TiO<sub>2</sub>, определены индексы Миллера и параметры решетки.

2. Установлено в результате анализа исходного и нагретого TiO<sub>2</sub>, что расстояние между атомами TiO<sub>2</sub> изменяется в зависимости от температуры, а степень кристаллизации TiO<sub>2</sub> увеличивается на один порядок (расчет производился по формуле Дебая-Шеррера). Определена степень кристалличности и аморфности образцов TiO<sub>2</sub> и она составляла: аморфная фаза - 81 %, а кристаллическая - 19 %.

3. Показано, что завершающий отжиг образца CdSe при температуре порядка 8000С приводит к значительному уменьшению аморфной фазы, и она составляет порядка 17%.

4. Создан омический контакт к кремниевому поликристаллу путем нанесения методом магнетронного ионного распыления тонкого слоя меди толщиной 3,0–3,5 мкм, позволяющий получать низкоомное электрическое сопротивление контакта Cu–Si. При этом структура и морфология поверхности кремния не изменяется, а нанесенный слой меди является тонким, со сглаженным рельефом (менее шероховатым), уменьшает токовые потери и, соответственно, повышает их эффективность.

5. Впервые методом спектроскопии СХПЭЭ и СУОЭ показаны заметные отличия друг от друга плотностей состояний валентных электронов толстой и свободной тонких пленок Cu<sub>2</sub>Si<sub>3</sub> и Si. Это отличие связано с отличием кристаллических решеток отдельных блоков массивной пленки от свободной пленки Si.

6. Установлено, что имплантация ионов Ba<sup>+</sup> в кремний и последующий отжиг способствуют получению нанопленки поликристаллического типа BaSi с некоторым избытком несвязанных атомов Si. Обнаружено при имплантации ионов активных металлов в свободные пленки Si–Cu с толщиной кремния  $d \leq 400 \text{ \AA}$  наличие ограничений: энергия ионов E<sub>0</sub> должна быть меньше 4–5 кэВ, постимплантационный отжиг нужно проводить при  $T \leq 800 \text{ K}$ .

7. Предложена эффективная методика очистки поверхности Cu, основанная на имплантации ионов Cs<sup>+</sup> в сочетании с отжигом.

8. Показано, что тормозная способность системы Si–Cu для ионов Ba<sup>+</sup> и Cs<sup>+</sup> практически одинакова. Потери энергии сильно увеличиваются с приближением к контактному слою Si–Cu. При расчете, с увеличением концентрации триамеди и диамеди силиция в контактном слое, потери энергии имплантированных ионов резко возрастают.

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

---

**INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES**

**KOSIMOV ISROIL ODINAVICH**

**ELECTRONIC SPECTROSCOPY OF THIN CU, CDSE, TIO<sub>2</sub> FILMS  
CREATED ON A SILICON SURFACE**

**01.04.04 – Physical electronics**

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

**Tashkent – 2025**

The theme of the dissertation of doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission of the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under number B2022.3.PhD/FM765.

Dissertation has been prepared at the Institute of Ion-plasma and laser technologies.

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

**Scientific supervisor:** **Isakhanov Zinaobidin Abilpeyzovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

**Official opponents:** **Maksimov Sergey Yevlantiyevich**  
Doctor of Physics and Mathematics Sciences, Senior Researcher.

**Axrorov Subkhan Kurbonovich**  
Candidate of Physics and Mathematic Sciences, Associate Professor.

**Leading organization:** **Tashkent State Technical University named after Islam Karimov**

The defense will take place on «11» February 2025 at 16<sup>00</sup> at the meeting of the Scientific Council number DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 at Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent, 33 Durmon yuli street. Phone/fax: (+99871) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz).

The PhD dissertation is can be looked through in the Information-Resource Centre of the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (is registered № 4) (Address: 100125, 33, Durmon yuli str., Tashkent, Uzbekistan. Phone: (+99871) 262-31-69).

The abstract of the dissertation is sent out on «30» January 2025.

(Mailing report № 4 on «30» January 2025).



*[Handwritten signature]*

*[Handwritten signature]*

**Kh. B. Ashurov**

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

**I.D. Yadgarov**

Scientific secretary of scientific council on award of scientific degrees, doctor physical and mathematical science, professor.

**U.K. Makhmanov**

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

## INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

**The purpose of this work is to study** the patterns of formation of nano-sized structures of TiO<sub>2</sub>, CdSe, Si/Cu and their electronic influence on their composition, structure and properties - ion bombardment, thermal annealing.

**The objectives of the research:**

obtaining TiO<sub>2</sub> nanofilms on the surface of mono and poly silicon crystals using magnetron sputtering

study of the degree of crystallinity of CdSe films deposited on the Si surface using the Raman scattering method (RS)

creation of low-resistance contacts on the surface of Si and CdSe.

modification of the surface properties of free Si/Cu film systems by implantation with active metal ions.

studying ion bombardment and subsequent annealing on the composition and properties of Si implanted with Cu ions.

theoretical study of the braking ability of Cu-Si nanofilm.

**The objects of research work** are polycrystalline films of Cu, TiO<sub>2</sub>, CdSe, poly and single-crystal samples of Cu/Si TiO<sub>2</sub>/Si(III) and CdSe/Si.

**The subject of the study** is the electronic structure and physical mechanisms of formation of nanosized structures on the surface and in the near-surface region of Cu/Si TiO<sub>2</sub>/Si and CdSe/Si.

**The scientific novelty of the research is as follows:**

- for the first time on the Si (111) surface, TiO<sub>2</sub> films of different thickness in the anatase state were obtained and the Miller indices and lattice parameters were determined. After heating for 1 hour at a temperature of 900 °C, TiO<sub>2</sub> passed from the anatase phase to the rutile phase. It was shown that the film contains micro and nanoparticles consisting of a compound of the TiO<sub>x</sub>, TiO<sub>x</sub>C<sub>y</sub> type, and the percentage of the crystallinity of TiO<sub>2</sub> was determined: the crystalline part is 19%, the amorphous part is 81%.

- the change in the degree of amorphousness and crystallinity of CdSe films was studied using the Raman method when heated from room temperature to 800 °C. It was found that the proportion of the amorphous phase in the cadmium selenide structure decreases by 17%. The results obtained are of significant interest for research in the field of microelectronics, defect formation, as well as in the creation of materials for optoelectronics and nanoelectronics;

- thin low-resistance contact layers of copper on the silicon surface were obtained, while the structure and morphology of the silicon surface do not change, and the deposited copper layer is thin, with a smoothed relief (less rough), which will reduce current losses on the surface of silicon solar cells and, accordingly, increase their efficiency;

- it was shown that the densities of state of valence electrons of thick and free thin films differ significantly from each other. It was shown that the implantation of Ba<sup>+</sup> ions and subsequent annealing contribute to the production of BaSi-type nanofilms with some excess of unbound Si atoms. It was found that the following limitations exist when implanting active metal ions into free Si–Cu films with a

silicon thickness of  $d \leq 400$  Å: the ion energy  $E_0$  should be less than 4–5 keV; post-implantation annealing should be carried out at  $T \leq 800$  K. BaSi films have a polycrystalline structure with some excess of Si atoms.

- for the first time, the changes in the elemental and chemical composition of copper during purification by temperature heating and implantation of cesium ions in combination with annealing were studied using the SIMS and OES methods. It was found that due to the high activity of Cs atoms during ion bombardment, a chemical bond is formed with oxygen and carbon atoms, and after heating it evaporates in the form of Cs+O and Cs+C. Consequently, the copper surface is maximally cleaned from impurity atoms;

- theoretical studies of the stopping power of Cu–Si nanofilm during bombardment with Ba<sup>+</sup> and Cs<sup>+</sup> ions showed that energy losses increase greatly with approaching the Si–Cu contact layer. In the calculation, it was determined that with an increase in the concentration of tri-copper and dia-copper silicon in the contact layer, the energy losses of implanted ions increase sharply. This can be explained as a consequence of the diffusion of silicon ions into copper and copper in silicon in the film, leading to an increase in scattering centers.

**Implementation of the research results** the dissertation used an article by Isakhanov Z.A., Kosimov I.O., Umirzakov B.E., Erkulov R.M. (2020). “Modification of the surface properties of free Si–Cu films by implantation of active metal ions.” *Engineering Physics*, 65(1), 114-117. There are 3 references in the Scopus scientific database. These related articles cover the following topics:

1. Sharopov U. B. et al. Comparison of electron irradiation on the formation of surface defects in situ and post thin-film LiF/Si (111) deposition // *Thin Solid Films*. – 2021. – Т. 735. – С. 138902. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.138902>.

2. Theodosiou A. et al. Formation of cesium carbonate in ion-implanted graphite, examined with dual-source x-ray photoelectron spectroscopy, density functional theory calculations and thermodynamic modelling // *Carbon*. – 2022. – Т. 197. – С. 226-237. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.06.034>.

3. Бернацкий Д. П., Павлов В. Г. Полевая десорбция цезия и бария с нанокластеров графена на поверхности иридия. – 2023. Вып. 15 С. 40-44

4. Sharopov, U.B., Kaur, K., Kurbanov, M.K. et al. Controlling the Low-temperature Ionic Purification of a Silicon Surface by Electron Spectroscopy. *Silicon* 14, 4661–4667 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01268-0>

As a result of the dissertation work, prototypes of electrophysical parameters were created at the level of the world's best analogues. (Deputy Director of Foton JSC “Use in a prototype for growing a combined layer on the surface of products” based on the results of a scientific study dated № 236., 06.12.2023):

Using a thin layer of copper using a magnetron ion sputtering source proposed in the thesis, a low-resistance Cu - Si contact is created on a silicon polycrystal, which makes it possible to obtain its low electrical resistance due to its high conductivity and thickness of 3.0 - 3.5 microns.

Using the Raman scattering method presented in the dissertation, the change in the degree of amorphism and crystallinity of CdSe films when heated from room

temperature to 800C was studied. It has been established that the proportion of the amorphous phase in the composition of cadmium-selenium is reduced to 17%. The results obtained are of great interest for research in the field of microelectronics, defect formation, as well as the creation of materials for opto- and nanoelectronics.

The results obtained were implemented and used at JSC FOTON in the creation of microelectronic devices. The use of scientific results will make it possible to create semiconductor devices with thermally stable parameters at FOTON JSC and reduce the cost of products and the profitability of similar devices with the same parameters.

**Structure and volume of dissertation.** The structure of the thesis consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and applications. The volume of the dissertation contains 134 pages of text, including 54 figures and 5 tables.

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

**I бўлим (чаft I; part I)**

- 1А. Isakhanov, Z.A., Kosimov, I.O., Umirzakov, B.E., & Erkulov, R.M. Modification of the surface properties of free Si–Cu films by implantation of active metal ions //Technical Physics. – 2020. – Т. 65. – С. 114-117.
- 2А. Касимов, И.О., Умирзаков, Б.Е., Исаханов, З.А., Рузибаева, М.К., & Курбанов, Р. Изучение спектров характеристических потерь энергии свободных нанопленочных систем Si-Cu // «Узбекский физический журнал». – 2019. – Т. 21. – №. 3. – С. 158-160.
- 3А. Исаханов, З. А., Косимов, И. О., Халматов, А. С., Мухтаров, З. Э., Умирзаков, Б. Е., & Ахмедов, А. А. Влияние ионной бомбардировки и последующего прогрева на состав поверхности монокристаллической меди // «Узбекский физический журнал». – 2023. – Т. 25. – №. 3.
- 4А. Ш.Т. Хожиев, И.О. Косимов, Ш.К. Кучканов, А.Э. Кимизбаева, Б.А. Бабажанов, У.Х. Холиков «Оксид титана и его основные свойства, определяемые методом рентгеновской дифрактометрии» Научны вестник Наманганского государственного университета. -2024, №. 5, с. 24-28
- 5А. Arustamov, V.N., Khudaykulov, I. K., Kremkov, M. V., Ashurov, K. B., Kosimov, I. O., Kharyakov, V. P., & Berdiyev, U. F. Creation of Low-Ohmic Copper Contacts on the Surface of Silicon Crystals for Application in Photocells //Applied Solar Energy. – 2023. – Т. 59. – №. 2. – С. 95-101.
- 6А. Хожиев, Ш. Т., Ротштейн, В. М., Ашуров, Р.Х., & Гаибназаров, Б.Б., Косимов И.О. Спектры комбинационного рассеяния света пленок селенида кадмия // Научный вестник Наманганского государственного университета. – 2020. – Т. 2. – №. 10. – С. 22-29.
- 7А. Хожиев Ш. Т, Косимов И. О, Игамов Б.Дж., Ш.К. Кучканов., Холиков У. Х. Формирования и кристаллизация образцов TiO<sub>2</sub> обнаруженная методом порошкового диффрактометра XRD-6100 // Научный вестник Наманганского государственного университета. – 2023. – Т. 2. – №. 8. – С. 22-29.

**Тезисы докладов:**

- 8А. Z.A. Isakhanov, I.O. Kosimov, A.S. Khalmatov, A.A. Akhmedov, Z.E. Mukhtarov //Features of cleaning the surface of single-crystal copper. IX Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии»ЛАПЛАЗ-2023. С.217 Сборник научных трудов.
- 9А. Ш.Т. Хожиев, Б.Б. Гоибназаров, У.Х. Курбанова, Д.М. Муродкобилов, А.А. Шукурова, В.М. Ротштейн, И.О. Косимов //Исследование поверхности кремния имплантированного ионами меди.

- Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике  
сборник докладов международной научной конференции 2020. С.121
- 10А. И.О. Косимов, З.А. Исаханов, Б.Е. Умирзаков, А.С. Халматов // Порошковая рентгеновская дифрактометрия оксида титана. 52-й международной Тулиновской конференции. По физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва 30 мая – 1 июня 2023) С.142
- 11А. В.Н. Арустамов, М.В. Кремков, И.Х. Худайкулов, И.О. Косимов. // Создание низкоомного контакта на поверхности кристалла кремния. 52-й международной Тулиновской конференции. По физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва 30 мая – 1 июня 2023) С.119
- 12А. Ш.Т. Хожиев, И.О. Косимов, И.Х. Худайкулов, Б.Д. Игамов, М.А. Давлатов, К.Т. Довронов. // Исследование температурной зависимости тонкого покрытия CdSe на поверхности Si(111) в условиях высокого вакуума. — Mikro va nanotexnologiya, yangi materiallar olishning zamonaviy holati va istiqbollari mavzusidagi xalqaro konferensiya. 2023. Qarshi sh. O'zbekiston. С.52-54
- 13А. З.А. Исаханов, Р.Т. Курбанов, Р. Джаббарганов, И.О. Косимов. // Изменение поверхностной концентрации легирующих атомов в зависимости от температуры для образцов Si, легированных различными ионами. “Физика ва электрониканинг долзарб муаммолари” мавзусидаги Республика илмий-амалий анжумани. Тошкент, 2023. С.62-63.
- 14А. Ш.Т. Хожиев, И.О. Косимов, Б.Д. Игамов, И.Х. Худайкулов, З.А. Исаханов. // Изучение влияния высокой температуры и  $\gamma$ -лучей на кристаллизацию тонкого покрытия TiO<sub>2</sub>, полученного в условиях высокого вакуума на поверхности Si (111). “Физика ва электрониканинг долзарб муаммолари” мавзусидаги Республика илмий-амалий анжумани. Тошкент, 2023. С.122-125.
- 15А. Ш.Т. Хожиев, И.О. Косимов, И.Х. Худайкулов, Б.Д. Игамов. // Изменение кристаллической структуры тонкой пленки CdSe, нанесенной на поверхность кремния. 2023. С.157-158. Республиканской научно-практической конференции «Проблемы и перспективы оптики и лазерной физики» с участием зарубежных ученых. Посвящается 80-летию образования Академии наук Республики Узбекистан.
- 16А. З.А. Исаханов, И.О. Косимов, Б.Э. Умирзаков, А.Э. Нарбаев, Ш.Ф. Худайбердиева «Модификация свойств поверхности свободных пленок Si-Cu имплантацией ионов активных металлов» /XIV Межд. конф. «ВИП-2019», Т.2, С.187-189.
- 17А. З.А. Исаханов, И.О. Косимов, А.С. Халматов, З.Э. Мухтаров, Б.Е. Умирзаков, А.А. Ахмедов. «Изучение поверхности монокристаллической меди после ионной бомбардировки и последующего нагрева // Респ. науч. конф. «Наука и технологии в Ферганской долине» посвящ. 80-ти летию АН РУз. г. Наманган 11-12 мая 2023г. С.
- 18А. И.О. Косимов, Б.Е. Умирзаков, А.А. Абдувайитов, З.А. Исаханов, А.С. Халматов Рентгено-дифрактометрический анализ оксид титана и его

- основные свойства // Труды 26 Межд. конф. ВИП-2023, 21-25 августа 2023г. Ярославль, Россия. С.84-87.
- 19А. Исаханов З.А., Умирзаков Б.Е., Косимов И.О., Сафарбаев А.А. Влияние  $\gamma$  -облучения на структуру полимера поли (3 гексилтиофена) // Научно-практич. конф. “Проблемы и перспективы оптики и лазерной физики” посвящ. 80-летию образования АН РУз. ИИПиЛТ, “ 26 10. 2023г. г.Ташкент. С.150-151.
- 20А. З.А.Исаханов, И.О. Косимов, А.Э. Нарбаев, Б.Э. Умирзаков Изучение свойства наноразмерных структур созданных на поверхности пленочной системы Si/Cu // Сб. тезис. докл. научно-практ. конф. “Физиканинг ҳозирги замон таълимидаги ўрни (Роль физики в системе современного образования)”, 13-14 декабрь 2019. г. Самарканд
- 21А. Исаханов З.А., Косимов И.О., Ёркулов Р.М. Морфология наноразмерных структур созданных на поверхности свободной пленочной системы Si/Cu / “Фан, таълим ва ишлаб чиқариш интеграцияси” Республика илмий-амалий конф. материал. тўплами 22-23 сентябр 2020 й. Қарши ш. 205 бет.
- 22А. Курбанов Р.Т., Исаханов З.А., Ахмедов А.А., Косимов И.О. Исследование миссии заряженных наночастиц при ионной бомбардировке границ раздела Ni-Cu / “Фан, таълим ва ишлаб чиқариш интеграцияси” Республика илмий-амалий конф. материал. тўплами 22-23 сентябр 2020 й. Қарши ш. 221 бет.
- 23А. З.А. Исаханов, Б.Е. Умирзаков, А.А. Абдувайитов, И.О. Касимов, Р.М. Ёркулов. Электронная структура и свойства наноразмерных структур SiO<sub>2</sub> созданных на поверхности свободной пленочной системы Si/Cu, имплантированный ионами O<sub>2</sub> / «Fotoenergetikada nanostrukturali yarimo'tkazgich materiallar» xalqaro ilmiy anjumani ma'ruzalar to'plami, 9- 10 Oktyabr 2020 yil. Toshkent sh. 396 bet.
- 24А. Курбанов Р., Исаханов З.А., Косимов И.О., Ёркулов Р.М., Содикжанов Ж.Ш. зависимость выхода многоатомных наночастиц при распылении металлов ионами инертных газов / Материалы 5-ой Межд. конф. на тему «Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниковых микро –и наноструктурах», 13-14 ноябрь, 2020, ФерПИ. С.
- 25А. З.А. Исаханов, И.О. Косимов, Р.М. Ёркулов, Р. Курбанов. Морфология наноразмерных структур созданных на поверхности свободной пленочной системы Si/Cu. Тезисы докладов 50-й Межд. Тулиновской конф. по ФВЗЧК. Москва-2021, 25-27-апрель, 2021г, с. 161.
- 26А. Хожиев Ш.Т., Косимов И.О., Гаибназаров Б.Б. «Металлические кластеры и механизмы их образовании» Международной конференции «Роль современной химии и инноваций в развитии национальной экономики» прошедшей 27-29 мая 2021 года в Ферганском политехническом институте. ст.86
- 27А. Ш.Т.Хожиев, И.О. Косимов, Б.Б. Гаибназаров, М.А. Турсунов, М.А. Махмудов, М.Б.Боходиржонова «Исследование структуры и состава пленок V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>•NH<sub>2</sub>O – методом порошкового рентгенофазового анализа» I-

Международная научная конференция «Научные основы использования информационных технологий нового уровня и современные проблемы автоматизации». ст. 325 г. Ташкент, 25-26 апреля 2022 г.

- 28А. Хожиев Ш.Т., Тураев Б.Э., Косимов И.О., Муродкobilов Д.М., Шукурова А.А. «Механизм комбинаторного синтеза распыленных металлических кластерных ионов» международная научно-техническая конференция «Инновационные проблемы в сфере технических и технологических наук». ст. 57. Термиз-22 сентябрь 2020 г.
- 29А. Хожиев Ш.Т., Тураев Б.Э., Рахимов И.Т., Косимов И.О., Муродкobilов Д.М., Шукурова А.А. «Перспективы развития наноэлектроники в узбекистане» международная научно-техническая конференция «Инновационные проблемы в сфере технических и технологических наук». ст. 55. г.Термиз-22 сентябрь 2020 г.