ҚАРШИ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ҚАРШИ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

МУСТАФОЕВА НОДИРА МОЙЛИЕВНА

ИОН ИМПЛАНТАЦИЯ ВА ЮҚОРИ ВАКУУМЛИ ЎТҚАЗИШ УСУЛЛАРИ БИЛАН ОЛИНГАН СИЛИЦИД НАНОПЛЁНКАЛАРНИНГ СТРУКТУРАСИ ВА ЭЛЕКТРОН ХУСУСИЯТЛАРИ

01.04.04 – Физик электроника

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

Қарши – 2022

УДК: 537.533.537.534;

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

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

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

Мустафоева Нодира Мойлиевна
Ион имплантация ва юқори вакуумли ўтқазиш усуллари билан олинган силицид наноплёнкаларнинг структураси ва электрон хусусиятлари 3

Мустафоева Нодира Мойлиевна
Структура и электронные свойства нанопленок силицидов полученные методами высоковакуумного осаждения и ионной имплантация 23

Mustafoeva Nodira
Structure and electronic properties of silicide nanofilms obtained by high vacuum deposition and ion implantation 42

Эълон қилинган ишлар рўйхати
Список опубликованных работ
List of published works 46

ҚАРШИ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ҚАРШИ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

МУСТАФОЕВА НОДИРА МОЙЛИЕВНА

ИОН ИМПЛАНТАЦИЯ ВА ЮҚОРИ ВАКУУМЛИ ЎТҚАЗИШ УСУЛЛАРИ БИЛАН ОЛИНГАН СИЛИЦИД НАНОПЛЁНКАЛАРНИНГ СТРУКТУРАСИ ВА ЭЛЕКТРОН ХУСУСИЯТЛАРИ

01.04.04 – Физик электроника

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

Қарши – 2022

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2020.2.PhD/FM506 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Қарши давлат университети ва Тошкент давлат Техника университетида бажарилган.

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

Илмий раҳбар:	**Ташатов Алланазар Каршиевич** физика-математика фанлари доктори,профессор
Расмий оппонентлар:	**Тураев Эргаш Юлдошевич** физика-математика фанлари доктори, профессор
	Бекпулатов Илхом Рустам ўғли физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD), доцент
Етакчи ташкилот:	**У.А. Арифов номидаги Ион-плазма ва лазер технологиялари институти**

Диссертация ҳимояси Қарши давлат университети ҳузуридаги илмий даражалар берувчи PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 рақамли илмий кенгашнинг 2022 йил «____» _____ соат ____ даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 180119, Қарши шаҳри, Кўчабоғ кўчаси, 17-уй. Тел./факс: (99875) 225-34-13, email: kardu@mail.ru.)

Диссертация билан Қарши давлат университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (_____ рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 180119, Қарши шаҳри, Кўчабоғ кўчаси, 17-уй. Тел./факс: (99875) 225-34-13.

Диссертация автореферати 2022 йил “___” _____ куни тарқатилди.
(2022 йил “___” _____ даги №___ рақамли реестр баённомаси).

Нормурадов М.Т.
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., профессор

Аллаярова Г.Х.
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш илмий котиби,ф.-м.ф.ф.д. (PhD)

Донаев С.Б.
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси ўринбосари, DSc, доцент

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Ҳозирги вақтда дунёда инсонларнинг технологияларга бўлган талаблари ортиб бориши билан Si юзасида ҳосил қилинган $MeSi_2/Si$ типидаги наноплёнкаларнинг гетероструктуралари, улар ёрдамида ўта юқори частотали транзисторлар ва интеграл схемалар, нурланиш детекторлари, оптоэлектрон қурилмалар, юпқа омик контактлар ва барьерли (тўсиқли) МДП, ПДП-структуралар яратиш физик электроника сохасида истиқболли натижаларга эришишда янги имкониятлар яратади. $MeSi_2/Si$ типидаги гетероструктураларнинг электрон тузилиши ва мос равишда уларнинг оптик ва электрик хусусиятлари нанообъектларнинг ўлчамлари ва таркибига боғлиқлигини ўрганиш жадал тарзда ривожланиб бормоқда. Инсоният фойдаланадиган қурилмаларининг ҳажми кичикроқ имкониятлари янада кўпроқ бўлишини хоҳлайди. $MeSi_2/Si$ типидаги гетероструктураларнинг электрон структуралари ва мос равишда уларнинг оптик ва электрик хусусиятлари нанообъектларнинг ўлчамлари ва таркибига боғлиқлигини ўрганиш кўплаб сохаларда иқтисодиёт, тиббиёт, экология, авиатция ва радиоэлектроника сохаларида янги имкониятлар эшигини очиб берганлиги сабабли жаҳонда муҳим хисобланади.

Жаҳонда нанотехнологиянинг асосий ютуқларидан кенг фойдаланилаётганлигига қарамасдан, бу ишлар ҳали бошланғич босқичда турибди. Шу сабабли дунёнинг илғор давлатларида нанотехнология соҳасидаги тадқиқотларга катта эътибор қаратилмоқда. Хусусан, Si юза ва юзаости қатламларида наноўлчамли $MeSi_2$ структураларининг ҳосил бўлиш механизмларини аниқлаш ва уларни олиш, шунингдек, уларнинг таркиби, тузилиши ва физик хусусиятларини аниқлашга катта эътибор қаратилмоқда.

Республикамизда янги электрон қурилмалар, қуёш элементларини, жумладан, интеграл микросхемалар яратишга катта эътибор қаратилмоқда. Кремний монокристаллининг электрон структураси ва оптик хусусиятларига юза тартиблашмаганлигининг таъсири, Si (111) монокристаллини қаттиқ фазали Ni билан қоплаш ва кейинги қиздириш жараёнида наноўлчамли $NiSi_2$ плёнкалари шаклланиши, $NiSi_2/Si$ (111) плёнкаларининг қаттиқ фазали эпитакцияси жараёнларида юза тузилиши, электрон ва кристалл ҳолатлари, оптик ва электрофизик хусусиятларини аниқлаш қонуниятлари, Si (111) нинг юза ва юза ости қатламларида кичик энергияли ион имплантацияси жараёнида $NiSi_2$ плёнкалари ҳамда нанокристалл фазалар шаклланиш механизмларини олиш, $NiSi_2$ системасининг структураси ва зона-энергетик параметрларини аниқлаш муҳим илмий-амалий аҳамият касб этади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2017 йил 13 февралдаги ПҚ-2772-сон «2017-2021 йилларда электротехника саноатини бошқаришни янада такомиллаштириш, жадал ривожлантириш ва диверсификация қилиш чора-тадбирлари тўғрисида»ги ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон «Фанлар академияси фаолияти, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва

молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида» ги, 2019 йил 22 августдаги ПҚ-4422-сон “Иқтисодий ва ижтимоий соҳаларнинг энергия самарадорлигини ошириш, энергия тежайдиган технологияларни жорий этиш ва қайта тикланадиган энергия манбаларини ривожлантириш бўйича тезкор чора-тадбирлар тўғрисида”ги қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация иши муайян даражада хизмат қилади.

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

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Сўнги йилларда силицид плёнкалари, хусусан, $CoSi_2$ ни олиш, уларнинг таркиби, структуралари ва хусусиятларини ўрганиш масалаларига жуда кўп ишлар бағишланган. Ушбу системаларда силицид плёнкаларининг қалинлиги 30−50 nm дан кичик эмас. Плёнкалар қалинликларини камайтириш 100 GHz дан ортиқ, чегаравий частоталарда ишлайдиган интеграл схемалар ва юқори частотали транзисторларни яратишда янги имкониятлар очиб беради. Ярим ўтказгичлар юзада $d < 5-10$ nm қалинликдаги нанокристаллар ва наноплёнкаларни олишнинг истиқболли методларидан бири кичик энергияли ион имплантацияси ҳисобланади.

Migas D.B. ва бошқалар ҳисоблаш йўли билан FLAPW-GGA тўла потенциал методида $BaSi_2$ нинг зонавий структурасини олишди. Ajmal Khan, Yoji Imai ва бошқалар назарий тадқиқотлар орқали B, C, N ва F лардан легирловчи қўшимчалар сифатида фойдаланиш энергетик жиҳатдан афзалроқ эканлигини кўрсатиб беришди. Сўнгги йилларда Si юзада яратилган $BaSi_2$ наноструктураларига бўлган қизиқиш фотоэлектрон ўзгартиргичлар учун истиқболли материал сифатида ишлатилиш мумкинлиги сабабли кескин ортди. Хусусан, В.Л.Дубов ва Д.В.Фоминлар ўзларининг таҳлилий мақолаларида *p*-$BaSi_2$/*n*-Si асосидаги юпқа плёнкали ФЭЎ ларнинг етарлича юқори ФИК га ~ 9-10 % эга эканлигини кўрсатиб беришди.

$CoSi_2$/Si типидаги наноплёнкали системаларни олиш ва уларнинг оптик, электр ва магнит хусусиятларини ўрганиш бўйича W.S.Cho, М.В.Гомонова ва U.Starke лар шогирдлари билан биргаликда фаол иш олиб боришмоқда. Улар томонидан $CoSi_2$/Si субмоноқатламли плёнкаларининг шаклланиши механизмлари ва асосий қонуниятлари аниқланди. Institute of Semiconductor Electronics (Германия) институтининг ходимлари Facsko S. Ва бошқалар 420 эВ энергияли Ar^+ ионлари билан бомбардимон қилиш жараёнида GaSb (100) юзада 35 нм диаметрли квант нуқталардан гексогонал кристалл структураларни олишди.

GaAlAs/GaAs гетероструктураларда квант-ўлчам эффектларининг намоён бўлишини биринчи марта Р.Дингл ва В.Вигманлар кузатишди. Сўнгра Х.В.Ченг оптоэлектрониканинг махсус қурилмалари ва қаттиқ жисмли лазерларда қўлланиладиган GaAs асосидаги даврий гетероструктураларни олди. Ж.И.Алферов томонидан GaP асосида худди шунга ўхшаш кўп қатламли системалар яратилди.

Проф. М.Т.Нормуродов, Б.Е,Умирзаковлар шогирдлари билан биргаликда қиздириш усули билан ион имплантация методини қўшиб биринчи марта $CoSi_2/Si/CoSi_2/Si$, CdBaTe/CdTe/CdBaTe/CdTe типидаги кўп қатламли системани олишди ва уларнинг электрон ва кристалл структураларини, эмиссион ва оптик хусусиятларини ўрганишди. Шунингдек улар томонидан берилган физик хусусиятларга эга бўлган наноструктуралар шаклланиши механизмлари аниқланди. Лекин, ҳозирги вақтга қадар Si нинг юза ва юзаости қатламларида $NiSi_2$ нинг наноўлчамли фазалари ва қатламларини олиш имконияти тўғрисидаги ишончли маълумотлар йўқ. $NiSi_2/Si$ системаларини олиш ва уларнинг хусусиятларини ўрганишга бўлган қизиқиш яна шу билан характерлики, $NiSi_2$ ва Si лар кубик панжарага эга бўлиб, уларнинг панжара доимийлари амалда бир-биридан диярли фарқ қилмайди (a_{Si}≈5,41 Å, a_{Ni}≈5,42 Å) ва $NiSi_2/Si(111)$ чегарасида мос келмайдиган нуқсонлар юзага келмайди. Бундан ташқари $NiSi_2$ нинг солиштирма қаршилиги ~ 50-60 мкОм·см ни ташкил қилади. Шу сабабли, гетероэпитакциал МДП и ПДП системаларни яратишда бу структуралар ўта истиқболли ҳисобланади.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Қарши давлат университетининг илмий-тадқиқот ишлари режасининг “Микро ва наноўлчамли плёнкаларни қаттиқ жисмлар юзада хосил қилиш, уларнинг структураси ва хоссаларини ўрганиш” мавзуси (2017-2022) доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади қаттиқ фазадан қоплаш ва ион бомбардировка жараёнларида Si нинг юза ва юзаости қатламларида $NiSi_2$ нинг наноўлчамли фазалари ва қатламлари шаклланишининг физик қонуниятларини, уларнинг таркиби, электрон ва кристалл структуралари, эмиссион ва оптик хусусиятларини очиб беришдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

Ar^+ ионлари билан бомбардимон қилиш жараёнида кремний монокристаллининг электрон структураси ва оптик хусусиятларига юза тартиблашмаганлигининг таъсирини кўрсатиб бериш;

Si (111) монокристаллини қаттиқ фазали Ni билан қиздириш орқали қоплаш жараёнида наноўлчамли $NiSi_2$ плёнкалари шаклланиши қонуниятларини очиб бериш;

$NiSi_2/Si$ (111) плёнкаларининг қаттиқ фазали эпитакцияси жараёнларида юза морфологияси, электрон ва кристалл структуралари, оптик ва электрофизик хусусиятларини аниқлаш;

Si (111) юзада кейинги қиздириш билан кичик энергияли (E_0 = 0.5-5 кэВ) ион имплантацияси жараёнида $NiSi_2$ пленкалари хамда нанокристалл фазалар шаклланиш механизмларини аниқлаштириш ва уларни олиш. Si нинг $NiSi_2$ нанокристаллар ва нанопленкалар билан биргаликдаги морфологияси, структураси ва электрон хамда оптик хусусиятларини очиб бериш;

Si (111) мнокристаллининг турли чуқурликларида яширин нано ўлчамли $NiSi_2$ структуралар шаклланиши қонуниятларини ва уларнинг тақиқланган зоналар кенгликларининг нанофазалар ўлчамларига боғлиқлигини аниқлаш;

ҚФЭ усули ёрдамида Si(111) юзасида ўстирилган $NiSi_2$ плёнкасининг электрон стуктуралари, морфологияси ва таркибини кўрсатиб бериш;

$NiSi_2$ нинг тўртқатламли гетероструктураларини олиш методикасини такомиллаштириш, системанинг структураси ва зона-энергетик параметрларини аниқлаш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида Si намуналари ва унинг монокристалл плёнкалари $NiSi_2$ ларнинг нанофазалари ва наноқатламлари олинган.

Тадқиқотнинг предмети кремнийнинг юза ва юзаости соҳаларида наноўлчамли металл силицидларнинг шаклланиш қонуниятлари ҳисобланади.

Тадқиқотнинг усуллари. Диссертацияда электрон оже-спектроскопияси (ЭОС), эластик сочилган электронлар спектроскопияси (ЭСЭС), характерли энергия йўқотган электронлар спектроскопияси (ХЭЙЭС), фотоэлектронлар спектроскопияси (ФЭС), кичик энергияли электронлар дифракцияси (КЭЭД) ва растрли электрон микроскопия (РЭМ). УФЭС, ОЭС, ёруғлик ютилиши спектроскопияси, АКМ таҳлил усулларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

Si монокристаллини Ar^+ ионлари билан бомбардимон қилиш жараёнида юза тартибсизланиши оптик параметрлар ўзгаришининг асосий сабаби эканлиги аниқланган;

$NiSi_2$ пленкасини ҚФЭ усулида 180-250 Å қалинликгача ўстиришда оролчалар кўринишидаги ўсиши $h_{NiSi_2} \geq 250$ Å бўлганда эса узлуксиз плёнка шаклланиши орқали $NiSi_2$/Si(111) плёнкаларидаги ҚФЭ нинг юза морфологияси, таркиби, электрон ва кристалл структуралари ишлаб чиқилган;

$NiSi_2$/Si(111) плёнкаларини T≈1000-1400 К температура оралиғида қиздириш жараёнида улар морфологиясининг ўзгариш қонуниятлари, таркиби ва электрон структуралари аниқланган;

Si(111) нинг турли қалинликларида юзага келадиган $NiSi_2$ нинг яширин нанофаза ва наноқатламлари олинган ва уларнинг таркиби, тақиқланган зонаси 0,6 эВ га тенглиги, энергетик зоналарнинг параметрлари ва валент зонадаги электронлар тақсимот зичлиги ҚФЭ усулида аниқланган;

Ni ни Si га имплантация қилиш ва кейинги қиздириш йўли билан $NiSi_2/Si/NiSi_2/Si(111)$ тўрт қатламли эпитакциал наноқатламли системанинг шаклланиш жараёни аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

Ni ионларини Si нинг юза ва юзаости қатламларига имплантацияси орқали силицидларнинг наноструктуралари олинган, уларнинг тарқиби, ўлчамлари, кристалл ва электрон структуралари аниқланган;

электрон техникада янги асбоб-ускуналар яратишда, қуёш элементларида ёруғликни ютилиш чегарасини (0.58эВ дан бошлаб) кенгайтириш ва бу орқали ФИКни оширишда истиқболли бўлган кўп қатламли $NiSi_2/Si/NiSi_2/Si(111)$ системалари шаклланишининг оптимал режимлари аниқланган.

Тадқиқот натижалари ишончлилиги тадқиқотлар зарур тажрибалар статистикаси, ўлчов ва маълумотларни қайта ишлашнинг бир-бирини тўлдирувчи замонавий усуллардан фойдаланиш билан, шунингдек, тоза Si намуналари бўйича бошқа муаллифларнинг олган натижаларига таққослаш билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти Si нинг юза ва юзаости қатламларида шаклланган $MeSi_2$ нинг наноўлчамли структураларининг электрон структураси, оптик ва эмиссион тавсифлари бўйича олинган янги тадқиқот натижалари квант ўлчамли материалларни ўстириш ва янги кўп гетероструктураларни яратишда фундаментал база эканлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти яратилган услублар $MeSi_2$ нинг яширин қатламларини яратиш ва уларнинг оптик хусусиятлари, зоналар параметрларини тадқиқ қилиш, келгусида бошқа материаллар учун ҳам қўлланилиши мумкинлиги билан, олинган натижалар функционал электроника қурилмалари учун янги кўпқатламли гетероструктуралар яратишда истиқболларга эгалиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларнинг жорий қилиниши. Ион имплантация ва юқори вакуумли ўтқазиш усуллари билан олинган силицид наноплёнкаларнинг структураси ва электрон хусусиятлари бўйича олинган илмий натижалар асосида:

$NiSi_2/Si(111)$ плёнкаларини T≈1000-1400 К температура оралиғида қиздириш жараёнида улар морфологиясининг ўзгариш қонуниятлари, таркиби ва электрон структуралари кўрсатиб берилишига доир илмий хулосаларидан ОТ–Ф3–13 «Кремний – силицид – металл эркин кўпқатламли наноплёнкали структураларнинг шаклланиш механизмлари ва уларнинг электрон ва кристалл структураларини ўрганиш» номли фундаментал лойиҳасини бажаришда фойдаланилган. (ЎзР ФА нинг 2022 йил 19 январ “2/1255-122-сон маълумотномаси). Натижада FinFET трансизторининг оксид- яримўтказгич чегарасида қамралган якка заряднинг ўтиш токига таъсирни моделлаш имконини берган;

Ni ни Si га имплантация қилиш ва кейинги қиздириш йўли билан $NiSi_2/Si/NiSi_2/Si(111)$ тўрт қатламли эпитакциал наноқатламли системанинг шаклланиш жараёни аниқланишига оид илмий хулосаларидан “Ўзэлтехсаноат” АК нинг “Фотон” АЖ да ишлаб чиқариладиган электрон компонентларни контактли пайвандлашда қўлланилган. (“Ўзэлтехсаноат” АКнинг 2021 йил 05 октябрдаги 362-сон маълумотномаси). Натижада киришма атомлари билан лигерланган кремний асосида ёруғликка сезгирлиги юқори бўлган датчиклар олиш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари 12 та халқаро ва 5 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 22 та илмий иш чоп этилган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 5 та мақола, жумладан, 2 та республика ва 3 таси хорижий журналларда нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация иши кириш, тўртта боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйхати, 59 та расм, 4 та жадвалдан иборат. Диссертациянинг ҳажми 126 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯ ИШИНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг аҳамияти ва долзарблиги асослаб берилган, тадқиқотларнинг республикадаги фан ва технологиялар ривожланишининг асосий йўналишлари билан боғлиқлиги аниқланган, диссертация мавзуси бўйича халқаро миқёсдаги илмий изланишлар, муаммонинг ўрганилганлик даражаси ҳақида умумий маълумотлар келтирилган, мақсад ва вазифалар белгиланган, тадқиқот объекти, предмети ва услублари кўрсатиб берилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги баён қилинган, ишнинг апробацияси ва натижаларнинг татбиқ этилиши, шунингдек диссертациянинг ҳажми ва тузилиши ҳақидаги қисқача маълумотлар келтирилган.

«Кремний асосида олинган наноўлчамли структураларни олиш ва уларнинг хусусиятларини ўрганиш бўйича адабиётларда келтирилган изланишларнинг қисқача таҳлили» номли биринчи бобда кремний ва унинг асосидаги бирикмаларнинг эмиссион ва оптик хусусиятларини ўрганиш, Si нинг юза ва юзаости қатламларида наноўлчамли фазаларни олишда ион бомбардировкадан фойдаланиш, кўп қатламли плёнкаларнинг структурасини ва хусусиятларини ўрганиш мақсадида олиб борилган илмий тадқиқотларнинг янги натижалари таҳлил қилинган.

Экспериментал тадқиқот натижаларининг қисқача таҳлили шуни кўрсатадики, диссертация ишни бошлаган вақтимизгача Si нинг юза ва юзаости соҳаларида $NiSi_2$ наноўлчамли фазалари ва қатламлари олинмаган ва уни синтез қилишнинг оптимал шароитлари аниқланмаган, Si (111) нинг

электрон ва оптик хусусиятларига юпқа юза қатламларидаги тартиблашмаганликларнинг таъсири, $NiSi_2$ ларнинг наноструктуралари ҳосил бўлишининг электрон ва кристалл структуралар хусусиятларига таъсири, қаттиқ фазали эпитакция ва ион имплантациялари методларида олинган $NiSi_2$/Si наноплёнкаларининг юза морфологияси, эмиссион, оптик ва электрофизик хусусиятлари ўрганилмаган, Si нинг юзаости соҳасининг турли чуқурликларида яратилган $NiSi_2$ нанокристалларининг ман қилинган зоналари кенглиги аниқланмаган, $NiSi_2$ нинг нанокристаллари ва қатламларида квант-ўлчам эффектларининг намоён бўлиши тўғрисида ҳеч қандай маълумот йўқ эди.

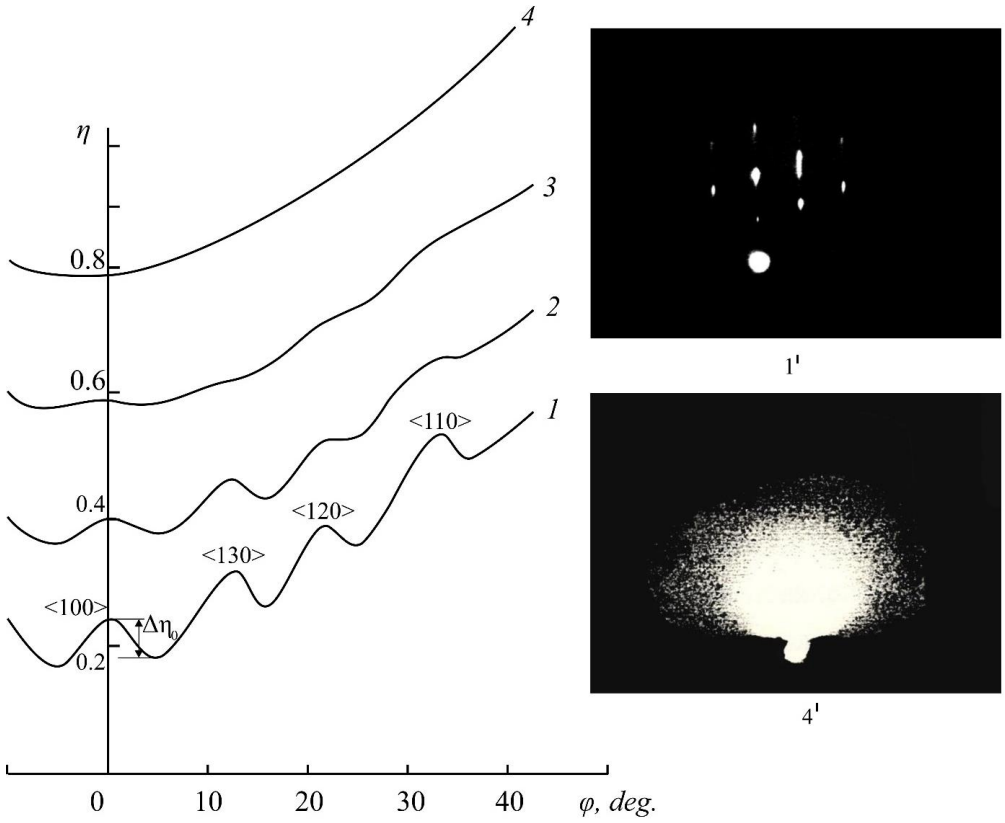
«Экспериментал тадқиқот методикаси» номли иккинчи бобда ион легирлаш ва материалларнинг юзай хусусиятларини комплекс тадқиқ қилиш имконини берувчи юқори вакуумли экспериментал қурилманинг конструкцияси ва ишлаш принциплари баён қилинган. Шунингдек бу ерда LAS-2200 стандарт экспериментал қурилманинг ҳам тавсифи келтирилган. Тадқиқотлар қуйидаги: иккиламчи электрон эмиссия (ИЭЭ) коэффициенти ва фотоэлектронлар квант чиқишининг энергетик боғланишларини ўрганиш, Оже-электрон спектроскопия (ОЭС), эластик қайтган секин электронлар эмиссияси спектроскопии (ЭҚСЭЭС), электронларнинг характеристик энергия йўқотишлари спектроскопияси (ЭХЭЙС), ультрабинафша фотоэлектрон спектроскопияси (УБЭС), шунингдек растрли электрон микроскопия (РЭМ), атом-куч микроскопияси (АКМ) ва тез электронлар дифракцияси (ҚФЭ) методларидан фойдаланиб амалга оширилган.

«Қаттиқ **фазали эпитакция ва ион имплантация методларида олинган $NiSi_2$ нано плёнкаларининг юза морфологияси, таркиби, структураси, электрон ва оптик хусусиятлари** номли учинчи бобда Si (111) нинг оптик ва эмиссион хусусиятларига юпқа юзай қатламлардаги тартиблашмаганликларнинг таъсири, қаттиқ фазали эпитакция усулида олинган $NiSi_2$/Si плёнкаларнинг юза морфологияси, Si да қиздириш билан биргаликда Ni ионлари имплантациясини амалга ошириш орқали олинган $NiSi_2$/Si, наноплёнкаларининг электрон ва оптик хусусиятлари, таркиби ва энергетик зона параметрларининг легирланган қатлам чуқурлигига боғлиқлиги ва $NiSi_2$/Si(111) юпқа плёнкаларининг морфологиясига ўстиришдан кейинги қиздириш таъсирларини тадқиқ қилиш натижалари келтирилган.

1-расмда турли дозалардаги E_0 = 1 кэВ энергияли Ar^+ ионлари билан бомбардимон қилинган Si (111) учун дастлабки электронларнинг E_p = 500 эВ ларида ўлчанган η коэффициентнинг бурчакга боғланишлари келтирилган.

η(φ) боғланиш монокристаллар юзанинг тартиблашиш даражаси тўғрисида тўла маълумот беради. ОЭС натижалари ион бомбардировка жараёнида юза таркибининг ўзгармаслигидан далолат беради. Тоза Si(111) нинг η(φ) боғланишида φ нинг ортиши билан бир қаторда η нинг ортиши ҳамда, маълум кристаллографик йўналишларга мос ҳолдаги қатор максимумлар ҳам кузатилар экан. Энг катта максимум Si(100) йўналишига

мос келиши φ = 0 да кузатилади. Биринчи максимум ва минимум орасидаги $\Delta\eta_0$ қийматлар 0.07 ни ташкил қилди. Ионлар дозасининг ортиши билан η(φ) боғланишлардаги нозик структура силлиқлашади ва D = $5\cdot10^{16}$ $см^{-2}$ да тўла йўқолади (4 эгри чизиқ).



1-расм D, $см^{-2}$: 1 и $1^{/}$ – D = 0; 2 – D = $5\cdot10^{14}$; 3 – D = $5\cdot10^{15}$; 4 и $4^{/}$ – D = $5\cdot10^{16}$ $см^{-2}$ дозаларда E_0=1 кэВ энергияли Ar^+ ионлари билан бомбардимон қилинган Si/CaF_2 (111) плёнкалари учун E_p=500 эВ да олинган η(φ) боғланишлар (1-4 эгри чизиқлар) ва плёнка юзанинг ЭТД тасвирлари келтирилган

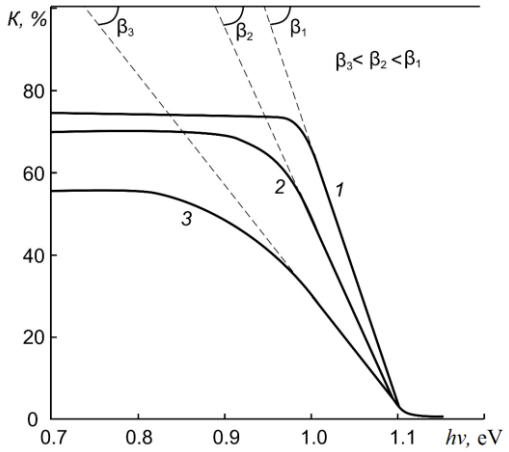
Ушбу дозаларда ЭТД да тасвир рефлекслар (1 вставка$^{/}$) ўрнига аморф моддалар учун характерли бўлган битта катта доғ билан алмашади($4^{/}$ вставка). Дозанинг кейинги камайтирилишлари ЭТД ва η(φ) боғланишларнинг сезиларли ўзгаришларига олиб келмайди.

Si (111) юзаости қатламининг тартибсизлашуви натижасида ёруғликни ўтказиш коэффициенти К барча текширилаётган фотонлар энергиялари (hν = 0.4 – 1.5 эВ) соҳасида камаяди ва бу ўз навбатида К*(hν)* боғланишнинг тўғри чизиқли қисми крутизнасининг камайишига олиб келади (2-расм).

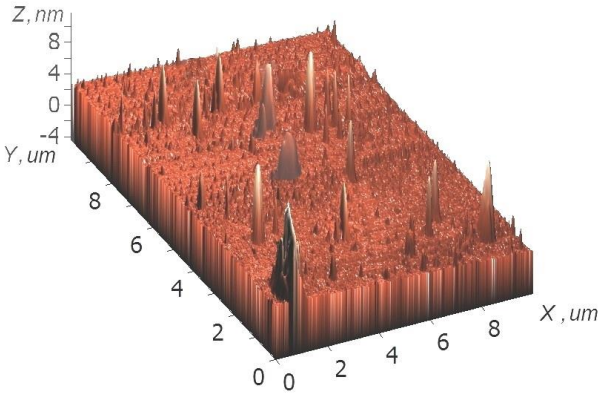
Ёруғлик ютилиши ҳолида экспоненциал қисми учун α ютилиш коэффициентининг фотонлар энергиясига боғлиқлигини экспоненциал қисми учун энергияси фотонлар CdSeS кристалли учун қуйидаги формула ёрдамида баҳолаш мумкин:

$$\alpha = \alpha_0 e^{\frac{-(E_g - h\nu)}{E_0}} \qquad (1)$$

бу ерда E_0 – эгрилик четини аниқловчи ва атомлар орасидаги масофа катталиклари флуктациялари тўғрисида ахборот берувчи характеристик энергия. 3-расмдан кўринадики, ~ 50 Å (№ 1 намуна) қалинликдаги $NiSi_2$ оролчалар шаклида ҳосил бўлиш характерига эга экан. Бу оролчалар конус (ёки пирамида) шаклига эга бўлиб уларнинг баландлиги 7 – 8 нм гача етади.



2-расм. D, см$^{-2}$: 1 – 0; 2 – $5\cdot10^{15}$; 3 – $5\cdot10^{16}$ дозаларда E_0 = 1 кэВ энергияли Ar^+ ионлари билан бомбардимон қилинган Si(111) плёнкалари учун *K*(h*ν*) боғланишлар

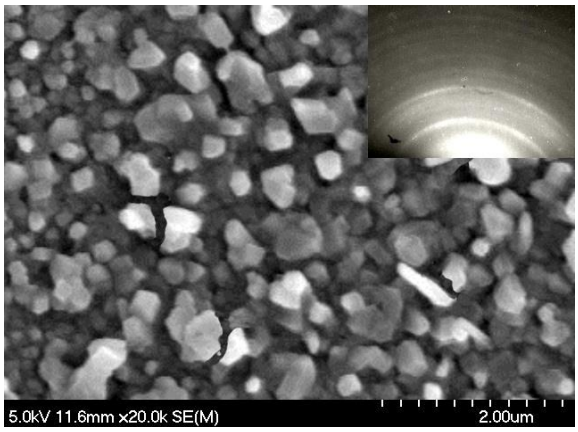


3-расм. 50 Å қалинликдаги $NiSi_2$ плёнкали Si (111) юзанинг АКМ да олинган тасвири

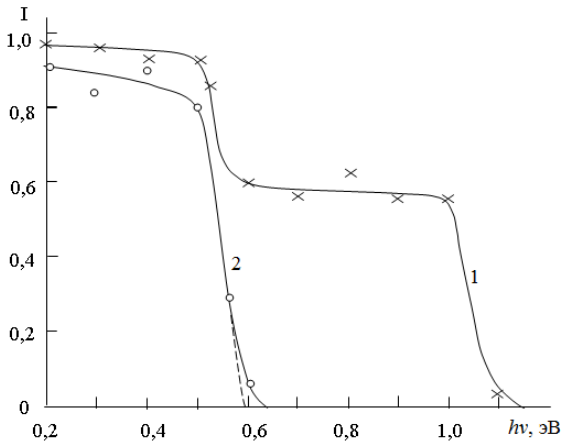
Плёнка қалинлигини (қаттиқ фазали қоплаш вақти) кейинга орттиришлар асосий оролчалар баландликларининг сезиларли ортишига олиб келмади. Бу ҳолда катта ўлчамли оролчаларнинг катталашиши ва кичик ўлчамли оролчаларнинг уч ўлчамининг ортиши кузатилди. h = 150 Å баландликга эга $NiSi_2$ плёнка ҳолида амалда Si юзанинг 80 – 85 % $NiSi_2$ оролчалари билан қопланади (4-расм). Оролчаларнинг ўлчамлари 0,3 – 0,5 мкм ни ташкил қилади. Бу ҳолда ЭТД да поликристалл намуналарга хос бўлган концентрик халқалар кузатилди. T = 800 K температурада қиздиргандан сўнг плёнканинг кристалланиши содир бўлади, лекин алоҳида олинган кристалл фазаларнинг кристаллографик йўналишлари ўзаро мос тушмайди.

5-расмда h = 50 Å баландликга эга $NiSi_2$ наноплёнкали Si учун ўтган ёруғлик интенсивлиги *I* нинг фотонлар энергиясининг hν га боғлиқлиги келтирилган. Баландлиги h = 50 Å эга $NiSi_2$ наноплёнкали Si ҳолида hν нинг икки қийматида ўтувчи ёруғлик интенсивлигининг кескин камайиши кузатилади. hν = 0,5 эВ дан бошлаб *I* нинг камайиши $NiSi_2$ нанооролчалар билан қопланган участкалардаги ёруғлик ютилиши билан, hν = 1 эВ энергия билан *I* нинг камайиши – $NiSi_2$ нинг нанооролчалари билан беркитилмаган соҳалари билан боғлиқ. Бу эгри чизиқларнинг hν ўқига экстраполяцияси шуни кўрсатадики, $NiSi_2$ учун E_g нинг қиймати ~ 0,6 эВ, Si учун эса- ~ 1,1

эВ. $NiSi_2$ нинг узлуксиз плёнкаси ҳолида *I* нинг қиймати hν = 0,5 – 0,6 эВ оралиғ дан 0 гача кескин камаяди.



4-расм. Қалинлиги 150 Å (№ 3 намуна) бўлган $NiSi_2$ плёнкали Si юзанинг учун РЭМ ва ЭТД даги тасвири.



5-расм. Қалинлиги h, Å: 1 – 50 (№ 1 намуна), 2 – 200 (№ 4 намуна) бўлган $NiSi_2$ плёнкали Si учун *I*(h*ν*) боғланишлари.

1- Жадвалда $NiSi_2$/Si(111)да шаклланган ҚФЭ ларнинг оптимал режимлари ва уларнинг солиштирма қаршиликларининг қийматлари келтирилган.

1-жадвал

Намуна	h_{Ni}, Å	h_{NiSi_2} $\overset{0}{A}$	$T_{эпит.}$,K	Пленка тури	ρ, мкОм·см
1	15 – 20	50	800	оролчали	$2\cdot10^5$
2	35 – 40	100	850	оролчали	$5\cdot10^2$
3	50 – 60	150	850	оролчали	–
4	80	200	900	узлуксиз,б.ж.б*	100
5	200	550	950	бир жинсли**	50

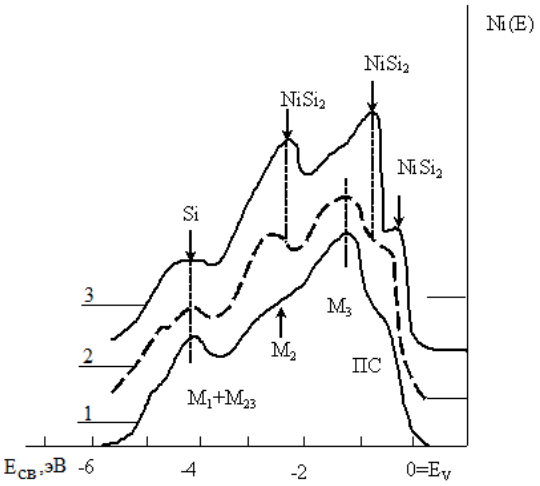
Кўриниб турибдики, оролчалар шаклидаги плёнкалар ҳолида ρ нинг қиймати жуда юқори. $h_{NiSi_2} = 200\overset{0}{A}$ да узлуксиз плёнка шаклланади, лекин ρ нинг қиймати 550 Å қалинликдаги плёнканикидан озгина каттароқ.Бунга сабаб, қалинлик h = 200 Å бўлганда плёнка ҳали мукаммал шаклланишга эга бўлмайди.

6-расмда hν = 10,8 эВ энергияда олинган $NiSi_2$ нанокристаллари ва наноплёнкаларига эга Si ва р-типдаги Si (111) ларнинг фотоэлектрон спектрлари келтирилган. Кўриниб турибдики, қалин $NiSi_2$ (h = 200 Å) плёнкаларининг асосий чўққилари ҳолати ва шакли Si учун олинган чўққилар ҳолати ва шаклидан сезиларли даражада фарқ қилади. Бу ҳолда спектрда $E_{св}$ = – 0,3; – 0,9; – 2,2 ва – 4,2 эВ энергияли чўққилар кузатилади..

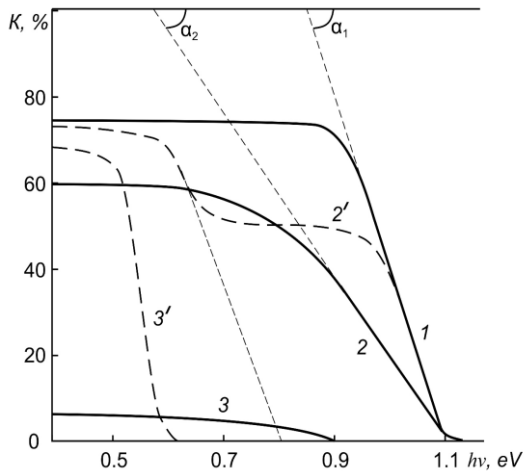
Бу спектрнинг таҳлили ва уни Si ва Ni спектрлари билан солиштириш $E_{св}$ = – 0,3 эВ ли чўққи кремнийнинг M_3 ҳолати ва Ni нинг M_5 ҳолати

гибридлашуви туфайли шаклланади, $E_{св}$ = – 0,9 эВ – ли чўққи эса кремнийнинг M_2 ҳолати ва Ni нинг M_3 ҳолати, $E_{св}$ = – 2,2 эВ – кремнийнинг M_1 ҳолати ва Ni нинг $M_{4,5}$ ҳолати гибридлашуви натижасида шаклланади. $E_{св}$ = – 4,2 эВ ли чўққи эса , Si га тегишли деб фараз қилиш имконини беради. h = 50 Å баландликга эга $NiSi_2$ плёнка оролчалар кўринишидаги характерга эга, шу сабабли унинг спектрида Si га ҳам, $NiSi_2$ га ҳам характерли бўлган чўққилар кузатилади.

7-расмда D = 10^{15} ва $6{\cdot}10^{16}$ $см^{-2}$ дозаларда E_0 = 1 кэВ энергияли Ni^+ ионлари билан легирланган Si (111) учун K(hν) боғланиш графиклари келтирилган. D = 10^{15} $см^{-2}$ дозада Si (111) юзада NiSi и $NiSi_2$ типидаги бирикмалар ва асосан Si, Ni ларнинг боғланмаган атомларидан ташкил топган алоҳида-алоҳида кластер фазалари шаклланади. Амалда бу фазалар орқали ёруғлик ўтмайди, шу сабабли K нинг қиймати 40 – 50 % ларгача кескин камаяди, яъни айтиш мумкинки бу фазалар билан юзанинг қопланиш даражаси ~ 0.4 ни ташкил қилади.



6-расм. Қалинлиги h, Å: 1 – 0, 2 – 50, 3 – 200 бўлган $NiSi_2$ плёнкали Si нинг УБЭС лари .

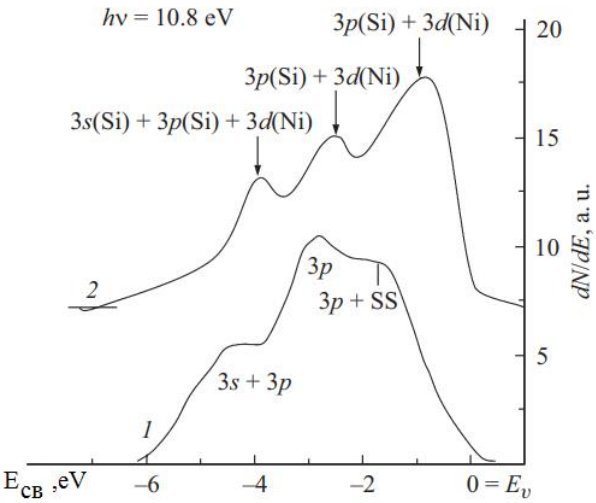


7-расм. E_0 = 1 кэВ энергияли Ni^+ ионлари билан имплантация қилинган Si(111) учун K(hν) боғланиш графиклари D, $см^{-2}$: 1 – 0; 2 –10^{15}; 3 – $6{\cdot}10^{16}$ дозаларда ва кейин T=900K ҳароратда қиздиргандан сўнг 2′ ва 3′.

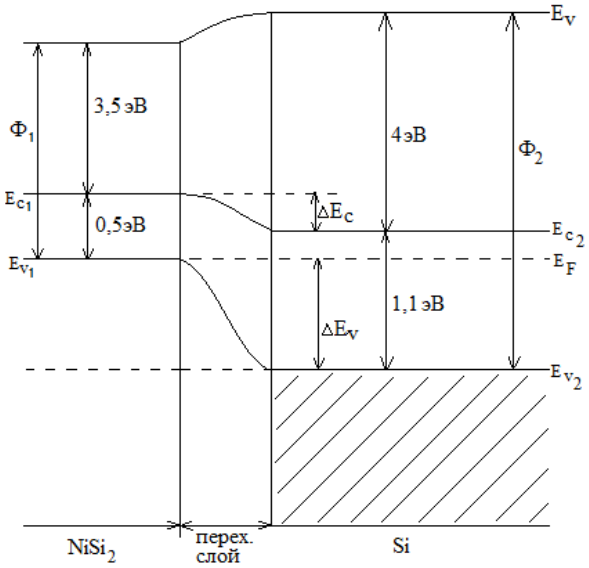
D = $D_{sat.}$ = $6{\cdot}10^{16}$ $см^{-2}$ дозаларда hν ≤ 0.5 – 0.6 эВ да ўтувчи ёруғлик интенсивлиги ~ 8 – 10 % ни ташкил қилади, hν ≥ 0 да эса –3 – 5 % дан ортмади. Бизнингча, NiSi, $NiSi_2$ типидаги бирикмалар ва Si нинг боғланмаган атомларининг маълум миқдорда мавжудлиги (~ 15 – 20 ат.%) ёруғликнинг кичик интенсивликда ўтишига сабаб бўлади. Ni ионлари имплантацияси жараёнларида аморфизация билан бир қаторда юзаости қатламлари таркиби ўзгаради E_g нинг қиймати 0.2 – 0.3 эВ гача камаяди, мос равишда K(hν) боғланиш эгри чизиғининг экспоненциал қисми ошади. Айнан шу

намуналарни T = 900 K температурада қиздиргандан сўнг Si нинг юза қатламларида 50 – 60 Å қалинликдаги $NiSi_2$ нинг эпитакциал нанокристалл фазалари ва плёнкалари шаклланади. Демак К(hν) боғланишнинг структураси кескин ўзгаради ($2^{/}$ ва $3^{/}$ эгри чизиқлар). Бу чизиқларнинг hν ўқига экстраполяцияси шуни кўрсатадики, ушбу ҳолда $NiSi_2$ нанокристалининг E_g си 0.8 эВ ни, наноплёнканики эса– 0.6 эВ ни ташкил қилади. Кристаллашиш К нинг сезиларли даражада ортишига олиб келади.

$NiSi_2$ плёнкаларнинг шаклланиши валент электронлар ҳолати зичликларининг сезиларли даражада ўзгаришига олиб келади. −1.0, −2.7 и −4.0 эВ энергияларда унда яққол ажралиб турувчи хусусиятлар намоён бўлади.



8-расм. 1 – n-типдаги Si (111); 2- d = 3.5−4.0 nm ли $NiSi_2$/Si (111) наноплёнкалари учун УБЭС лар.



9-расм. $NiSi_2$/Si(111) системасининг тахминий зона-энергетик диаграммаси

Бу хусусиятлар бизнингча, Ni нинг 3d ($3d_{5/2}$ и $3d_{3/2}$) ҳолатининг Si нинг 3p− ва 3s-ҳолатлари билан гибридлашуви натижасида шаклланади. 2-жадвалда d = 3.0 ва 6.0 nm қалинликдаги Si ва $NiSi_2$/Si плёнкаларининг баъзи физик параметрлари келтирилган, бу ерда φ ва Φ - термо- ва фотоэлектрон чиқиш ишлари, E_g – тақиқланган зона кенглиги, χ – электронга мойиллик, σ_m – ИЭЭ коэффициентининг максимал қиймати, Y – фотоэлектронларнинг квант чиқиши, ρ – солиштирма қаршилик.

2-жадвал асосида биз $NiSi_2$/Si (d_{NiSi2} ≈6 нм) система учун энергетик зоналар диаграммасини чиздик. 9-расмдан кўринадики, система чегарасида 2-3 нм қалинликдаги ўтиш қатлами шаклланар экан. Ўтиш зонаси четлари ΔE_c қуйидаги формула ёрдамида аниқланади:

$$\Delta E_c = E_{c_1} - E_{c_2}$$

Валент зона четлари узилиши эса:

$$\Delta E_V \approx E_{V_1} - E_{V_2}$$

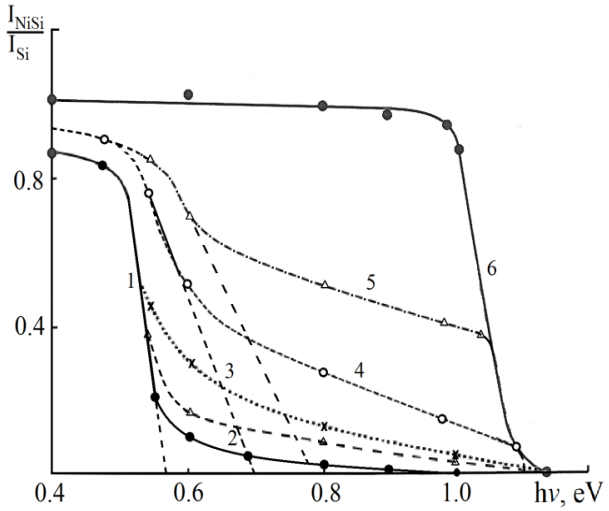
Бу формулаларга кўра $NiSi_2$/Si (111) контактлар учун $\Delta E_c \approx 0{,}4\ эВ$ ва $\Delta E_V \approx 1\ эВ$.

Si (111) ва $NiSi_2$/Si (111) плёнкаларининг зона-энергетик, эмиссион ва оптик параметрлари

2-жадвал

Образец	d,nm	φ, эВ	Ф, эВ	E_g,эВ	χ, эВ	σ_m	Y	ρ,μОм·cm
Si(111)	0	4.7	5.1	1.1	4	1.1	$2\cdot10^{-4}$	$5\cdot10^{6}$
$NiSi_2$/Si(111)	3.0	4.3	4	0.6	3.4	1.5	$4\cdot10^{-4}$	80
	6.0	-	4	0.5	3.5	1.6	$4\cdot10^{-4}$	60
	50.0	4.2	4	0.5	3.5	1.6	-	55

10-расмда 900-1300 К температура оралиғида $NiSi_2$/Si(111) учун турли температураларда қиздирилганда олинган I(h*ν*) спектрлари келтирилган. Ҳар бир Т температурада қиздириш 40 минут давомида амалга оширилди. Кўриниб турибдики Т=900 К температурада К нинг қиймати h*ν* ≈ 0,5 эВ дан бошлаб кескин камаяр экан. Эгри чизиқнинг шу қисмининг h*ν* ўқига экстраполяцияси тахминан плёнка учун E_g нинг қийматини беради ва бу катталик 0,58 эВ га тенг экан.



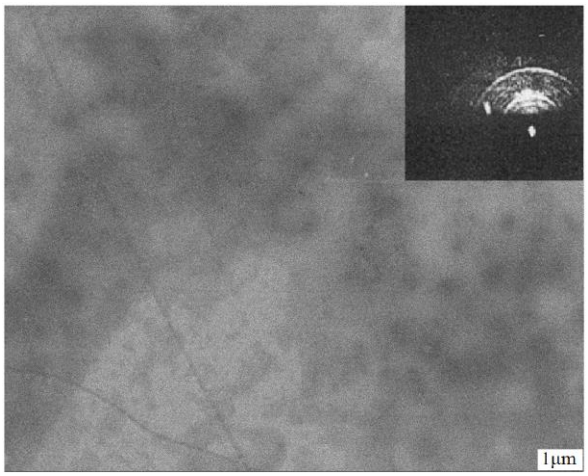
10-расм. $NiSi_2$/Si(111) системалар учун Т,К : 1-900 К, 2-1000 К, 3-1050 К, 4-1150, 5-1200, 6-1400 температураларда қиздиргандан сўнг олинган I(h*ν*) боғланиш графиклари

$NiSi_2$ плёнкаси жуда юпқа, шу сабабли энергиялар h*ν* >0,6 эВ бўлганда ҳам кичик интенсивликдаги ёруғлик ўтади. Т=1000 К температурада қиздирилгандан сўнг h*ν* = 0,6-1,1 эВ энергия соҳасида ўтувчи ёруғлик интенсивлиги сезиларли даражада ортади, бу эса $NiSi_2$ плёнкада микротирқишлар пайдо бўлиши билан боғлиқ бўлиши мумкин. Харорат 1100 К температурагача ортганда h*ν* > 0,6 эВ энергияларда ўтувчи ёруғлик интенсивлиги сезиларли даражада ортади ва ~0,2-0,3 ни ташкил қилади, яъни тирқиш диаметри ортади (шунингдек янги тирқишлар пайдо бўлиши мумкин). Т=1200 температурада оролчаларнинг ўртача ўлчамлари 20-25 нм гача камаяди, E_g нинг қиймати эса ортади ва ~0,78 эВ ни ташкил қилади. Т ≈1400 К температурада $NiSi_2$ плёнка юзадан тўла буғланади.

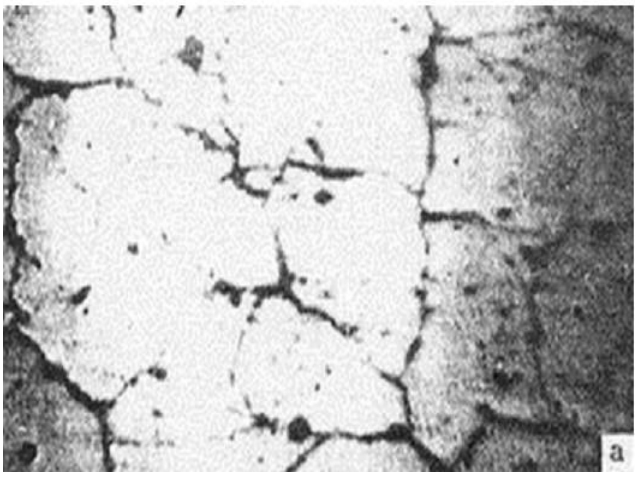
«**Si (111)да ҳосил қилинган $NiSi_2$ яширин қатламларнинг таркиби, структураси ва электрон хусусиятлари**» номли тўртинчи боб Si нинг юзаости қатламларининг турли чуқурликларида $NiSi_2$ нинг нанокристалл фазалари ва қатламларини олишга ва уларнинг ўлчамларини аниқлашга, зоналарнинг параметрлари ва кристалл структураларини ўрганишга, шунингдек $NiSi_2$/Si гетероструктура чегарасида ҳосил бўлувчи ўтиш

қатламининг электрон структураси ва уларнинг таркибини ўрганишга бағишланган.

11-расмдан кўриниб турибдики, ҚФЭ ҳолида T=1000 K температурада Si нинг узлуксиз бир жинсли поликристалл плёнкалари қиймати ўсар экан. $Si/NiSi_2$ ва $NiSi_2/Si(111)$ қатламлар орасидаги чегара кескин ва ўтиш қатламларининг қалинлиги 4-5 нм дан ошмайди.

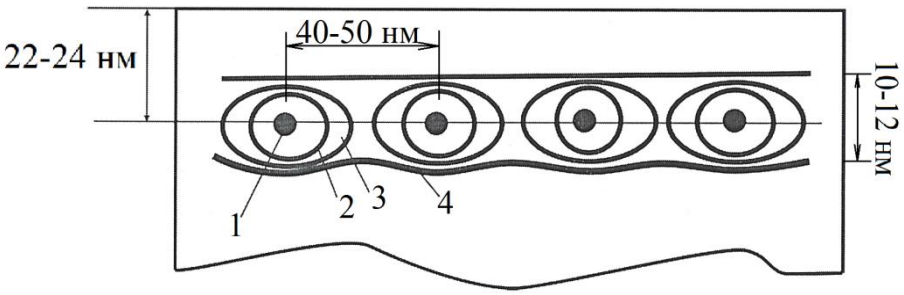


11-расм. $Si/NiSi_2/Si(111)$ системаси юзанинг РЭМ- ва ЭТД тасвирлари. ~50 нм қалинликдаги Si плёнкаси T≈1000 K температурада чанглантирилди.



12-расм. T=1150 K температурада 40 мин мобайнида қиздирилган $Si/NiSi_2/Si(111)$ система юзанинг РЭМ тасвири

Ўстиришдан кейинги қиздириш T ≥ 900-1000 K температураларда ρ нинг ўзгаришига олиб келади. T ≈1150 K температураларда ρ минимумгача камаяди, сўнгра кескин ортади. Бу ҳол Si плёнкасининг алоҳида-алоҳида оролчаларга бўлиниши билан тушунтирилади.

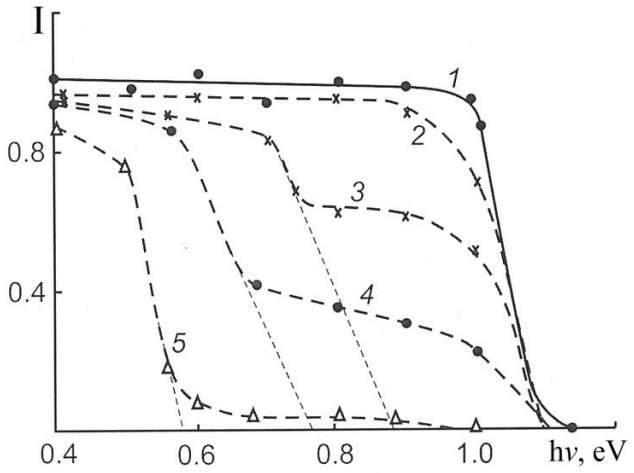


13-расм. Si нинг юзаости қатламида жойлашган нанофаза (1-3) ва наноқатламлар (4) нинг схематик тасвирлари: 1-D=$2\cdot10^{14}$ $см^{-2}$; 2-$2\cdot10^{15}$ $см^{-2}$; 3-$8\cdot10^{15}$ $см^{-2}$; 4-$8\cdot10^{16}$ $см^{-2}$.

$NiSi_2$ монокристалининг шаклланиши температураларида Si монокристалининг юзаости қатламларида энергияни 15 дан 30 кэВ гача ва дозаларни 10^{14} $см^{-2}$ дан 10^{17} $см^{-2}$ гача ўзгартириб, кейинги қиздириш орқали Ni^+ ионлари имплантацияси ёрдамида $NiSi_2$ нинг яширин нанокристалл фазалари ва узлуксиз қатламлари олинди. 13-расмда нанофаза ва

наноқатламларнинг кесимлари келтирилган. $D \approx 10^{15}$ $см^{-2}$ дозаларгача $NiSi_2$ нинг нанокристалл фазалари сфера кўринишида шаклланади $D > 10^{15}$ $см^{-2}$ ларда эса эллипсга яқин шаклга ўтади ва $D = 8 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$ дозада $NiSi_2$ нинг узлуксиз бир қатламини ҳосил қилади деб фараз қилиш мумкин.

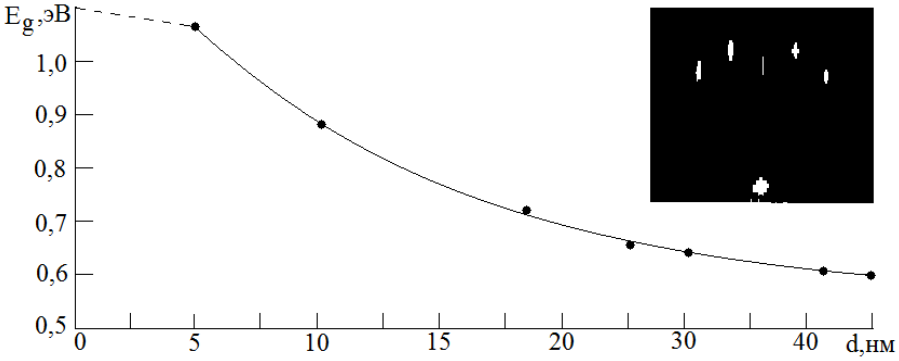
Ушбу намуналар учун *I* ўтувчи ёруғлик интенсивлигининг hν=0,4-1,2 эВ энергия оралиғида фотонлар энергиясига боғлиқлиги олинди (14-расм).



14-расм. E_0=25кэВ энергияли Ni^+ ионлари билан имплатация қилинган Si (111) учун I (hν) боғланиш графиклари. D, $см^{-2}$: 1 - 0; 2 - $2 \cdot 10^{14}$; 3 - $2 \cdot 10^{15}$; 4 - $8 \cdot 10^{15}$; 5 - $8 \cdot 10^{16}$

Барча ҳолларда имплантациядан кейинги қиздириш T=800-900 К температураларгача олиб борилди. Кўриниб турибдики, d ≈ 5-6 нм ли $NiSi_2$ нанокристалл фазалари учун E_g нинг қиймати ~1,07 эВ ни ташкил қилади. d ортиши билан E_g нинг қиймати монотон камаяди ва d ≈ 30-35 нм да ~0,6 эВ ни ташкил қилади, яъни узлуксиз $NiSi_2$ қатламидаги E_g нинг қийматига яқинлашади. $NiSi_2$ нанофазалари ҳолида квант-ўлчамли эффектлари d ≤ 30-35 нмларда намоён бўлади деб ҳисоблаш мумкин.

Биз шунингдек, ион имплантация методини қиздириш билан биргаликда қўллаб тўтр қатламли $NiSi_2/Si/NiSi_2/Si(111)$ системаларни олишга эришдик. Бунинг учун дастлаб яхши тозаланган Si юзага Ni^+ нисбатан юқори энергияларда (20-30 кэВ) имплантация қилинди ва 30-40 минут мобайнида T=900-950 К температурада қиздирилди, сўнгра юзанинг худди шу қисмларига кичик энергияли (0,5-3 кэВ) Ni^+ ионлари йўналтирилди ва 30-40 минут мобайнида T=900-950 К да қиздирилди. Кичик дозаларда ($D \leq 5 \cdot 10^{15}$ $см^{-2}$) юза ва юзаости қатламларида $NiSi_2$ нинг иккиқатламли нанофазалари, $D = D_H \approx (6\text{-}10) \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$ дозаларда эса $NiSi_2$ нинг наноқатламлари шаклланди.

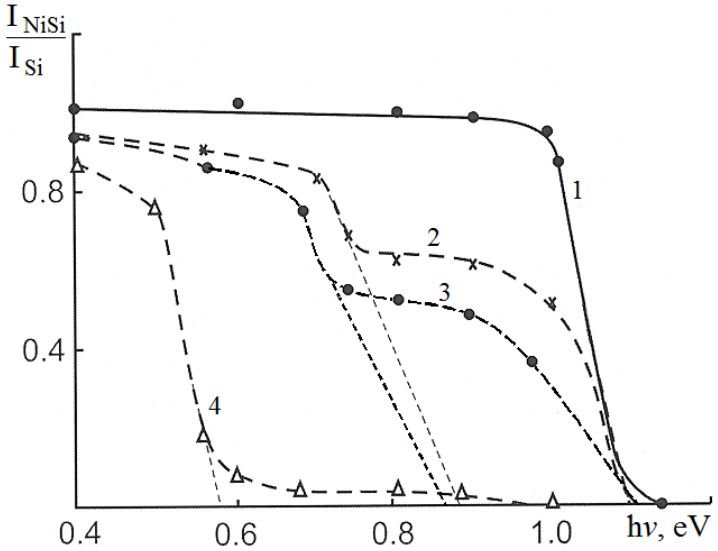


15-расм. E_g нинг $NiSi_2$ фазасининг НК ўлчамларига боғлиқлиги графиги. $Si/NiSi_2/Si(111)$ системаси юзанинг ЭТД тасвири.

16-расмда $NiSi_2$ ҳажмий нанофазали тоза Si(111) ва юза ҳамда юзаости қатламларида нанофазалар бўлган Si(111), шунингдек $NiSi_2$ нинг икки қатламига эга бўлган Si(111) лар учун ёруғликнинг ютилиш спектрлари

(I(hv) боғланишлари) келтирилган. Ni^+ ионларининг энергиялари ва дозалари 15-расмда келтирилган энергия ва дозаларга мос келади. 16-расмда ги 2-эгри чизиқдан кўринадики d ≈ 10 нм бўлган $NiSi_2$ нанокристалл фазалари учун E_g нинг қиймати ~0,88 эВ ни, бу қатламдаги нанокристалл фазалар билан қопланиш даражаси эса ~0,3 ни ташкил қилади. Юзада ва юзаости қатламларида нанофазалар бўлган Si(111)ҳолида E_g нинг қиймати атиги ~0,05 эВ га камаяди.

Ионларнинг энергияси E_0=25 кэВ ва1 кэВ. Нанофаза $D \approx 10^{15}$ $см^{-2}$ дозадаги Ni^+ ионлари имплантацияси, наноқатлам эса $D=8 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$ дозада олинган



16-расм. 1-Si (111); 2- оролчали $NiSi_2$ нанофазали Si(111), 3- юза ва ҳажмдаги $NiSi_2$ нанофазали Si(111), 4- юза ва ҳажмдаги $NiSi_2$ наноқатламли Si(111) лар учун I(hν) боғланиш гарафиклари.

Лекин, бу ҳолда НК нинг фазалар билан қопланиши даражаси 0,5 гача ортади. Икки қатламда ҳосил қилинган $NiSi_2$ нинг НК фазалари бу фазалар E_g сига кам таъсир қилади деб фараз қилиш мумкин, лекин юзай ва пастки қатламларнинг нанофазалар билан қисман қопланиши туфайли қопланиш даражаси ~1,5 марта ортади. 18-расмдан кўринадики, НК фазалар учун E_g нинг қиймати $NiSi_2$ нинг узлуксиз қатламлари E_g сидан сезиларли даражада катта. d ≤ 20-25 нм ли $NiSi_2$ нанофазалар ҳолида квант-ўлчам эффектлари аниқ намоён бўла бошлайди деб фараз қилиш мумкин.

Икки системали $NiSi_2$ учун E_g нинг қиймати амалда $NiSi_2$ нинг яширин қатлами E_g сининг қийматидан фарқ қилмайди ва ~0,57 эВ ни ташкил қилади.

Ион имплантациясидан фойдаланган ҳолда биз $NiSi_2$/Si(111) нинг юпқа плёнкаси юзада омик контактлар олдик. Тажриба натижаларининг кўрсатишича $NiSi_2$ учун ρ нинг қиймати $4 \cdot 10^{-5}$ ни $NiSi_2$/Si (111) учун Шоттки баландлиги 0.6 эВ ни ташкил қилар экан.

ХУЛОСА

1. Илк маротаба кремний монокристалининг оптик хусусиятларига унинг юза тартиблашмаганлигининг таъсири ўрганилди. Тартиблашмаганлик даражасининг ортиши билан ёруғликнинг ютилиш коэффициенти ортиши, ўтказиш коэффициентининг камайиши ва қайтариш коэффициентининг сезиларли даражада ўзгариши кўрсатиб берилди. Юқори дозали Ar^+ ионлари билан бомбардимон қилингандан сўнг тажриба йўли билан тартибсизлашган қатлам қалинлиги $l_э$ баҳоланди, бу қалинлик ионлар энергияси E_0=1 кэВ бўлганда $l_э \approx$ 100-120 Å ни, ионлар энергияси E_0=2 кэВ бўлганда эса ≈150-160 Å ни ташкил қилди. Бу ҳолда E_g нинг қиймати атиги 0,1 эВ га ортди, валент соҳадаги электронлар ҳолат зичлиги эса кескин ўзгаради.

2. Ni ни Si га чанглантириш методида олинган $NiSi_2$/Si(111) плёнкалар чанглантирилгандан кейин, дарҳол 40 минут мобайнида T≈850-900 K гача қиздирилди. Никелнинг қалинлиги $h_{Ni} \approx$ 20-60 Å бўлганда $NiSi_2$ плёнкаси оролчалар шаклида, h_{Ni}=80-200 Å оралиғ да эса $NiSi_2$ нинг узлуксиз плёнка шаклида шаклланиши аниқланди. Плёнка юзанинг нотекислиги (гадир-будурлиги) 7-8 нм ни ташкил қилди.

3. Оролчалар ва узлуксиз шаклдаги $NiSi_2$ плёнкаларининг ман қилинган зоналари кенглиги бир-биридан кам фарқ қилади ва 0,58-0,6 эВ ни ташкил қилди, уларнинг солиштирма қаршиликлари эса 100 дан 1000 мартагача фарқ қилади. Оролчалар шаклидаги плёнкадан фотоэлектронларнинг спектрида Si га ҳам $NiSi_2$ га ҳам хос бўлган характерли хусусиятлар кузатилди.

4. Қиздириш билан биргаликдаги E_0=1-5 кэВ энергияли Ni^+ ионлари билан имплантацияси орқали Si юзада $NiSi_2$ нинг қалинлиги 25-30 Å дан 50-60 Å гача бўлган нанокристалл фазалари ва плёнкалари олинди. Биринчи маротаба $NiSi_2$ наноплёнкаларининг кристаллографик ориентациялари ва панжара доимийси тагликларнинг худди шундай параметрлари билан мос келиши кўрсатиб берилди.

5. Биринчи маротаба, $NiSi_2$ нанофазалари ва наноплёнкаларининг электрон структураси, оптик ва эмиссион хусусиятлари, энергетик зоналари параметрлари ўрганилди. $NiSi_2$ нинг валент электронлари ҳолатлари зичлиги асосан Ni нинг $3d_{5/2}$ ва $3d_{3/2}$ ҳолатларининг Si нинг 3p- ва 3s- ҳолатлари билан гибридлашуви натижасида ҳосил бўлиши кўрсатиб берилди. $NiSi_2$ фотоэлектронлари спектрида нозик структуралар шаклланишининг асосий механизмлари аниқлаб берилди. $NiSi_2$/Si(111) системасининг зона-энергетик диаграммаси чизилди.

6. ҚФЭ ўсиш тўхтагандан кейинги $NiSi_2$/Si(111) системасини қиздириш, дастлаб $NiSi_2$ плёнкада турли микротирқишларнинг пайдо бўлишига (T=1000-1100 K температура оралиғида), кейин эса оролчалар пайдо бўлишига (1150-1300 K) олиб келиши аниқлаб берилди. T=1200 K температурада $NiSi_2$ оролчаларнинг ўртача ўлчамлари 20-25 нм гача камаяди ва E_g нинг қиймати 0,78 эВ гача ортади, яъни квант-ўлчам эффектлари намоён бўла бошлайди.

7. ҚФЭ методида олинган уч қатламли $Si/NiSi_2/Si(111)$ наногетеросистемаларнинг T≈1000 K температурагача қиздиришга бардош бериши кўрсатиб берилди. T≈1100 K температурада Si нинг оролчалар шаклидаги плёнкаси шаклланади, бу ҳол $NiSi_2$ плёнкада содир бўладиган ўзгаришлар (тирқиш ва оролчаларнинг шаклланиши) билан асослаш мумкин.

8. Биринчи маротаба иссиқликдан қиздириш билан ион имплантация методида Si да (кремнийда) $NiSi_2$ нинг яширин нанофазалари ва қатламлари олинди ва уларнинг таркиби, структураси, электрон ва оптик хусусиятлари ўрганилди. $NiSi_2$ нанофазалари ҳолида кван-ўлчам эффектларининг $d \leq 20$-25 нм ларда намоён бўлиши кўрсатиб берилди.

9. Тўрт қатламли $NiSi_2/Si/NiSi_2/Si(111)$ наногетероструктураларни олиш методикаси ишлаб чиқилди. Система ҳар бир қатламининг зона-энергетик параметрлари аниқланди.

10. Олинган натижаларни ўтказувчан базали транзисторлар ва наноқатламли структураларда омик контактлар яратишда қўллаш бўйича илмий-асосланган тавсиялар берилди.

НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ КАРШИНСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

КАРШИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

МУСТАФОЕВА НОДИРА МОЙЛИЕВНА

СТРУКТУРА И ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА НАНОПЛЕНОК СИЛИЦИДОВ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДАМИ ВЫСОКОВАКУУМНОГО ОСАЖДЕНИЯ И ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

01.04.04 – Физическая электроника

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

Карши – 2022

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2020.2.PhD/FM506.

Диссертация выполнена в Каршинском государственном университете и Ташкентском государственном техническом университете имени Ислама Каримова.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещён на веб-странице Научного совета (www.qarshidu.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyonet.uz).

Научный руководитель:	**Ташатов Алланазар Каршиевич** доктор физико-математических наук, профессор
Официальные оппоненты:	**Тураев Эргаш Юлдошевич** доктор физико-математических наук, профессор
	Бекпулатов Илхом Рустам ўғли доктор философии по физике и математике, PhD., доцент
Ведущая организация:	**Институт ионно – плазменных и лазерных технологий имени У.А. Арифова**

Защита диссертации состоится «____» _____2022 г. в ____часов на заседании Научного совета PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 по присуждению ученых степеней при Каршинском государственном университете. Адрес: 180119, г. Карши, ул. Кучабог, 17. Тел./Факс: (99875) 225–34–13, e-mail: kardu@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Каршинском государственном университете (зарегистрирована за № ___). Адрес: 180119, г. Карши, ул. кучабог, 17. Тел./Факс: (99875) 225–34–13, e-mail: kardu@mail.ru.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2022 г.
(реестр протокола рассылки №__ от «___»_____ 2022 г.)

Нормурадов М.Т.
председатель Научного совета по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

Аллаярова Г.Х.
ученый секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней, д.ф.ф.-м., PhD

Донаев С.Б.
председатель научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней, DSc, доцент

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. Гетероструктуры из наночастиц $MeSi_2$/Si, формируемые на поверхности Si с помощью востребованной техники сверхвысокочастотных транзисторов и интегральных схем, детекторов излучения, оптоэлектронных устройств, тонких омических контактов и барьерных МДП, ПДП-структур создает новые возможности для достижения перспективных результатов в области физической электроники. Быстро развивается изучение электронной структуры гетероструктур типа $MeSi_2$/Si и, соответственно, их оптических и электрических свойств в зависимости от размера и состава нанообъектов. Человечество хочет, чтобы чем меньше размер используемых им устройств, тем больше была его емкость. Изучение электронной структуры гетероструктур типа $MeSi_2$/Si и, соответственно, их оптических и электрических свойств в зависимости от размера и состава нанообъектов имеет важное значение в мире, так как открывает новые возможности в экономике, медицине, экологии, авиации и радиоэлектронике.

Несмотря на широкое использование ключевых достижений в области нанотехнологий во всем мире, эта работа все еще находится в зачаточном состоянии. Поэтому в передовых странах мира большое внимание уделяется исследованиям в области нанотехнологий. В частности, большое внимание уделяется выявлению и получению механизмов формирования наноразмерных структур $MeSi_2$ в поверхностных и приповерхностных слоях Si, а также определению их состава, структуры и физических свойств.

Большое внимание в нашей стране уделяется созданию новых электронных устройств, солнечных батарей, в том числе интегральных схем. Влияние неповерхностного расположения $MeSi_2$ на электронную структуру и оптические свойства монокристаллического кремния и электрофизические свойства, формирование пленок $NiSi_2$ и механизмы формирования нанокристаллической фазы в процессе имплантации низкоэнергетичных ионов в поверхностные и приповерхностные слои Si (111), определение структуры и зонально-энергетических параметров системы $NiSi_2$ имеет большое научное и практическое значение.

Данная диссертационная работа, в определенной степени, соответствует задачам, предусмотренным в Указе Президента Республики Узбекистан № УП – 4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 года, в Постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП- 2789 « О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук и его организаций» 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 приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Диссертационная работа выполнена в соответсвии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан: I « Физика, астрономия, энергетика и машиностроение» и II «Энергетика, энерго - и ресурсосбережение, транспорт, машиностроение и приборостроение, развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники и электронного приборострострoения»

Степень изученности проблемы В последние годы получению и изучению состава, структуры и свойств тонких пленок силицидов, особенно $CoSi_2$, посвящено большое число работ. В этих системах толщина пленки силицидов составляет не менее 30−50 nm. Уменьшение толщины пленок позволяет использовать их при создании сверхвысокочастотных транзисторов и интегральных схем, работающих с предельной частотой > 100 GHz. Одним из перспективных методов получения нанокристаллов и нанопленок с толщиной d < 5−10 nm на поверхности полупроводников является низкоэнергетическая ионная имплантация. Л.И.Хируненко и др. обнаружили в кремнии с высоким содержанием бора и кислорода появление дефекта, которому при гелиевых температурах соответствует полоса поглощения 1026.7 $см^{-1}$. Легирование кремния германием снижает эффективность образования дефекта, которому соответствует выявленное поглощение.

Migas D.B. и др. расчетным путем получили зонную структуру $BaSi_2$, выполненную полнопотенциальным методом FLAPW-GGA . Ajmal Khan, Yoji Imai и др. теоретическими исследованиями показали, что бор, углерод, азот и фтор наиболее энергетически выгодны для использования в качестве легирующих добавок. В последние годы резко возрос интерес к наноструктурам $BaSi_2$, созданных на поверхности Si, как перспективный материал для фотоэлектронных преобразователей. В частности В.Л.Дубов и Д.В.Фомин в обзорной статье показали, что тонкопленочные ФЭП на основе *p*-$BaSi_2$/*n*-Si обладают достаточно высоким КПД ~ 9-10 %.

Для получения нанопленочных систем типа $CoSi_2$/Si и изучения их оптических, электрических и магнитных свойств активно работают W.S.Cho, М.В.Гомонова и U.Starke со своими учениками. Ими установлены основные закономерности и выявлены механизмы формирования субмонослойных пленок $CoSi_2$/Si. Сотрудники Institute of Semiconductor Electronics (Германия) Facsko S. и др. бомбардировкой пучками ионов Ar^+ с энергией 420 эВ получили на поверхности (100) GaSb гексагональную кристаллическую структуру из квантовых точек диаметром 35 нм. Полученные результаты объясняются ионным распылением поверхности мишени, а также образованием на поверхности новых многокомпонентных соединений. N.N.Gerasimenko и др. имплантацией ионов Ga в Si и последующей обработкой на поверхности Si получили параллельно расположенные квантовые ямы и квантовые проволоки.

Проявления квантово-размерных эффектов в гетероструктуре GaAlAs/GaAs впервые обнаружили Р.Дингл и В.Вигман. Затем Х.В.Ченг получил периодические гетероструктуры на основе GaAs, которые применяются в твердотельных лазерах и в специальных приборах опто-электронники. Ж.И.Алферовым аналогичные многослойные системы созданы на основе GaP.

Проф. М.Т.Нормуродов, Б.Е,Умирзаков с учениками методом ионной имплантации в сочетании с отжигом впервые получили многослойные системы типа $CoSi_2$/Si/$CoSi_2$/Si, CdBaTe/CdTe/CdBaTe/CdTe и изучили их электронные и кристаллические структуры, эмиссионные и оптические свойства. Ими также выяснены основные механизмы формирования наноструктур с заданными физическими свойствами.

Однако, до настоящего времени не имеются достоверных сведений о возможности получения наноразмерных фаз и слоев $NiSi_2$ на поверхности и в приповерхностной области Si. Интерес к получению и изучению свойств системы $NiSi_2$/Si обусловлен тем, что $NiSi_2$ и Si имеют кубическую решетки и их постоянные решетки практически не отличаются друг от друга (a_{Si}≈5,41 Å, a_{Ni}≈5,42 Å). И на границе $NiSi_2$ /Si(111) не возникают дефекты несоответствия. Кроме того, удельное сопротивление $NiSi_2$ составляет ~ 50-60 мкОм·см. Поэтому эти структуры очень перспективны в создании гетероэпитаксиальных МДП и ПДП систем.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного и научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертационная работа: Диссертационное исследование выполнено в рамках плана НИР Каршинского государственного университета по теме «Формирование микро- и наноразмерных пленок на поверхности твердых тел, изучение их структуры и свойств» (2017-2022 гг.).

Цель диссертационной работы: изучение физических закономерностей формирования наноразмерных фаз и слоев $NiSi_2$ на поверхности и в приповерхностной области Si при твердофазном осаждении и ионной бомбардировке, изучение их состава, электронной и кристаллической структуры, эмиссионных и оптических свойств.

Задачи исследования:

Изучение влияния разупорядочения поверхности при бомбардировке ионами Ar^+ на электронную структуру и оптические свойства монокристаллического кремния

Изучение закономерностей формирования наноразмерных пленок $NiSi_2$ при твердофазном осаждении Ni на Si(111) в сочетании с прогревом

Изучение морфологии поверхности, электронной и кристаллической структур, оптических и электрофизических свойств островковых и сплошных ТФЭ пленок $NiSi_2$/Si(111)

Получение и выяснение механизмов формирования нанокристаллических фаз и пленок $NiSi_2$ на поверхности Si(111) методом

низкоэнергетической (E_0=0,5-5 кэВ) ионной имплантации с последующим прогревом. Изучение морфологии, структуры, электронных и оптических свойтв Si с нанокристаллами и нанопленкой $NiSi_2$.

Изучение закономерностей формирования скрытых наноразмерных структур $NiSi_2$ на различных глубинах Si(111) и изучение зависимости ширины их запрещенной зоны от размеров нанофаз, оценка размеров НК фаз $NiSi_2$ при которых начинают проявляться квантово-размерные эффекты.

Изучение влияния послеростового отжига на состав, морфологию и электронную структуру ТФЭ – пленок $NiSi_2$/Si(111).

Разработка методики получения четырехслойных гетероструктур $NiSi_2$/Si/$NiSi_2$/Si(111) и изучение структур и зонно-энергетических параметров системы.

Объектами исследования являются монокристаллические пленки и образцы Si, нанофазы и нанослои $NiSi_2$.

Предметом исследования являются закономерности формирования наноразмерных силицидов металлов на поверхности и в приповерхностном слое кремния.

Методы исследования. УФЭС, ОЭС, спектроскопия поглощения света, спектроскопия УОЭ, АСМ, РЭМ.

Научная новизна

установлены основные причины изменения оптических параметров монокристаллического Si при разупорядочении поверхности бомбардировкой ионами Ar^+

показано, что при ТФЭ росте пленки $NiSi_2$ до толщины 180-250 Å наблюдается островковый рост, а при $h_{NiSi_2} \geq 250$ Å формируются сплошные пленки. Впервые изучены морфология поверхности, состав, электронная и кристаллическая структура ТФЭ пленок $NiSi_2$/Si(111)

изучены закономерности изменения морфологии, состава и электронной структуры пленок $NiSi_2$/Si(111) при прогреве в интервале T≈1000-1400 K. Определены размеры нанофаз при которых начинают проявляться квантово-размерные эффекты.

получены и изучены нанофазы и наночастицы $NiSi_2$, встречающиеся при различной толщине Si (111), и методом ТФЭ определены их состав, ширина запрещенной зоны, равная 0,6 эВ, параметры энергетических зон и плотность распределения электронов в валентной зоне

изучены процессы формирования четырехслойных эпитаксиальных нанослойных систем $NiSi_2$/Si/$NiSi_2$/Si(111) при имплантации ионов Ni в Si с последующим отжигом.

Практические результаты исследования:

Имплантацией ионов Ni на поверхности и в приповерхностной области Si получены наноструктуры силицидов, определены их состав, размеры, кристаллическая и электронная структуры. Предложена методика поэтапного ионного легирования и установлены оптимальные режимы формирования

многослойных систем $NiSi_2/Si/NiSi_2/Si(111)$, имеющих перспективы в создании новых приборов электронной техники.

Достоверность полученных результатов исследований обеспечивается необходимой статистикой экспериментов, использованием комплекса независимых взаимодополняющих современных методов измерения и обработки данных, а также соответствием полученных результатов по чистым образцам Si с данными других авторов.

Научная и практическая значимость результатов исследования

Научная значимость результатов исследования заключается в том, что новые результаты исследований электронной структуры, оптических и эмиссионных характеристик наноразмерных структур $MeSi_2$, образующихся в поверхностных и приповерхностных слоях Si, являются фундаментальной основой для выращивания квантовых материалов и создания новых мультигетероструктур.

Практическая значимость результатов исследований заключается в том, что созданные методы в дальнейшем могут быть использованы для создания скрытых слоев $MeSi_2$ и их оптических свойств, изучения параметров зон и других материалов.

Внедрения результатов исследования: Полученные научные результаты о структуре и электронных свойствах кремниевых нанопленок, полученных методами ионной имплантациии и высоковакуумного осаждения были использованы при реализации фундаментального проекта ОТ – Ф3–13 «Механизмы формирования многослойных нанопленочных структур, не содержащих кремний-силицид-металл и их механизмы». (справка № 2/1255-122 от 19 января 2022 года Академии наук Республики Узбекистан). В результате удалось смоделировать влияние однократного переходного тока на границе оксид-полупроводник транзистора FinFET;

Научные выводы о формировании четырехслойной эпитаксиальной нанослойной системы $NiSi_2/Si/NiSi_2/Si$ (111) путем имплантации Ni в Si и последующего нагрева применялись при контактной сварке электронных компонентов производства АО «Узэлтехсаноат» «Фотон ". (справка № 362 от 05.10.2021 АО «Узэлтехсаноат»). В результате получается светочувствительный сенсор на основе кремния, легированного входными атомами.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования были представлены и обсуждены на 12 международных и 5 республиканских научно – практических конференциях.

Опубликованность результатов исследований. Полученные результаты по теме диссертации изложены в 22 научных трудах, в том числе 5 из них в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Ўзбекистан по публикациям научных результатов докторских диссертаций из них 3 в международных и 2 в республиканских журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четерых глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 126 страницах машинописного текста, вкючая 59 рисунков и 4 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе **«Краткий анализ литературных данных по получению и изучению свойств наноразмерных структур на основе кремния» анализируются новые данные исследований по изучению** эмиссионных и оптических свойств кремния и соединений на его основе, применению ионной бомбардировки для получения наноразмерных фаз на поверхности и в приповерхностной области Si, методы получения, структура и свойства многослойных пленок.

Критический анализ экспериментальных работ показывает, что до начала настоящей работы не получены наноразмерные фазы и слои $NiSi_2$ на поверхности и в приповерхностной области Si и не определены оптимальные условия их синтеза, не изучены влияние разупорядочения тонких поверхностных слоев на электронные и оптические свойства Si (111), не исследованы влияние образования наноструктур $NiSi_2$ на кристаллическую и электронную структуру, не изучены морфология поверхности, эмиссионные, оптические и электрофизические свойства нанопленок $NiSi_2$/Si, полученных методами твердофазной эпитаксии и ионной имплантации, не определены ширина запрещенной зоны нанокристаллов $NiSi_2$, созданных на различных глубинах приповерхностной области Si, не имеются сведения о проявлении квантово-размерных эффектов в нанокристаллах и слоях $NiSi_2$.

Во второй главе «**Методика экспериментальных исследований»** были описаны конструкция и принцип работы СВВ экспериментальной установки для ионного легирования и комплексного исследования поверхностных свойств материалов. Приведено также описание стандартной экспериментальной установки LAS-2200. Исследования проводились с использованием методов: измерения энергетических зависимостей коэффициентов вторичной электронной эмиссии (ВЭЭ) и квантового выхода фотоэлектронов, оже-электронной спектроскопии (ОЭС), спектроскопии упруго-отраженных медленных электронов (СУОЭ), спектроскопии характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ), ультрафиолетовая

фотоэлектронная спектроскопия (УФЭС), а также растровая электронная микроскопия (РЭМ), атомно-силовая микроскопия (АСМ) и дифракция быстрых электронов (ДБЭ).

В третьей главе **«Морфология поверхности, состав, структура, электронные и оптические свойства нанопленок $NiSi_2$, полученные методами твердофазной эпитаксии и ионной имплантации»** приводятся результаты исследований влияния разупорядочения тонких поверхностных слоев на электронные и оптические свойства Si (111); морфология поверхности пленок $NiSi_2$/Si, полученных методом твердофазной эпитаксии; электронные и оптические свойства нанопленок $NiSi_2$/Si, полученных имплантацией ионов Ni в Si в сочетании с отжигом, зависимость состава и параметров энергетических зон от глубины ионно-легированного слоя для Si, влияние послеростового прогрева на морфологию тонких пленок $NiSi_2$/Si(111).

На рис. 1 приведены угловые зависимости коэффициента η измеренные при энергии первичных электронов E_p = 500 эВ для Si (111), бомбардированного ионами Ar^+ с E_0 = 1 кэВ разными дозами. Зависимость η(φ) дает исчерпывающие сведения о степени разупорядочения поверхности монокристаллов.

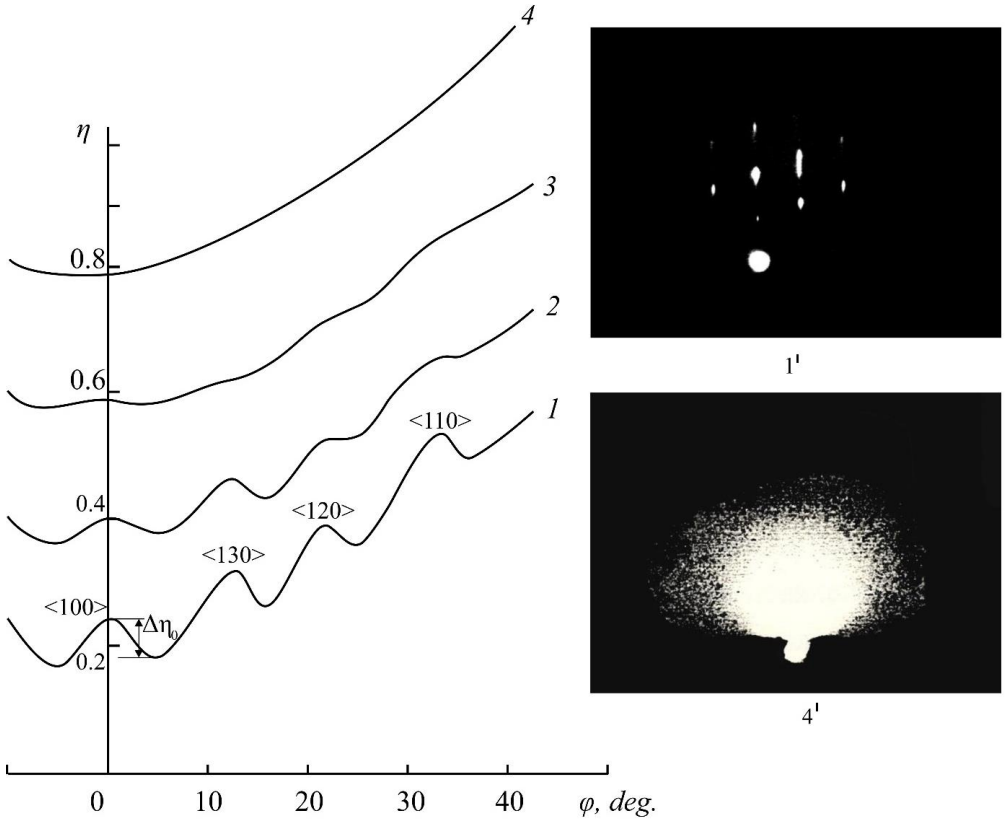


Рис. 1. Зависимости η(φ), снятые при E_p=500 эВ (кривые 1-4) и ДБЭ-изображения поверхности ($1^/$ и $4^/$) для пленки Si/CaF_2 (111), бомбардированного ионами Ar^+ с E_0=1 кэВ при дозах D, $см^{-2}$: 1 и $1^/$ – D = 0; 2 – D = $5\cdot10^{14}$; 3 – D = $5\cdot10^{15}$; 4 и $4^/$ – D = $5\cdot10^{16}$ $см^{-2}$. Кривые 2, 3, 4 сдвинуты на 0.2; 0.4 и 0.6 относительно кривой 1.

Результаты ОЭС показали, что в процессе ионной бомбардировки состав поверхности практически не меняется. На зависимости η(φ) чистого Si(111) с ростом φ наряду с ростом η наблюдается ряд максимумов, положения которых соответствуют определенным кристаллографическим направлениям. Наибольшие максимумы наблюдаются при φ = 0, которые соответствуют направлению <100> Si. Разность значений между первым максимумом и минимумом $\Delta\eta_0$ составляет 0.07. По мере увеличения дозы ионов тонкая структура кривых η(φ) сглаживается и при D = $5\cdot10^{16}$ см$^{-2}$ полностью исчезает (кривая 4). При этой дозе на ДБЭ-изображении вместо рефлексов (вставка 1$^{/}$) устанавливается одно большое пятно (гало), характерное для аморфных веществ (вставка 4$^{/}$). Дальнейшее увеличение дозы не приводит к заметным изменениям зависимости η(φ) и ДБЭ-изображений.

Разупорядочение приповерхностного слоя Si (111) приводит к уменьшению коэффициента пропускания света К во всей исследуемой области энергии фотонов (hν = 0.4 – 1.5 эВ) и следовательно, уменьшению крутизны линейного участка кривой К*(hν)* (рис. 2).

В случае поглощения света для экспоненциального участка зависимость коэффициента поглощения α от энергии фотонов можно оценить по формуле, приведенной для кристалла CdSeS:

$$\alpha = \alpha_0 e^{\frac{-(E_g - h\nu)}{E_0}} \qquad (1)$$

где E_0 – характеристическая энергия, которая определяет крутизну края и дает информацию о флуктуации величин межатомных расстояний. Из рис. 3 видно, что пленка $NiSi_2$ толщиной~ 50 Å (образец № 1) имеет островковый характер. Эти островки имеют форму конуса (или пирамиды) и их высота доходит до 7 – 8 нм.

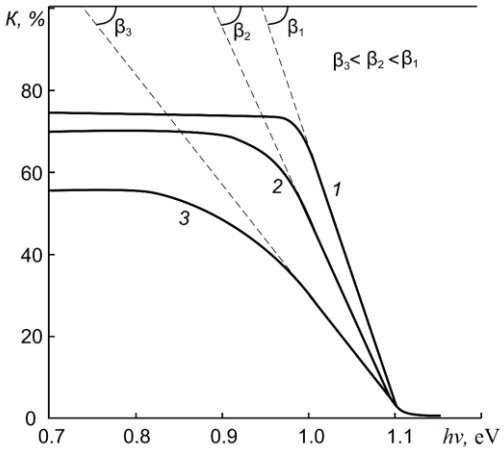


Рис. 2. Зависимости *K*(hν) для пленки Si(111), бомбардированного ионами Ar^+ с E_0 = 1 кэВ при дозах D, см$^{-2}$: 1 – 0; 2 – $5\cdot10^{15}$; 3 – $5\cdot10^{16}$

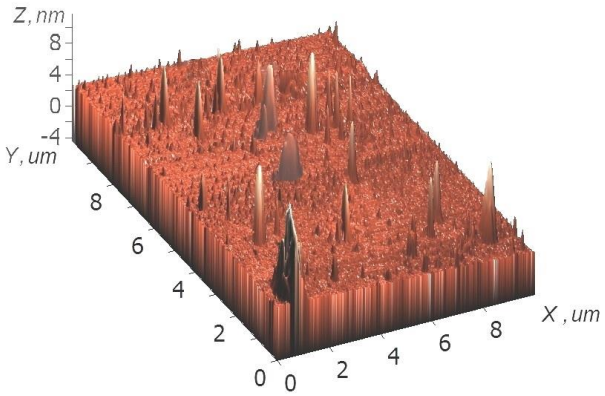


Рис. 3. АСМ - изображения поверхности Si (111) с пленкой $NiSi_2$ толщиной 50 Å.

Дальнейшее увеличение толщины пленок (времени твердофазного осаждения) не приводило к заметному росту высоты основных островков. При этом наблюдалось увеличение поверхностных размеров крупных островков и увеличение трех размеров мелких островков. В случае пленки $NiSi_2$ с h = 150 Å практически 80 – 85 % поверхности Si покрываются островками $NiSi_2$ (рис. 4). Размеры островков составляют 0,3 – 0,5 мкм. При этом на ДБЭ картине обнаруживаются концентрические кольца характерные для поликристаллических образцов. После прогрева при T = 800 K происходит кристаллизация пленки, однако кристаллографические направления отдельных кристаллических фаз не совпадают друг с другом.

На рис. 5 приведена зависимость интенсивности проходящего света *I* от энергии фотонов hν для Si с нанопленкой $NiSi_2$ с h = 50 Å и h = 200 Å. В случае Si с пленкой $NiSi_2$ толщиной 50 Å, резкое уменьшение интенсивности проходящего света наблюдается при двух значениях hν. Уменьшение *I* начиная с hν = 0,5 эВ связано с поглощением света на участках покрытых наноостровками $NiSi_2$, а уменьшение *I* с hν = 1 эВ – не закрытых наноостровками $NiSi_2$.

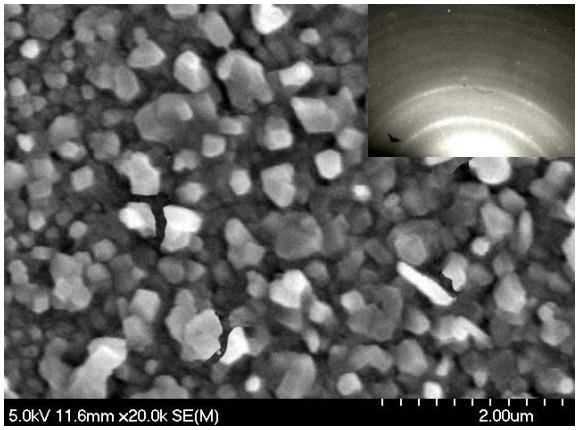


Рис. 4. РЭМ - изображения поверхности Si (111) с пленкой $NiSi_2$ толщиной 150 Å (образец № 3).

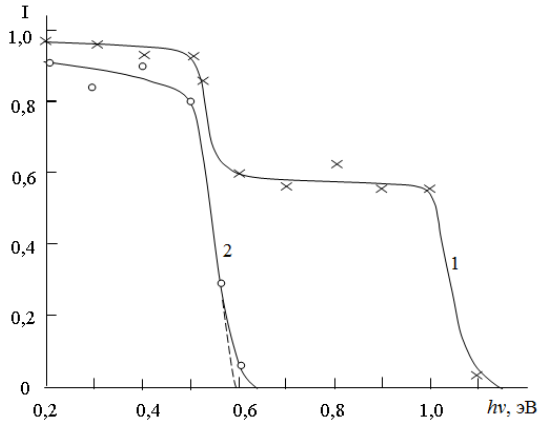


Рис. 5. Зависимость *I*(h*ν*) для Si с нанопленкой $NiSi_2$ толщиной h, Å: 1 – 50 (образец № 1), 2 – 200 (образец № 4).

Экстраполяция этих кривых к оси hν показывает, что значение E_g для $NiSi_2$ ~ 0,6 эВ, а для Si - ~ 1,1 эВ. В случае сплошной пленки $NiSi_2$ значение *I* резко уменьшается до нуля в интервале hν = 0,5 – 0,6 эВ.

Видно, что в случае островковой пленки значение ρ очень высоко. При $h_{NiSi_2} = 200\overset{0}{A}$ формируется сплошная пленка, однако значение ρ немного больше, чем ρ пленки с толщиной 550 Å. По-видимому, при h = 200 Å пока еще пленки не имеют высокое совершенство.

На рис. 6. приведены фотоэлектронные спектры p-тип Si (111) и Si с нанокристаллами и нанопленкой $NiSi_2$, полученные при hν = 10,8 эВ. Видно,

что форма и положения основных пиков толстой пленки $NiSi_2$ (h = 200 Å) существенно отличаются от формы и положения пиков для Si. При этом на спектре обнаруживаются пики с энергиями $E_{св}$ = – 0,3; – 0,9; – 2,2 и – 4,2 эВ.

В таблице 1 представлены оптимальные режимы формирования ТФЭ пленок $NiSi_2$/Si (111) и значения их удельного сопротивления.

таблица 1

Номер образца	h_{Ni}, Å	h_{NiSi_2} Å	$T_{эпит.}$,K	Вид пленки	ρ, мкОм·см
1	15 – 20	50	800	островковая	$2\cdot10^5$
2	35 – 40	100	850	островковая	$5\cdot10^2$
3	50 – 60	150	850	островковая	–
4	80	200	900	сплошная,н.о*	100
5	200	550	950	сплошная, о**	50

Анализ этого спектра и сравнение его со спектрами Si и Ni дает возможность предполагать, что пик с $E_{св}$ = – 0,3 эВ формируется вследствие гибридизации M_3 состояний кремния и M_5 состояний Ni, пик с $E_{св}$ = – 0,9 эВ – вследствие гибридизации M_2 состояния Si и M_3 состояния Ni, пик с $E_{св}$ = – 2,2 эВ – вследствие гибридизации M_1 состояния Si и M_4 состояния Ni, а пик с $E_{св}$ = – 4,2 эВ, по-видимому, относится к Si. Пленка $NiSi_2$ с h = 50 Å имеет островковый характер, поэтому на его спектре обнаруживаются пики характерные как для Si, так и $NiSi_2$.

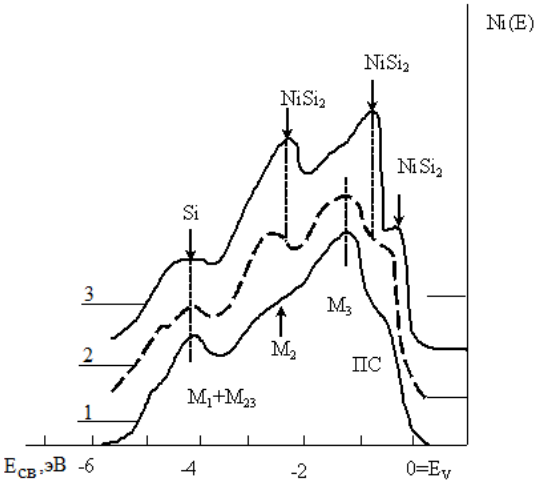


Рис. 6. УФЭС Si с нанопленкой $NiSi_2$ толщиной h, Å: 1 – 0, 2 – 50, 3 – 200.

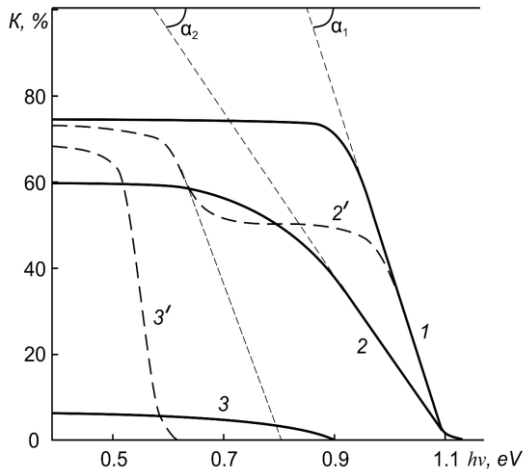


Рис. 7. Зависимости К(hν) для Si (111), имплантированного ионами Ni^+ с E_0 = 1 кэВ при дозах D, $см^{-2}$: 1 – 0; 2 – 10^{15}; 3 – $6\cdot10^{16}$. 2′ и 3′ - после прогрева при Т=900К

На рис. 7 приведены зависимости К(hν) для Si (111) имплантированного ионами Ni^+ с E_0 = 1 кэВ при дозах D = 10^{15} и $6{\cdot}10^{16}$ $см^{-2}$. При D = 10^{15} $см^{-2}$ на поверхности Si (111) формируются отдельные кластерные фазы состоящие в основном из несвязанных атомов Si, Ni и соединений типа NiSi и $NiSi_2$. Через эти фазы свет практически не проходит, поэтому значение К резко уменьшается до 40 – 50 %, т.е. можно полагать, что степень покрытия поверхности этими фазами составляет ~ 0.4. При D = $D_{sat.}$ = $6{\cdot}10^{16}$ $см^{-2}$ интенсивность проходящего света при hν ≤ 0.5 – 0.6 эВ составляет ~ 8 – 10 %, а при hν ≥ 0 – не превышала 3 – 5 %. По-видимому, наличие некоторого количества (~ 15 – 20 ат.%) соединений типа NiSi, $NiSi_2$ и несвязанных атомов Si способствует прохождению света с очень малой интенсивностью. При имплантации ионов Ni наряду с аморфизацией резко изменяется состав приповерхностных слоев, значение E_g уменьшается до 0.2 – 0.3 эВ следовательно, экспоненциальная часть кривой К(hν) резко увеличивается.

После прогрева этих же образцов при T = 900 K на поверхностных слоях Si формируются эпитаксиальные нанокристаллические фазы и пленки $NiSi_2$ с толщиной 50 – 60 Å. Следовательно, структура зависимости К(hν) резко изменяется (кривые $2^/$ и $3^/$). Экстраполяция этих кривых к оси hν показывает, что E_g нанокристалла $NiSi_2$ в данном случае составляет 0.8 эВ, а нанопленки – 0.6 эВ. Кристаллизация приводит к существенному росту значения К.

Формирование пленки $NiSi_2$ приводит к существенному изменению плотности состояния валентных электронов. Явно выраженные особенности в ней обнаруживаются при энергиях −1.0, −2.7 и −4.0 эВ.

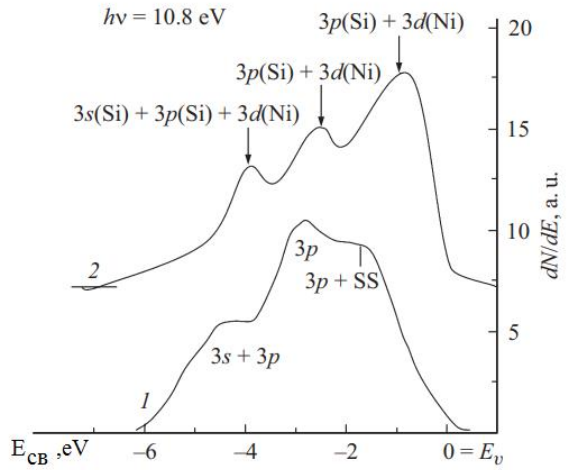


Рис. 8. УФЭС для 1 – n-тип Si (111); 2- нанопленки $NiSi_2$/Si (111) с d = 3.5−4.0 nm

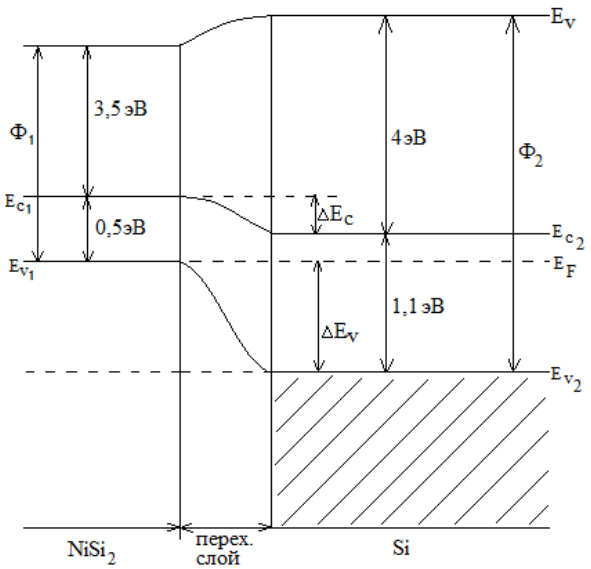


Рис. 9. Примерная зонно-энергетическая диаграмма системы $NiSi_2$/Si(111)

Эти особенности, по-видимому, формируются вследствие гибридизации 3d ($3d_{5/2}$ и $3d_{3/2}$) состояния Ni с 3p− и 3s-состояниями Si. В таблице 2 приведены некоторые физические параметры Si и пленки $NiSi_2$/Si с толщиной d = 3.0 и

6.0 nm, где φ и Φ - термо- и фотоэлектронная работы выхода, E_g - ширина запрещенной зоны, χ - сродство к электрону, σ_m - максимальное значение коэффициента ВЭЭ, Y - квантовый выход фотоэлектронов, ρ - удельное сопротивление.

Таблица 2

Зонно-энергетические, эмиссионные и оптические параметры Si (111) и пленки $NiSi_2$/Si (111)

Образец	d,nm	φ, эВ	Φ, эВ	E_g,эВ	χ, эВ	σ_m	Y	ρ,μОм·cm
Si(111)	0	4.7	5.1	1.1	4	1.1	$2\cdot10^{-4}$	$5\cdot10^{6}$
$NiSi_2$/Si(111)	3.0	4.3	4	0.6	3.4	1.5	$4\cdot10^{-4}$	80
	6.0	-	4	0.5	3.5	1.6	$4\cdot10^{-4}$	60
	50.0	4.2	4	0.5	3.5	1.6	-	55

На основе таблицы 2 нами поострена энергетическая зонная диаграмма системы $NiSi_2$/Si (d_{NiSi2} ≈6 нм). Из рис.9 видно, что на границе системы формируется переходной слой толщиной 2-3 нм. Разрыв краев зоны проводимости ΔE_c определялся по формуле

$$\Delta E_c = E_{c_1} - E_{c_2}$$

Разрыв краев валентных зон:

$$\Delta E_V \approx E_{V_1} - E_{V_2}$$

Согласно этим формулам для контакта $NiSi_2$/Si (111) $\Delta E_c \approx 0{,}4\ эВ$ и $\Delta E_V \approx 1\ эВ$.

На рис. 10. приведены спектры I(h*ν*) для $NiSi_2$/Si(111), полученные после прогрева при различных температурах в интервале 900-1300 К. Прогрев при каждой Т проводился в течение 40 мин. Видно, что при Т=900 К значение К резко уменьшается, начиная с h*ν* ≈ 0,5 эВ. Экстраполяция этой части кривой к оси h*ν* приблизительно даёт значение E_g пленки, которая равно 0,58 эВ. Пленка $NiSi_2$ очень тонкая, поэтому малоинтенсивный свет проходит и при h*ν* >0,6 эВ.

После прогрева при Т=1000 К интенсивность проходящего света в области h*ν* = 0,6-1,1 эВ заметно увеличивается, что связано с формированием микроотверстий в пленке $NiSi_2$. При увеличении Т до 1100 К интенсивность света проходящего при h*ν* > 0,6 эВ существенно увеличивается и составляет ~0,2-0,3., т.е. диаметры отверстий увеличиваются (может быть появляются также новые отверстия).

При Т=1200 средние размеры островков уменьшаются до 20-25 нм, а значение E_g увеличивается и составляет ~0,78 эВ. При Т ≈1400 К пленка $NiSi_2$ полностью испаряется с поверхности.

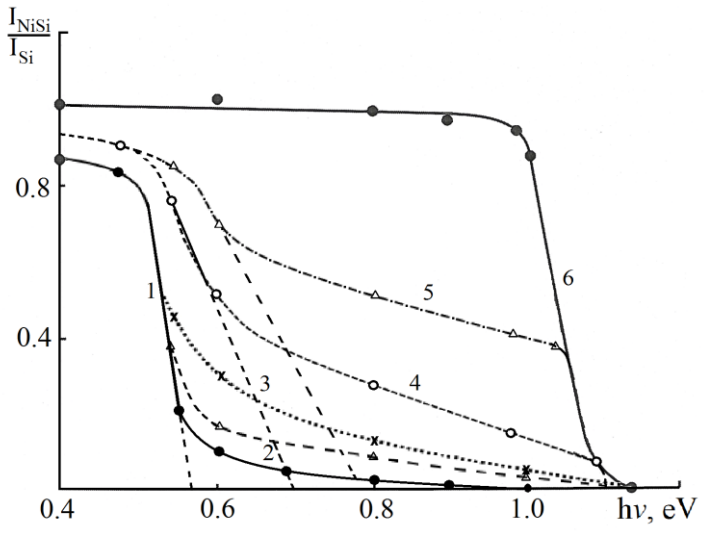


Рис. 10. Зависимости I(hν) для системы $NiSi_2$/Si(111), измеренных после прогрева при Т,К: 1-900 К, 2-1000 К, 3-1050 К, 4-1150, 5-1200, 6-1400

Четвертая глава «**Состав, структура и электронные свойства скрытых слоев $NiSi_2$, созданных в Si (111)**» посвящена получению нанокристаллическых фаз и слоев $NiSi_2$ на различных глубинах приповерхностной области Si и определению их размеров, изучению кристаллической структуры и параметров зон, а также изучению изменения состава и электронной структуры в переходном слое, образующихся на границе гетероструктуры $NiSi_2$/Si.

Из рис. 11. видно, что в случае ТФЭ при Т=1000 К растёт сплошная однородная поликристаллическая пленка Si. Граница раздела между слоями Si/$NiSi_2$ и $NiSi_2$/Si(111) резкая и толщина переходных слоев не превышает 4-5 нм.

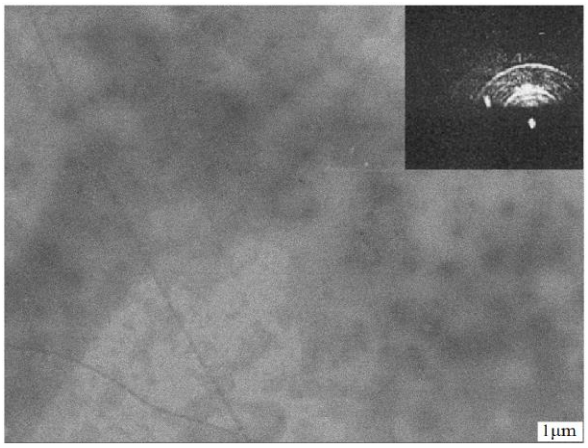


Рис. 11. РЭМ- и ДБЭ (вставка) изображения поверхности системы Si/$NiSi_2$/Si(111). Пленка Si напылялась при Т≈1000 К толщиной ~50 нм

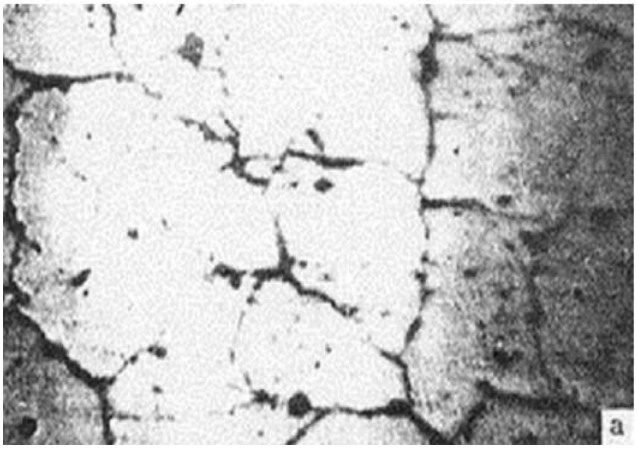


Рис. 12. РЭМ – изображение поверхности системы Si/$NiSi_2$/Si(111), подвергнутой прогреву при Т=1150 К в течение 40 мин

Послеростовый отжиг приводит к изменению ρ при T ≥ 900-1000 К. При T ≈1150 К , ρ уменьшается до минимума а затем резко увеличивается. Последнее объясняется разложением пленки Si на отдельные островки.

Скрытые нанокристаллические фазы и сплошные слои $NiSi_2$ в приповерхностном слое монокристаллического Si, полученные имплантацией ионов Ni^+ с вариацией энергии E_0 от 15 до 30 кэВ и дозы от 10^{14} см$^{-2}$ до 10^{17} см$^{-2}$ с последующим отжигом при температуре формирования монокристаллического $NiSi_2$.

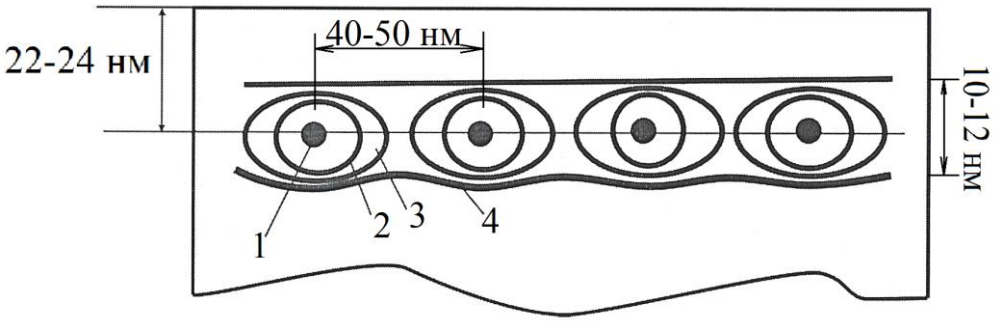


Рис.13. Схематические изображения нанофаз (1-3) и нанослоя (4) $NiSi_2$, расположенных в приповерхностном слое Si. 1-D=$2\cdot10^{14}$ см$^{-2}$; 2-$2\cdot10^{15}$ см$^{-2}$; 3-$8\cdot10^{15}$ см$^{-2}$; 4-$8\cdot10^{16}$ см$^{-2}$.

На рис. 13. представлен схематический разрез нанофаз и нанослоя. Можно полагать что до дозы D≈10^{15} см$^{-2}$ нанокристаллические фазы $NiSi_2$ формируются в виде сфер, а при D>10^{15} см$^{-2}$ переходят в форму близкую к эллипсоиду и при D=$8\cdot10^{16}$ см$^{-2}$ образуется сплошной однородный слой $NiSi_2$

Для этих образцов были сняты зависимости интенсивности *I* проходящего света от энергии фотонов в интервале hν=0,4-1,2 эВ (рис.14).

Видно, что значение E_g для НК фаз $NiSi_2$ с d ≈ 5-6 нм составляет ~1,07 эВ. С ростом d значение E_g монотонно уменьшается и при d ≈ 30-35 нм составляет ~0,6 эВ, что приближается к E_g сплошного слоя $NiSi_2$. Можно полагать, что в случае нанофаз $NiSi_2$ квантово-размерные эффекты проявляются при d ≤ 30-35 нм.

Нами также методом ионной имплантации в сочетании с отжигом получена четырёхслойная система $NiSi_2$/Si/$NiSi_2$/Si(111). Для этого ионы Ni^+ сначало имплантировались в Si сравнительно с высокой энергией (20-30 кэВ), после чего образец прогревался при T=900-950 К в течение 30-40 мин., а затем на этот же участок поверхности ионы Ni^+ направлялись с низкой энергией (0,5-3 кэВ) и прогревались при T=900-950 К в течение 30-40 мин.

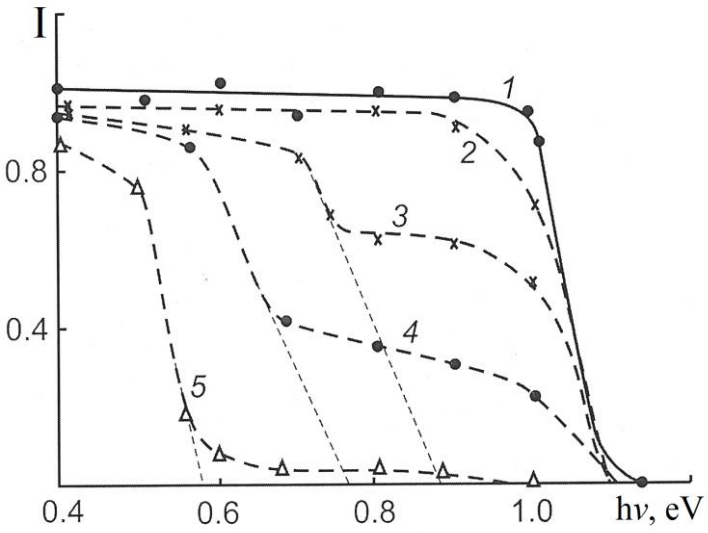


Рис.14. Зависимости I (hν) для Si (111), имплантированного ионами Ni^+ с E_0=25кэВ, при дозах D, $см^{-2}$: 1 - 0; 2 - $2\cdot10^{14}$; 3 - $2\cdot10^{15}$; 4 - $8\cdot10^{15}$; 5 - $8\cdot10^{16}$. Во всех случаях после имплантации проводился прогрев до T=800-900 К.

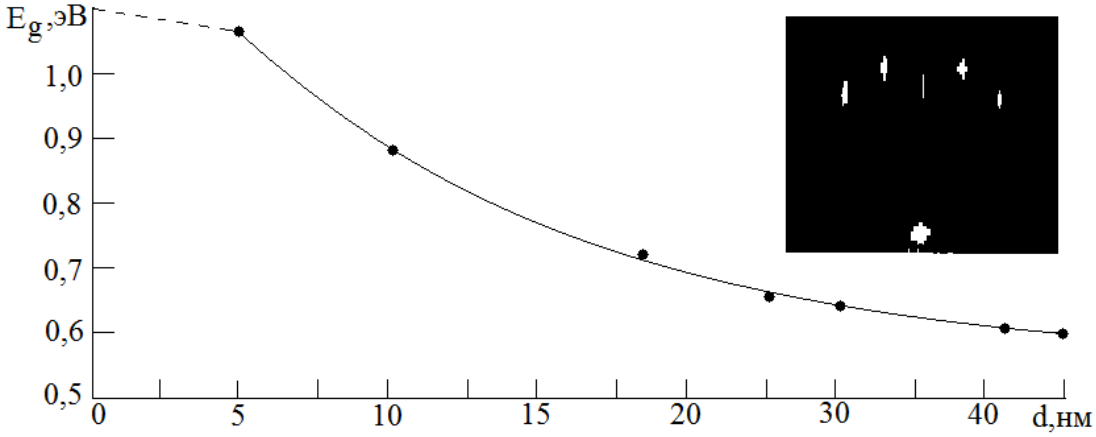


Рис.15. Зависимость E_g от размеров НК фаз $NiSi_2$. На вставке ДБЭ картина поверхности системы $Si/NiSi_2/Si(111)$

При низких дозах ($D \leq 5\cdot10^{15}$ $см^{-2}$) формировались двухслойные нанофазы $NiSi_2$ на поверхности и в приповерхностом слое, а при $D=D_H\approx(6\text{-}10)\cdot10^{16}$ $см^{-2}$ –нанослои $NiSi_2$.

На рис. 16 приведены спектры поглощения света (зависимости I(hv)) для чистого Si(111), Si(111) с объемными нанофазами $NiSi_2$ и Si(111) с нанофазами на поверхности и в приповерхностном слое, а также Si(111) с двумя нанослоями $NiSi_2$. Энергии и дозы ионов Ni^+ соответствует энергиям и дозам, приведенным на рис 15 . Из кривой 2 рис.16 видно, что значение E_g для нанокристаллических фаз $NiSi_2$ с d ≈ 10 нм составляет ~0,88 эВ, а степень покрытия в этом слое нанокристаллическими фазами составляет ~0,3 . В случае Si(111) с нанофазами на поверхности и в приповерхностном слое значение E_g уменьшается всего лишь на ~0,05 эВ.

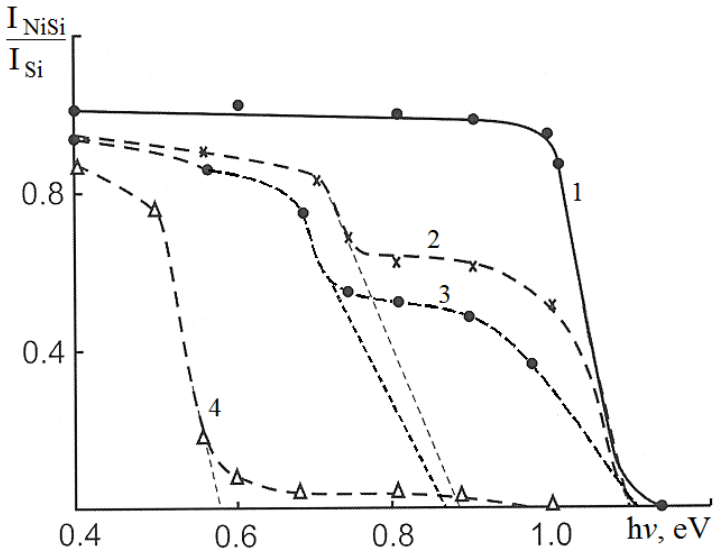


Рис. 16. Зависимости I(hν) для: 1-Si (111); 2-Si(111), с скрытыми нанофазами $NiSi_2$, 3- Si (111) с нанофазами $NiSi_2$ на поверхности и в объеме, 4-Si (111) с нанослоями $NiSi_2$ на поверхности и в обьеме. Энергия ионов E_0=25 кэВ и 1 кэВ. Нанофаза получена имплантацией ионов Ni^+ с $D \approx 10^{15}$ см$^{-2}$, нанослой - с $D=8 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$.

Однако, при этом степень покрытия НК фазами увеличивается до 0,5. Можно полагать, что НК фазы $NiSi_2$, созданные на двух слоях, мало влияют на E_g этих фаз, однако из-за частичного перекрытия нанофаз поверхностного и нижнего слоев степень покрытия увеличивается в ~1,5 раза. Из рис. 16. видно, что значения E_g для НК фаз значительно болше, чем E_g сплошных слоев $NiSi_2$. Можно полагать, что в случае нанофаз $NiSi_2$ с $d \leq 20$-25 нм явно проявляются квантово-размерные эффекты.

Что касается двухслойной системы $NiSi_2$, то значение E_g практически не отличается от E_g скрытого слоя $NiSi_2$ и составляет ~0,57 эВ.

С использованием ионной имплантации нами получены омические контакты на поверхности тонких пленок $NiSi_2$/Si(111). Результаты экспериментов показали, что значение ρ $NiSi_2$ составляет $4 \cdot 10^{-5}$, а высота Шоттки $NiSi_2$/Si (111) составляет 0.6 эВ.

Заключение

1. Впервые изучено влияние разупорядочения поверхности монокристаллического кремния на его оптические свойства. Показано, что с ростом степени разупорядочения коэффициент поглощения света увеличивается, коэффициент пропускания - уменьшается, а коэффициент отражения - заметно не меняется. Экспериментально оценена толщина разупорядоченных слоев $l_э$ кремния после высокодозной бомбардировки ионами Ar^+ которая при E_0=1 кэВ составляла $l_э \approx$ 100-120 Å, при E_0=2 кэВ - ≈150-160 Å. При этом значение E_g увеличивается всего лишь на 0,1 эВ, а плотность состояния электронов валентной зоны резко изменяется.

2. Получены пленки $NiSi_2$/Si(111) методом напыления Ni на Si с последующим прогревом до T≈850-900 К в течение 40 мин. Установлено, что в интервале толщины никеля $h_{Ni} \approx$ 20-60 Å формируется островковая пленка $NiSi_2$ а в интервале h_{Ni}=80-200 Å – сплошная эпитаксиальная пленка $NiSi_2$. Шероховатость поверхности пленок составляла 7-8 нм.

3. Ширина запрещенной зоны островковой и сплошной пленки $NiSi_2$ мало отличаются друг от друга и составляет 0,58-0,6 эВ, а их удельные сопротивления отличались от 100 до 1000 раз. На спектре фотоэлектронов островковой пленки обнаружились особенности характерные как для Si, так и $NiSi_2$.

4. Имплантацией ионов Ni^+ с E_0=1-5 кэВ в сочетании с прогревом на поверхности Si получены нанокристаллические фазы и пленки $NiSi_2$ толщиной от 25-30 Å до 50-60 Å. Впервые показано, что кристаллографическая ориентация и постоянная решетки нанопленки $NiSi_2$ полностью совпадают с таковыми подложки Si(111).

5. Впервые изучены электронная структура, оптические и эмиссионные свойства, параметры энергетических зон нанофаз и нанопленок $NiSi_2$. Показано, что плотность состояний валентных электронов $NiSi_2$ образуется в основном гибридизацией $3d_{5/2}$ и $3d_{3/2}$ состоянии Ni с 3p- и 3s- состояниями Si. Выяснены основные механизмы формирования тонкой структуры на спектре фотоэлектронов $NiSi_2$. Построена зонно - энергетическая диаграмма системы $NiSi_2$/Si(111).

6. Установлено, что послеростовый отжиг ТФЭ системы $NiSi_2$/Si(111), сначало приводит к появлению в пленке $NiSi_2$ различных микроотверстий (в интервале T=1000-1100 К), затем к появлению островков (1150-1300 К). При T=1200 К средние размеры островков $NiSi_2$ уменьшаются до 20-25 нм и значение E_g увеличивается до 0,78 эВ, т.е. начинают проявляться квантово-размерные эффекты.

7. Показано, что трехслойная наногетероструктура Si/$NiSi_2$/Si(111), полученная методом ТФЭ, выдерживает отжиг до T≈1000 К. При T≈1100 К формируется островковая пленка Si, что объясняется изменениями происходящими в пленке $NiSi_2$ (формирования отверстий, островков).

8. Впервые методом ионной имплантации в сочетании с отжигом получены скрытые нанофазы и слои $NiSi_2$ в Si и изучены их состав,

структура, электронные и оптические свойства. Показано, что в случае нанофаз $NiSi_2$ квантово-размерные эффекты проявляются при $d \leq 20$-25 нм.

9. Разработана методика получения четырехслойных наногетероструктур $NiSi_2/Si/NiSi_2/Si(111)$. Определены зонно-энергетические параметры каждого слоя системы.

10. Даны научно-обоснованные рекомендации по применению полученных результатов в создании транзисторов с проницаемой базой и в создании омических контактов в нанослойных структурах.

SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING OF SCIENTIFIC DEGREES PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 OF KARSHI STATE UNIVERSITY

KARSHI STATE UNIVERSITY

MUSTAFOEVA NODIRA

STRUCTURE AND ELECTRONIC PROPERTIES OF SILICIDE NANOFILMS OBTAINED BY HIGH VACUUM DEPOSITION AND ION IMPLANTATION

01.04.04 – Physical electronics

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

Karshi – 2022

The subject of doctor of philosophy dissertation is registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2020.2.PhD/FM506.

Dissertation has been prepared at Karshi State University and Tashkent State Technical University named after Islam Karimov.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (rasume)) has been posted on the website of the Scientific Council (www.qarshidu.uz) and on Information-education portal «ZiyoNet» (www.ziyonet.uz).

Scientific consultant:	**Tashatov Allanazar Karshiyevich** doctor of physical and mathematical sciences, professor
Official opponents:	**Turaev Ergash Yuldoshevich** doctor of physical and mathematical sciences, professor
	Bekpulatov Ilhom Rustam o'g'li candidate of physical and mathematical sciences, PhD., associate professor
Leading organization:	**Institute ion – plasma and laser technology named after U.A. Arifov**

The defense will take place on «___» _____ 2022 at _____ at the meeting of scientific council number PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 for the award of academic degrees at Karshi State University (Address: 180119, Uzbekistan, Karshi, 17 Kuchabag Street. Phone/fax: (99875) 225–34–13, e-mail: kardu@mail.ru).

The doctoral dissertation is possible to review in Information-resource centre at Karshi state university (is registered № ____) (Address: 180119, Uzbekistan, Karshi, 17 Kuchabag Street. Phone/fax: (+99875) 225-34-13, e-mail: kardu@mail.ru).

The Abstract of the dissertation sent out on «___» _____ 2022.
(Mailing report №___ on «___» _____ 2022).

Normuradov M.T.
Chairman of Scientific Council on award of scientific degrees, doctor of physical and mathematical sciences, professor

Allayarova G.X.
Scientific secretary of scientific council on award of scientific degrees, candidate of physical and mathematical sciences, PhD

Donaev S.B.
Chairman of scientific seminar under scientific council on award of scientific degrees, doctor of sciences, docent

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

Heterostructures from $MeSi_2$/Si nanoparticles formed on the Si surface using popular technology, microwave transistors and integrated circuits, radiation detectors, optoelectronic devices, thin ohmic contacts and barrier (barrier) MIS, the creation of SIS structures creates new opportunities for achieving promising results in field of physical electronics.

The aim of the research work study of the physical regularities of the formation of nanoscale phases and layers of $NiSi_2$ on the surface and in the near-surface region of Si during solid-phase deposition and ion bombardment, study of their composition, electronic and crystal structure, emission and optical properties.

The objects of research work are single-crystal films and samples of Si, nanophases and nanolayers of $NiSi_2$.

Scientific novelty of the research work:

the main reasons for the change in the optical parameters of single-crystal Si during the disordering of the surface by bombardment with Ar + ions have been established

it was shown that during SPE growth of a $NiSi_2$ film to a thickness of 180-250 Å, island growth is observed, while at Å continuous films are formed. The surface morphology, composition, electronic and crystal structure of TFE $NiSi_2$ / Si (111) films have been studied for the first time

the regularities of changes in the morphology, composition and electronic structure of $NiSi_2$ / Si (111) films during heating in the range of T≈1000-1400 K have been studied. The sizes of nanophases at which quantum-size effects begin to manifest themselves have been determined.

for the first time obtained and studied the composition, crystal and electronic structures of hidden nanophases and nanolayers of $NiSi_2$ at various depths of Si (111). A relationship has been established between changes in the size and width of the band gap of the hidden nanocrystalline phases of $NiSi_2$.

the processes of formation of four-layer epitaxial nanolayer systems $NiSi_2$/Si/$NiSi_2$/Si (111) during the implantation of Ni ions in Si with subsequent annealing have been studied.

Implementation of the research results. At the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan on the basis of the State Scientific and Technical Program Isakhanov Z.A. № OT - F3-13 "Investigation of the mechanisms of formation of multilayer nanofilm structures that do not contain silicon-silicon-metal, their electronic and crystal structures", implemented in 2017-2020.

experimental setup for ultrahigh vacuum, designed to study changes in the composition, structure and surface defects of single-crystal samples during heat treatment, deposition and ion bombardment. On the basis of the developed technological process, indicated in the scientific work, in OAJ "FOTON" samples were made, as a result of which high-sensitivity photosensitive sensors based on silicon doped with nickel-containing atoms were created. At the same time, a method for producing thin silicon layers was considered.

The results of scientific work are at the level of samples of sensors produced in the world, and their electrophysical parameters correspond to international standards.

Structure and volume of dissertation. Dissertation consists of introduction, four chapters, conclusion and a list of references. The text of the thesis is presented on 125 pages of typewritten text, including 59 figures and 4 tables.

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

1-бўлим (1-часть, part 1)

1. B.E.Umirzakov, D.A.Tashmukhamedova, A.K.Tashatov, N.M. Mustafoeva, D.M. Muradkabilov. Effect of the Disordering of Thin Surface Layers on the Electronic and Optical Properties of Si(111) // Semiconductors, 54(11). 2020. с. 1424-1429 (№3 Scopus: IF=0,67)

2. A.K.Tashatov, N.M.Mustafoyeva. Surface Morphology of $NiSi_2$/Si Films Obtained by the Method of Solid-Phase Deposition // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, Vol.14, No 1. 2020. pp. 81-84 (№3 Scopus: IF=0,36)

3. A.K.Tashatov, N.M.Mustafoyeva, B.E.Umirzakov D.A.Tashmuxamedova. Electronic and Optical Properties of $NiSi_2$/Si Nanofilms // Technical Phusics, Vol.64, Issue 5 (2019), pp. 708-710 (№3 Scopus: IF=0,603)

4. А.К. Ташатов, Н.М. Мустафоева. Морфология, состав и структура поверхности пленок $NiSi_2$/Si полученных методом твердофазной эпитаксии // Узбекский физический журнал. – Тошкент, 2021. – №2. – Б.55-60. (01.00.00. №5)

5. А.К. Ташатов, Н.М. Мустафоева. Гетероструктуры Si/$NiSi_2$/Si полученных методом твердофазного осаждения // ҚарДУ хабарлари. – Қарши, 2021.– №4. – Б. 23-26. (01.00.00. ОАК Раёсатининг 2021 йил 31 мартдаги 295/6-сон қарори)

II- бўлим (II-часть, part II)

6. А.К.Ташатов, Н.М. Мустафоева. Морфология поверхности пленок $NiSi_2$/Si полученных методом твердофазной эпитаксии // Тенденции развития современной физики полупроводников: проблемы, достижения и перспективы; Сборник материалов международной онлайн конференции (www.e-science.uz); Ташкент. 2020. с.92-97

7. А.К. Ташатов, Н.М.Мустафоева. Формиравание структуры пленок силицидов металлов исследование структуры поверхности нанопленок $NiSi_2$/Si // ҚарДУ хабарлари, № 3, Қарши 2017. с.16-19

8. А.К. Ташатов, Н.М. Мустафоева, Р.Р. Худаяров, А.Р. Турсунов. Влияние разупорядочения тонких поверхностных слоев на оптические свойства кремния // Министерество науки и высшего образования российской федерации национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ” VII международная конференция “Лазерные,плазменные исследования и технологии” ЛАПЛАЗ. Москва, 2021. с.325-326

9. А.К. Ташатов, Н.М. Мустафоева. Исследование физические и оптические свойства нанопленок $NiSi_2$/Si // Министерество науки и высшего образования российской федерации национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ” VII международная конференция

“Лазерные, плазменные исследования и технологии” ЛаПЛАЗ. Москва, 2021. с.333-334

10. А.К. Ташатов А.К, Б.Е. Умирзаков, Н.М. Мустафоева. Морфология поверхности пленок $NiSi_2/Si$ (111) полученные методами эпитаксии // XLVII международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва-2017. с.141

11. А.К. Ташатов А.К, Н.М. Мустафоева, Ш.Х. Джураев. Морфология поверхности $NiSi_2/Si_2$ полученных методом твердофазного осаждения // Республиканская конф.(с участием ученых стран СНГ) «Современные проблемы физики полупроводников» СПФП-2019, Нукус 2019 г. с.184-187

12. А.К. Ташатов, Б.Е. Умирзаков, Н.М. Мустафоева. Изучение морфология поверхности с использованые методов РЭМ и АСМ // Министерество науки и высшего образования российской федерации национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ” VI международная конференция “Лазерные,плазменные исследования и технологии ЛаПЛАЗ-2020 ” Москва. 2020. с. 92-93

13. А.К. Ташатов, Б.Е. Умирзаков, Н.М. Мустафоева. Изучение морфологии поверхности пленок $NiSi_2/Si$ используемых в приборах солнечной энергетики // Фотоэнергетикада наноструктурали яримўтказгич материаллар, Халқаро илмий анжумани, 9-10 октябр, Тошкент-2020. с.315-317

14. А.К. Ташатов, Н.М. Мустафоева. Исследование электронно-оптические свойства нанопленок $NiSi_2/Si$ // Фотоэнергетикада наноструктурали яримўтказгич материаллар, Халқаро илмий анжумани, 9-10 октябр, Тошкент-2020. с.320-321

15. А.К.Ташатов, Н.М.Мустафоева, Б.Е.Умирзаков, Д.А.Ташмухамедова. Определение параметров энергетических зон и постоянных решеток силицидов металлов // XXIII Международной конференция Взаимодействие ионов с поверхностью “ВИП-2017”, Москва-2017. с.147-149

16. А.К. Ташатов, Н.М. Мустафоева, Л.Х. Азизова. Исследование влияние ионной имплантации на состав, структуру и оптическое свойства кремния // Мирзо Улуғбек номидаги Ўзбекистон миллий университети. Физика фанининг ривожида истеъдодли ёшларнинг ўрни. Тошкент. РИАК-XIV-2021. с.192-196

17. А.К. Ташатов, Н.М. Мустафоева, Д.А. Ташмухамедова, М.Т. Нормуродов, А.А. Абдуваитов. Получение многомлойной наносистемы $Si/NiSi_2/Si$ (111) // XLIX международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва 2019 с.38

18. А.К. Ташатов, Н.М. Мустафоева. Изучения состава, морфологии и электронной структуры нанопленок $NiSi_2$, полученных на поверхности Si (111) с использованием метода твердофазного осаждения //“Роль физики в современном образовании” Материалы республиканской научно-практической конференции. Самарканд-2019. с. 242-243

19. А.К. Ташатов, Н.М. Мустафоева, Д.М. Исроилов, И.Ш. Тошпулатов. Элекронные свойства наноразмерных структур MeSi, созданных в приповенхностном слое Si //Материалы республиканской научно-практической конференции с участием зарубежных ученых. «Инновационные технологии в науке и образовании» I Том. Нукус-2018. с. 99-103

20. А.К. Ташатов, Н.М. Мустафоева. Морфология, состав и структура поверхности пленок $NiSi_2$/Si, полученных методом твердофазной эпитаксии // Международной научно-практической интернет-конференции «Тенденции и перспективы развития науки и образования в условиях глобализации» 31 августа 2021 г. Вып. 74. Переяслав – 2021. с.110-113

21. А.К. Ташатов, Н.М. Мустафоева, Д. Хакимова, А.М. Санакулова. Изучение состава, морфологии и электронной структуры нанопленок $NiSi_2$, полученных на поверхности Si(111) //«Энерго- и ресурсосбережение: новые исследования, технологии и инновационные подходы» Сборник трудов международной конференции. Карши 24 – 25 сентября 2021 г. с.400-403

22. Б.Е. Умирзаков, А.К. Ташатов, Н.М. Мустафоева. Влияние разупорядочения тонких поверхностных слоев на кеэффицент поглащения света Si (111) // I- Международная конференция «фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников, микро- и наноэлектроники» республика Узбекистан, Ташкент 28-29 октября 2021 г. с.68-70.

Автореферат Қарши Давлат Университетининг «ҚарДУ хабарлари» илмий-назарий, услубий журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди. (27.01.2022 йил)

Гувохнома №16-1700
Босишга рухсат этилди: 27.01.2022 йил.
Бичими 60x84 $^{1}/_{16}$, «Times New Roman»
гарнитурада рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табоғи 2,9 Адади: 100. Буюртма: №60

Ўзбекистон Республикаси Қашқадарё вилояти Қарши шахри
И.Каримов ва А.Темур кўчалари чоррахаси.

«Азизбек Офсет Барака» МЧЖ