

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

**ИСЛОМ ҚАРИМОВ НОМИДАГИ ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА
УНИВЕРСИТЕТИ**

ТУРАПОВ ИЛХОМ ХИММАТАЛИЕВИЧ

**Si СИРТИДА ҲОСИЛ ҚИЛИНГАН Co ВА Mn СИЛИЦИД
ПЛЁНКАЛАРИНИНГ ТУЗИЛИШИ ВА ЭЛЕКТРОН
ХОССАЛАРИ**

01.04.04 – Физик электроника

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

Қарши – 2022

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

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

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

Турапов Илхом Химматалиевич

Si сиртида ҳосил қилинган Co ва Mn силицид плёнкаларининг
тузулиши ва электрон хоссалари..... 5

Турапов Илхом Химматалиевич

Структура и электронные свойства пленок силицидов Co и Mn,
полученных на поверхности Si..... 25

Turapov Ikhom Khimmatalievich

Structure and electronic properties of Co and Mn silicide films produced
on a Si surface..... 47

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 51

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

**ИСЛОМ КАРИМОВ НОМИДАГИ ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА
УНИВЕРСИТЕТИ**

ТУРАПОВ ИЛХОМ ХИММАТАЛИЕВИЧ

**Si СИРТИДА ҲОСИЛ ҚИЛИНГАН Co ВА Mn СИЛИЦИД
ПЛЁНКАЛАРИНИНГ ТУЗИЛИШИ ВА ЭЛЕКТРОН
ХОССАЛАРИ**

01.04.04 – Физик электроника

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

Қарши – 2022

Филсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси "Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси хузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2022.2.PhD/FM468 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ислон Қаримов номидаги 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.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:	Умирзаков Балтоходжа Ерматович физика-математика фанлари доктори, профессор
Расмий оппонентлар:	Исаханов Зайнобиддин Абилайевич физика-математика фанлари доктори, к.и.х. Алиқулов Мўйсин Нортгошевич физика-математика фанлари номзоди, доцент
Етақчи ташкилот:	Мирзо Улуғбек номидаги Ўзбекистон миллий университети

Диссертация химояси Қарши давлат университети хузуридаги илмий даражалар берувчи PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 рақамли Илмий кенгашнинг 2023 йил "12" *январ* соат 14⁰⁰ даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 180103, Қарши шаҳри, Кўчабоғ кўчаси, 17. Тел.: (0 375) 225-34-13; факс: (0375) 221-00-56; e-mail: qarshidu@umail.uz). Қарши давлат университети 2-бино, 127-хона.

Диссертация билан Қарши давлат университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (145 рақами билан рўйхатга олинган). (Манзил: 180103, Қарши шаҳри, Кўчабоғ кўчаси, 17. Тел.: (0 375) 225-34-13; факс: (0375) 221-00-56; e-mail: qarshidu@umail.uz).

Диссертация автореферати 2022 йил "30" *декабр* куни тарқатилди (2022 йил "30" *декабр* даги № 3 рақамли реестр баённомаси).



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

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

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

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда ҳозирги вақтда силицид материаллар асосида наноўлчамли плёнкалар ва кўп қатламли тузилмаларни олиш уларнинг физик-кимёвий хоссаларини ўрганишга алоҳида аҳамият берилмоқда. Бугунги кунда жаҳон миқёсида кобальт ва марганец силицидлари алоҳида қизиқиш уйғотмоқда. Кремний ва дисилицид кобальтнинг панжара доимийлари бири-бирига мос бўлганлиги сабабли $\text{Si-CoSi}_2\text{-Si}$ (яримўтказгич-металл-яримўтказгич), $\text{CoSi}_2\text{-Si-CoSi}_2$ (металл-яримўтказгич-метал) каби юқори сифатли эпитаксиал кўп қатламли гетероструктураларни, металл ва яримўтказгич асосли микротўлқинли транзисторлар, ҳажмий интеграл схемалар, OLED дисплейлар, оптик резонаторлар, элементлар хотираси ва бошқа қурилмаларни яратишга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Жаҳонда олий марганец силицидларининг (ОМС) оптоэлектроника, спинтроника, термоэлектрик батареялар, магнит хотиралар ва магнит сенсорларда қўлланилишини такомиллаштиришга қаратилган илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда. Ушбу йўналишда, жумладан, олий марганец силицидлар асосида температурага ва ташқи тасирга чидамли ёруғликка сезгир наноўлчамли p ва n типли қурилмаларни ишлаб чиқариш бўйича тадқиқотлар устувор ҳисобланмоқда. Шу билан бирга, кобальт ва марганецнинг наноўлчамдаги плёнкаларини синтез қилиш технологиясини ишлаб чиқиш, уларнинг тузилиши ва хоссаларини аниқлаш, янги бирикмаларнинг ҳосил бўлиш механизмларини ўрганиш физик электрониканинг долзарб вазифалардан ҳисобланмоқда.

Республикамизда сўнгги йилларда микроэлектроника ва наноэлектроника қурилмаларида ишлатиладиган наноматериаллар олишда қаттиқ фазали эпитакция ва ион имплантация усуллари ёрдамида монокристалл кремний ва диэлектриклар сиртида нанофазалар ва наноплёнкалар ҳосил қилинган. Шунингдек, CoSi_2 асосида элементар ва бинар яримўтказгичларга асосланган наноўлчамдаги МДЯ (металл–диэлектрик–яримўтказгич), ЯДЯ (яримўтказгич–диэлектрик–яримўтказгич) – тизимларни синтез қилиш, уларнинг таркиби, тузилиши ва физик хоссаларини аниқлаш ҳамда Mn_4Si_7 плёнкалар асосида термоэлементлар тайёрлаш бўйича инновацион лойиҳалар ва илмий ишланмалар бўйича вазифалар белгиланган. Ушбу вазифаларни амалга оширишда, хусусан, қаттиқ фазали эпитакцияси усулида олинган CoSi_2/Si (111) ва $\text{Mn}_4\text{Si}_7/\text{Si}$ (111) плёнкаларининг юза ва электрон тузилиши, кристалл ҳолатлари, оптик ва электрофизик хусусиятларини аниқлаш қонуниятлари, Si (111) тагликнинг турли температурада қиздириш орқали кичик энергияли Co^+ ионларини имплантацияси билан олинган CoSi_2 плёнкалари ҳамда нанокристалл фазалар шаклланиш механизмларини олиш, CoSi_2 системасининг структураси ва зона-энергетик параметрларини аниқлаш муҳим ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январдаги ПФ-60-сон “2022-2026 йилларга мўлжалланган янги Ўзбекистоннинг Тараққиёт стратегияси тўғрисида” ги Фармони, 2017 йил 17 февралдаги № ПКҚ-2789-сон “Фанлар академияси фаолияти, илмий-тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари

тўғрисида”ги ва 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 тўғрисидаги” қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация иши муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республикада фан ва технологиялар ривожланиши устувор йўналишларига мослиги. Диссертация Ўзбекистон Республикаси фан ва техникасини ривожлантиришнинг II. “Физика, астрономия, энергетика ва машинасозлик” ва III. “Замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника, электрон асбобларни ривожлантириш” устувор йўналишларига мувофиқ бажарилган.

Муаммонининг ўрганилганлик даражаси. Ўтган асрнинг ўрталарида яримўтказгичли электрониканинг пайдо бўлиши билан ионли легирлашнинг яримўтказгичларнинг электрофизик ва оптик хусусиятларига таъсирини ўрганиш, $p - n$ – ўтишлар ҳосил қилиш ва қурилма элементларининг турли асосий қисмлари бўйича илмий тадқиқотлар сони кескин ошиб борди. Бу йўналишда хорижлик олимлар, хусусан, рус олимлари М.В.Гомоюнова (А.Ф.Иоффе номидаги Физико-техника институти, Россия), С.И.Курганскийлар (Воронеж давлат университети, Россия) шогирдлари билан CoSi_2/Si , NiSi_2/Si ва $\text{Si}/\text{CoSi}_2/\text{Si}$ наногетероструктураларининг электрон, оптик ва магнит хусусиятларини ўрганганлар ва илмий изланишларни давом эттирмоқдалар. Олимлар A.L.Schmitt (University of Wisconsin–Madison), A.Deker, J.Kim, K.Lu, J.D.Karter, Y.Chou каби олимлар метали силицидларининг физик хусусиятларини фундаментал илмий томони билан биргаликда уни амалиётга тадбиқ қилиш учун ўз ишларида амалий маслаҳатлар берган. Ж.Пеллег, И.В.Белоусов (Тарас Шевченко номидаги Киев миллий университети, Украина) ва бошқалар экзотермик реакция жараёнида кремний сиртининг структурасида нуқтавий нуқсонлар ҳосил бўлишини ва силицид фазасининг ўз-ўзидан тартибли ўсиб боришини ўрганган. D.V.Migas, S.Kaprara (“La Sapienza” Dipartimento di Fisica, Рим университети, Италия) ва бошқалар марганец силицидларининг тетрагонал фазаларини тадқиқ қилишган ва уларнинг электрон тузилиши ва электрофизик хусусиятларини ўрганган. Хусусан, улар $T \leq 500 \text{ K}$ да $\text{Mn}_{11}\text{Si}_{26}$ силицид $p -$ типида яримўтказгич эканлигини аниқлашган. Barzak S.A., Isoda Y., Chen X.лар термоэлектрик ва фотоэлектрик энергетикада олий марганец силицид, ёруғлик нурларига сезгир эффиктив материал эканлигини кўрсатди. Япон олимлари X.Udono, K.Nakamori (Ibaraki университети) ўз тадқиқотларида бир фазали Mn_4Si_7 силицидининг ўзига хос яримўтказгич эканлигини ва магнит моментга эга эмаслигини илмий ишларида ёритган.

Ўзбекистон олимлари, хусусан, М.Т.Нормурадов, Б.Э.Умирзаков, А.С.Рисбоев ва М.К.Боҳодирхонов, К.П.Абдурахмонов, Т.С.Камиловлар биринчи бўлиб Si юзасида ва сиртга яқин қатламларда Co^+ ва Mn^+ ионларини имплантация ва диффузия усуллари ёрдамида Si сиртида CoSi_2 , Mn_4Si_7 нинг наноўлчамдаги фазалари ва қатламларини олиш механизмларини, уларнинг тузилиши,

эмиссияси ва оптик хусусиятларини ўрганди. Улар Si сиртида ўстирилган CoSi_2 ва Mn_4Si_7 плёнкалари кристаллографик ва иссиқлик хоссаларини ўрганиб жаҳон олимларининг эътиборини тортишди.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация иши Ислом Каримов номидаги Тошкент давлат техника университетидаги Ф-ОТ-2021-422 “Наноўлчамли BaSi_2 ва Mn_4Si_7 плёнкаларининг ҳосил бўлиши ва уларнинг хоссалари” фундаментал лойиҳаси доирасида, ҳамда “Умумий физика” кафедрасининг 2021-2026 йилларга мўлжалланган “Турли табиатдаги (металл, яримўтказгич, диелектрик) материалларнинг паст энергияли ионларни юқори дозасини имплантация қилиш, термик, ИҚ ва лазерли ишлов бериш йўли билан электрон, кристалл структураси ва хоссаларини ўзгартириш” илмий мавзулари билан биргаликда олиб борилган.

Тадқиқотнинг мақсади кремний юзасидага эпитакция ва ион имплантацияси усулларида ўстирилган кобальт ва марганецнинг юпқа силицид плёнкаларининг ҳосил бўлиш қонуниятлари, уларнинг электрон тузилиши, эмиссия, оптик ва электрофизик хусусиятларини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

каттик фаза эпитакция вақтида Si юзасида Co ва CoSi_2 наноплёнкаларининг шаклланишида тартибланган нуқтавий асосларни олдиндан яратишнинг таъсирини ўрганиш. Кичик ўлчамли Co қатламларининг критик ўлчамларини ва яримўтказгичларга хос хусусиятларини аниқлаш;

Co^+ ионлари билан имплантация қилинган Si таглигини ҳар хил ҳарорат шароитларида, таркиби, структураси ва хусусиятларини ўрганиш. Si ва Co атомларининг кимёвий боғланишлар ҳосил бўлишининг асосий механизмларини аниқлаш ва кичик ўлчамли нанофазада CoSi_2 тақиқланган зона кенлиги ортишини баҳолаш;

$\text{CoSi}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ (111) наноплёнкалар тизимини ҳосил қилиш учун лазер чанглатишнинг оптимал режимларини аниқлаш;

CoSi_2 плёнкасини ташкил қилган атомларнинг валентлиги, ўтказувчанлик зоналаридаги электронлар ҳолатининг зичлигига ва энергия зоналари параметрларига субмоноқатламли Cs қопламаларининг таъсирини ўрганиш;

Si (111) таркиби, структураси ва хоссаларига Mn юпқа қатламининг таъсирини ўрганиш;

Si даги Mn нинг термодиффузиясида силицид ҳосил бўлиш жараёнларини ўрганиш. Mn_4Si_7 плёнкаларини ҳосил қилиш учун оптимал шароитларни аниқлаш;

Mn_4Si_7 плёнкасининг электрон тузилиши ва электрофизик хусусиятларини ўрганиш.

Тадқиқотнинг объектини p ва n типли Si (111) монокристаллари, CoSi_2 ва Mn_4Si_7 плёнкалари ташкил этади.

Тадқиқотнинг предмети монокристалл кремний сиртида CoSi_2/Si (111), $\text{Mn}_4\text{Si}_7/\text{Si}$ (111) наноўлчамли металл силицидларнинг шаклланиш қонуниятлари ҳисобланади.

Тадқиқотнинг усуллари. Оже – электрон спектроскопияси (ОЭС), эластик қайтган электронлар спектроскопияси (ЭҚЭС), энергиясини характерли йўқотган электронлар спектроскопияси (ЭХЙЭС), ультрабинафша нурлар фотоэлектрон спектроскопияси (УБФС), юқори энергияли электрон диффракцияси (ЮЭЭД), рентген фазали таҳлил (РФТ), сканерловчи электрон микроскопия (СЭМ).

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

кичик энергияли ($E_0=0.5-1$ кэВ) ва дозаси ($D\approx 8\cdot 10^{14}$ см⁻²) бўлган Ar^+ ионлари билан юзани бомбардимон қилиш усули билан тартибланган Со ва $CoSi_2$ нинг биржинсли наноплёнкалари ҳосил қилинган ва Со нанофазаларининг тақиқланган зонаси $E_g = 0.3$ эВ га тенг ва яримўтказгич хоссасига эга эканлиги аниқланган;

монокристалл кремний таглик 600 К да қиздирилган ҳолда Co^+ ионлари билан имплантация қилинганда бир хил легирланган қатламнинг чуқурлиги 50-60 Å ни ташкил этиши, сиртга яқин қатлам қисман тартибсиз ва Si билан Со атомлари ~ 90 ат.% кимёвий боғ ҳосил қилиши аниқланган;

ВУП-5 қурилмасида SiO_2/Si (111) сиртида $CoSi_2$ мишенени қаттиқ жисм лазери билан чанглатиш усули орқали $CoSi_2/SiO_2/Si$ (111) наноплёнкаси ҳосил қилиниши билан 900 Кда қиздириш орқали поликристалл $CoSi_2/SiO_2/Si$ (111) наноплёнкасининг турли тўлқин узунлигида ёруғликни қайтариш ва ютилиш коэффицентлари турлича эканлиги аниқланган;

$CoSi_2/Si$ (111) юзасида юпқа $\theta \leq 1$ қалинликдаги Cs атомларидан ташкил топган қатламни ўстириш орқали E_g қиймати ва валент электронлари зичлиги ҳолати максималларининг ўрни амалда ўзгармаслиги ва фотоэлектронларнинг чиқиш иши 3 эВ гача камайиши, фотоэлектронларнинг квант чиқиши 3 ёки ундан кўп марта ортиши аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

Ar^+ ионлари билан дастлабки бомбардимон қилиш усули билан тартибланган нанофазалар Со ва $CoSi_2$ наноплёнкалари ҳосил қилинди. Со нанофазалари тақиқланган зонаси $E_g=0.3$ эВ га тенг, яримўтказгичлар хоссасига эга эканлиги кўрсатилган;

SiO_2/Si (111) юзасида биржинсли $CoSi_2$ наноплёнкалари лазер билан чанглатиш усули орқали ҳосил қилинди. $CoSi_2$ плёнкаси қалинлиги 5-6 моноқатламдан 3 моноқатламгача камайиши билан тақиқланган зона кенглиги 0,65 эВ дан 0,8 эВ гача ортиши аниқланган;

юқори вакуум шароитида ($P=10^{-7}$ Па) Si сиртидаги Mn нинг термик қиздирилишида марганец силицидларининг ҳосил бўлиш қонуниятлари ўрганилди. $T\approx 1100$ К да тетрагонал панжарали монокристалли Mn_4Si_7 силицид плёнкаси ҳосил бўлиши кўрсатилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги: ишда қўлланилган ёндашув ва усуллар, электрон спектроскопия ва юқори аниқликдаги сирт диагностикасининг замонавий усуллари қўллаш, ўта юқори вакуум шароитидаги тажрибалар ва соф кремний учун натижалар ва бошқа муаллифларнинг маълумотлари статистик таҳлил қилинганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти Si га Co ва Mn атомларини ўтказиш ва Si га Co^+ ионларини имплантация қилиш, сўнгра термик қиздириш жараёнида силицид плёнчаларининг ҳосил бўлиш қонуниятлари ва механизмларини ёритилганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти поликристалл $CoSi_2$ плёнкасининг ёруғликни ютиш ва қайтариш коэффициентларининг тўлқин узунлигига боғлиқлиги натижаларини таҳлил қилиш шуни кўрсатдики, у кўринадиган ва ИҚ соҳаларида юқори сезувчанликка эга эканлиги, бу диапазонларда ишлайдиган наноэлектроник қурилмаларда қўллаш мумкинлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалиётга жорий қилиниши. Монокристалл кремний сиртида ҳосил қилинган Co ва Mn плёнчалари ва силицид структуралари, уларнинг электрон ва оптик хусусиятлари, электрофизик хоссаларини тадқиқ қилиш натижалари ва олинган гетероструктуралар асосида:

кичик энергияли ($E_0=0.5-1$ кэВ) ва дозаси ($D\approx 8\cdot 10^{14}$ см⁻²) бўлган Ag^+ ионлари билан юзани бомбардимон қилиш усули билан тартибланган Co ва $CoSi_2$ нинг биржинсли наноплёнчалари ҳосил қилингани ва Co нанофазаларининг тақиқланган зонаси $E_g=0.3$ эВ га тенг ва яримўтказгич хоссасига эга эканлиги аниқланганига оид хулосаларидан Наманган муҳандислик қурилиши институтида бажарилган ОТ-Ф2-70 рақамли “Кучли электромагнит майдондаги наноўлчамли яримўтказгич параметрларига ҳарорат, деформация ва ёруғликнинг таъсири” номли фундаментал лойиҳани бажаришда фойдаланилган (Наманган муҳандислик қурилиши институти ректорининг 2022 йил 7 сентябрдаги № 06/10-09/753-сон маълумотномаси). Натижада лазер чанглатиш усулида олинган $CoSi_2/SiO_2/Si$ (111) плёнчаларининг турли тўлқин узунлиқдаги ёруғликни қайтариши ва ютилиш коэффициентлари турлича эканлиги, Si сиртида Mn атомларини ҳар хил қалинликда ўтказиш ва турли температурада қиздириш орқали 4s-Mn ва 3s-Si электронларнинг 3s-Si+3d-Mn, 3s-Si+4s-Mn ўзаро боғланишилар ҳосил қилиши, Si сиртида Co ва Mn юпқа силицид плёнчаларининг валент электронлар зичлигини аниқлаш имконини берган;

ВУП-5 қурилмасида SiO_2/Si (111) сиртида $CoSi_2$ мишенини қаттиқ жисм лазери билан чанглатиш усули орқали $CoSi_2/SiO_2/Si$ (111) наноплёнкаси ҳосил қилиниши билан 900 К да қиздириш орқали поликристалл $CoSi_2/SiO_2/Si$ (111) наноплёнкасининг турли тўлқин узунлигида ёруғликни қайтариш ва ютилиш коэффициентлари турлича эканлиги аниқланганига доир хулосаларидан Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академиясида бажарилган ГНПТ АФ-Атех-2018 (15-274) рақамли “Разработка технологии напыления многокомпонентных тонкопленочных покрытий с помощью лазерного излучения” номли лойиҳани бажаришда фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академияси Вице-президентининг № 2/1255-2203-сон маълумотномаси). Натижада мураккаб таркибли мишенларни вакуумли функционал қурилмада чанглатиш орқали иссиқликка сезгир қопламаларни шакллантириш технологиясини яратиш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқот натижалари 7 та халқаро ва 5 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокама қилинди.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича 18 та илмий иш чоп этилган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 6 та мақола, жумладан, 4 та республика ва 2 таси хорижий журналларда нашр этилган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация кириш, тўрт боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертация матни 115 бет матндан, шу жумладан 55 та расм ва 6 та жадвалдан иборат.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Диссертациянинг кириш қисмида ишнинг долзарблиги ва зарурати асосланган, диссертация ишининг белгиланган мақсад ва вазифаларини ифодалайди, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти муаммонинг ўрганилганлик даражаси ўртасидаги боғлиқликни тавсифлайди, илмий тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги назарий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижалари асосида лаборатория ва амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертациянинг тузилиши ва ҳажми ҳақида маълумот берилган.

“Со ва Мп силицид плёнкаларининг тузилиши ва физик хусусиятларини ўрганиш бўйича адабиётлар таҳлили” номли биринчи боби кремний юзасида эпитаксия, термик диффузия ва ион имплантацияси усуллари ёрдамида кобальт ва марганецнинг юпқа силицид плёнкаларининг ҳосил бўлиш қонуниятларини, уларнинг электрон тузилишини, эмиссиясини, оптик ва электрофизик хусусиятларини ўрганишга бағишланган ишларнинг қисқача адабиёт шарҳига бағишланган.

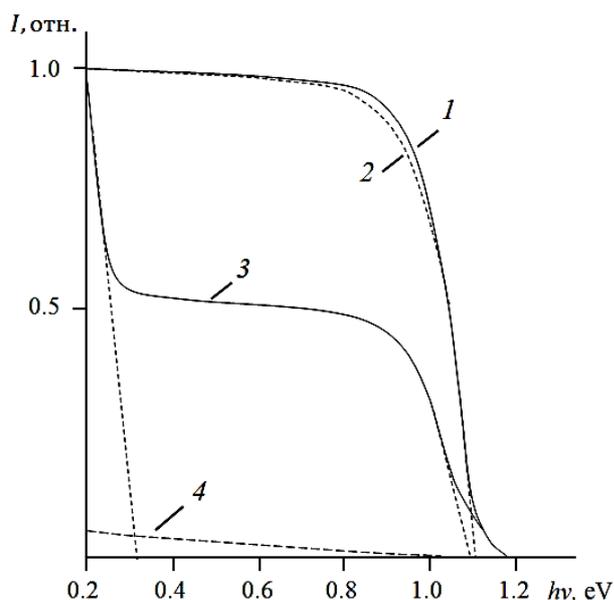
Биринчи боб охирида диссертация ишининг мақсади ва вазифаларидан келиб чиқиб адабиётлар шарҳига хулоса берилган.

“Экспериментал тадқиқотлар усуллари” номли иккинчи бобда сиртни тозалаш усуллари, плёнкани ҳосил қилувчи қурилмалар ва олинган плёнкани таҳлил қилувчи лаборатория қурилмаларининг тавсифига бағишланган: Si монокристаллининг сиртини тозалаш, ион имплантацияси ва кейинги термик қиздириш, шунингдек, ишлаш тамойилларининг қисқача тавсифи, Si монокристалларининг сирт ва сирт ости қатламларини ўрганиш учун қўлланиладиган замонавий усуллар: Оже – электрон спектроскопияси, эластик қайтган электронларнинг спектроскопияси, характерли энергиясини йўқотган электронлар спектроскопияси, ультрабинафша нурлар фотоэлектрон спектроскопияси, юқори энергияли электронлар диффракцияси, рентген фазали анализ, сканерловчи электронлар микроскопияси ҳақида қисқача маълумотлар берилган.

“**CoSi₂ нанофазалари ва наноқатламларини ҳосил қилиш ва уларнинг таркиби, тузилиши ва хусусиятларини ўрганиш**” номли учинчи боби қатик фазали эпитакция усулида Co ва CoSi₂/ Si (111) наноўлчамли фазалар ва плёнкаларни олиш, Si сиртини Ag⁺ ионлари билан бомбардимон қилиш, Co ва CoSi₂ нанофазаларни ўлчамига, энергетик параметрларига таъсирини ўрганишга бағишланган.

Хона ҳароратидаги Si юзасида Co плёнкаси, Co атомларини электронлар бомбардимон қилиш йўли билан термик ишлов бериш орқали ҳосил қилинди. Плёнкани қалинлиги, ионлар билан бомбардимон қилиб емириш (тезлиги 2 Å/мин) ва ЭОС усули ёрдамида аниқланган. Плёнка ҳосил қилинган қурилмада ўта юқори вакуум (10⁻⁷ Па) шароитларда Co атомларини ўстириш, намуналарни қиздириш, оже электрон спектроскопия усулидан фойдаланган ҳолда уларнинг таркиби ва энергетик зона параметрларини ўрганиш ва намунадан ўтадиган ёруғлик интенсивлигини ўлчаш амалга оширилди. Сирт морфологияси СЭМ (Jeol) сканерловчи электрон микроскопи ёрдамида ўрганилди.

1-расмда намунадан ўтаётган ёруғлик интенсивлиги *I* нинг турли қалинликдаги (θ) Co наноплёнка билан Si (111) учун $h\nu$ энергиясига боғлиқликлари кўрсатилган.



**1-расм. Турли қалинликдаги θ (бир қатламли) Co плёнкали Si (111) учун $I(h\nu)$ боғлиқликлар:
1- $\theta=0$ (соф Si); 2- $\theta=1$; 3- $\theta=3$; 4- $\theta=6$.**

Бу ерда $I = \frac{I_{CoSi_2}}{I_{Si}}$; I_{Si} – соф Si (111) орқали ўтадиган ёруғлик интенсивлиги.

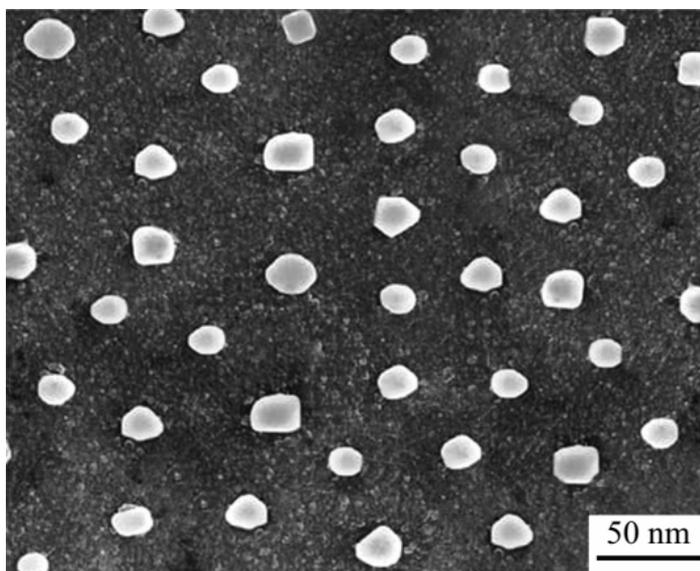
I_{CoSi_2} – CoSi₂ плёнкаси ва Si (111) билан биргаликда ўтадиган ёруғлик интенсивлиги. Кўришиб турибдики, $\theta = 1$ моноқатламда $I(h\nu)$ тоза Si (111) дан фарқ қилмайди. Фақат $h\nu \approx 0.9 \div 1$ эВ энергия оралиғида *I* нинг сезиларли даражада камайиши кузатилади. Кўришиб турибдики, нанофазалар марказларида Co атомларининг тўпланиши Si нинг оптик хусусиятларига сезиларли

таъсир кўрсатмайди. $\theta = 3$ моноқатламда I нинг қиймати $h\nu$ нинг $h\nu \approx 0.2$ эВ ва $h\nu = 0.9$ эВ да кескин камаяди. I нинг биринчи камайиши Si сиртнинг Co атомлари билан қопланганлиги билан, иккинчи камайиши эса Si сиртининг Co атомлари билан қопланмаганлиги билан шарҳланади. Эгри чизиқнинг ўнг томонини $h\nu$ ўқига экстраполяция қилиш ~ 0.3 эВ қийматини беради, яъни ушбу фазаларнинг E_g қиймати ≈ 0.3 эВ га тенг. Қуйидаги формула билан

$$Q = 1 - \frac{I_{Co}}{I_{Si}}$$

Si сиртининг Co атомлари билан θ қопланиш даражасини баҳолаш мумкин.

Бу ерда θ нинг қиймати $0.35 \div 0.4$ га тенг. Бу СЭМ маълумотларига тахминан мос келади (2-расм).

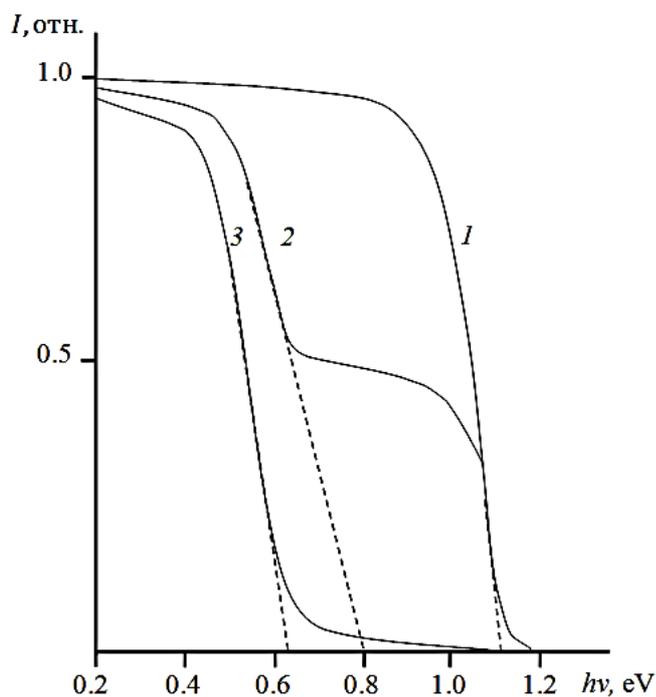


2-расм. $\theta = 6$ моноқатламли Co плёнкали Si (111) сиртининг СЭМ тасвири.

Агар бу фазаларнинг марказлари орасидаги масофа $\sim 50 \div 60$ нм эканлигини ҳисобга олсак, у ҳолда уларнинг ўртача сирт диаметрлари $d \approx 20 \div 25$ нм, нанофазаларнинг тахминий қалинлиги эса $\sim 6 \div 8$ моноқатлам ($\sim 12 \div 15$ Å)га тенг. Шунга асосланиб, биз Co нанофазаларида ($\theta \leq 3$ моноқатлам) кичик ўлчамларида квант ўлчамли эффектлар пайдо бўлади деб тахмин қиламиз: металл Co нанофазасида яримўтказгичларга хос бўлган тақиқланган зона пайдо бўлади. Si юзасининг қалинлиги олти моноқатламли Co нанофазалар билан қопланиш даражаси 1 га яқинлашади ва $I(h\nu)$ эгри чизиғининг кескин камайишини кўрсатмайди; сирт Co атомлари билан $8 \div 10$ моноқатламда бутунлай қопланади. Бироқ паст интенсивликдаги ёруғлик, плёнкадан $10 \div 12$ нм гача ўтади. Жуда юпқа Co плёнкаси ёруғликни ўтказиши ни кўрсатди. Бу ҳолатда Co нанофазалар ва наноплёнкалар аморф ҳолатда бўлади. Хона ҳароратида таглик ва плёнка ўртасида атомларнинг сезиларли даражада ўзаро диффузияси йўқлигини ОЭС натижалари кўрсатди. Кремний, Co нанофазалар

ва наноплёнкалар билан биргаликда $850 \div 900$ К ҳароратда қиздиргандан сўнг, нанокристалл фазалар ва CoSi_2 плёнкаси ҳосил бўлди.

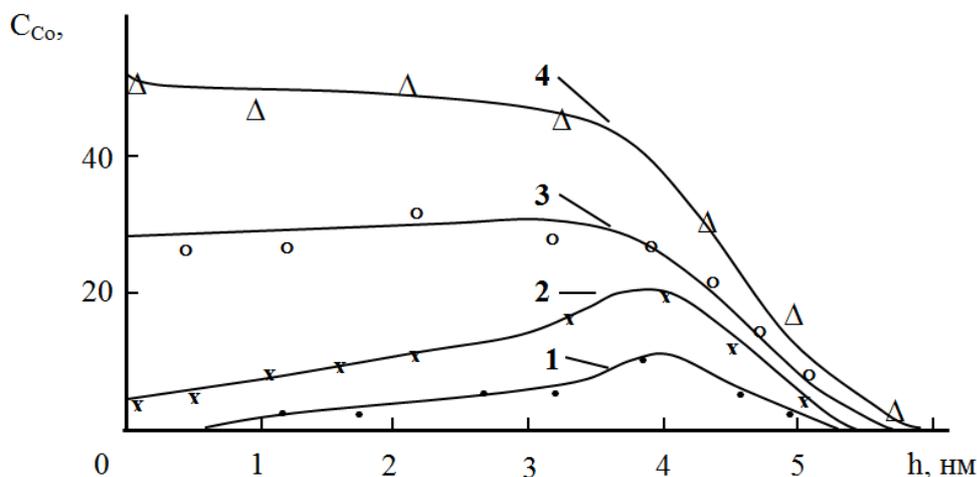
3-расмда ~ 900 К ҳароратда 40 дақиқа қиздирилгандан кейин ўлчанган қалинлиги 3 ва 10 моноқатламли (2 ва 3 эгри чизиқлар) CoSi_2 атомлари билан қопланган Si учун $I(h\nu)$ боғлиқлик графиги кўрсатилган. 2-эгри чизиқда $\Theta \approx 3$ моноқатлам CoSi_2 нанофазаларини сиртни қопланиш даражаси $0.5 \div 0.6$, $d \approx 25 \div 30$ нм, $E_g \sim 0.8$ эВ га тенг эканлиги кўрсатилган. $\Theta_{\text{CoSi}_2} \approx 10$ моноқатламда I нинг қиймати $h\nu = 0.45 \div 0.65$ эВ оралиғида деярли нолга яқинлашади. Бундан хулоса қилиш мумкинки, бу ҳолда Si юзаси тўлиқ қалинлиги $\sim 20 \div 25$ моноқатламга тенг, доимий, бир хил CoSi_2 эпитаксиал қатлам билан қопланган ва бу қатлам учун $E_g \sim 0.6$ эВ ни ташкил қилади, бу эса массив CoSi_2 эпитаксиал плёнкалар учун хосдир.



**3-расм. Қалинлиги Θ (бир қатламли) бўлган CoSi_2/Si (111) плёнка учун $I(h\nu)$ боғлиқликлари:
1- $\Theta=0$ (соф Si); 2- $\Theta=3$; 3- $\Theta=10$.**

4-расмда хона ҳароратида, энергияси $E_0=1$ кэВ бўлган Co^+ ионларини турли дозалар билан имплантация қилинган Si учун Co атомлари концентрацияси h чуқурлик бўйича тақсимооти кўрсатилган. Кўриниб турибдики, $5 \cdot 10^{14}$ см^{-2} дозада максимал $h \approx 3.5 \div 4$ нм чуқурликда пайдо бўлади, яъни Co ионларининг диапазони ~ 4 нм деб тахмин қилиш мумкин. Ионларнинг дозаси ошиши билан бутун юза бўйлаб C_{Co} ионларининг концентрацияси ортади. Бундай ҳолда, расмда кўринадики C_{Co} ионларининг концентрацияси максимуми юза томонга силжиб боради. $D > 10^{16}$ см^{-2} да $C_{\text{Co}}(h)$ боғлиқлиги босқичли характерга эга бўлади. $6 \cdot 10^{16}$ см^{-2} дан бошлаб, $C_{\text{Co}}(h)$ эгри чизигининг тузилиши амалда ўзгармайди, яъни берилган энергия учун $6 \cdot 10^{16}$ см^{-2} тўйинганлик дозаси ҳисобланади. Бунда Co нинг концентрацияси $\sim 50 \div 52$ ат.% ни ташкил қилади

ва у сиртдан $35\div 40 \text{ \AA}$ чуқурликгача ўзгармайди. $5\cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ дозадан бошлаб, юзада Co ва Si атомлари орасида бирикма ҳосил бўлишини Оже электрон спектрларини таҳлил қилиш орқали кузатилди. Доза ортиши билан Co атомларини Si атомлари билан боғланиши ортади.

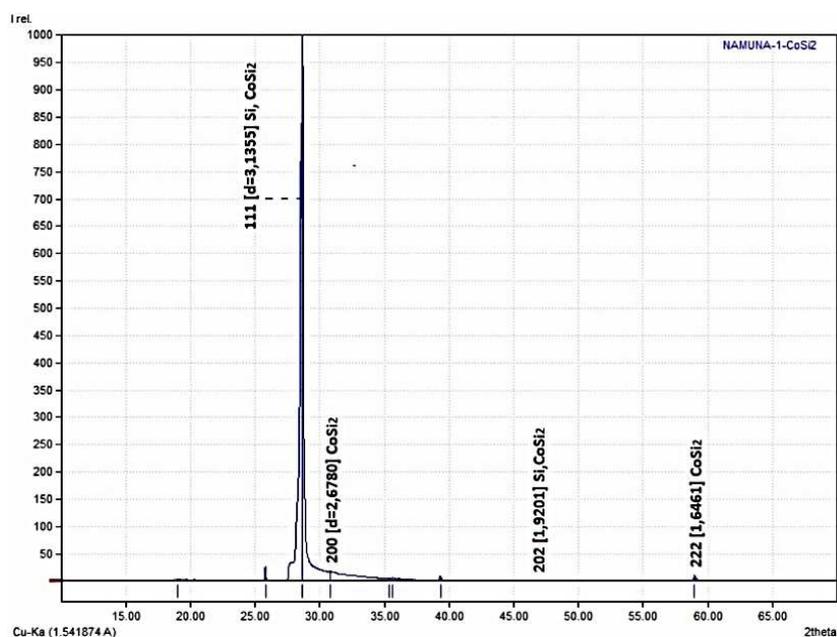


4-расм. Турли дозаларда ($1\cdot 5\cdot 10^{14}$, $2\cdot 5\cdot 10^{15}$, $3\cdot 10^{16}$, $4\cdot 6\cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) $E_0=1 \text{ кэВ}$ бўлган Co^+ ионлари билан имплантация қилинган Si учун Co концентрациясининг h чуқурликка боғлиқлиги келтирилган.

Co ва Si атомларининг бир қисми кимёвий боғланиш ҳосил қилмайди. Ион – имплантацияда $D=D_n$ бўлганда қалинлиги $d\approx 35\div 40 \text{ \AA}$ бўлган қатламда, CoSi_2 концентрацияси $\sim 25\div 30 \text{ ат. \%}$, CoSi – $10\div 12 \text{ ат. \%}$ ва Co_2Si – $5\div 10 \text{ ат. \%}$ типдаги бирикмалар ҳосил бўлади. 4-расмдан кўришиб турибдики, намуна қиздирилганда $30\div 35 \text{ \AA}$ чуқурликгача сиртга яқин қатламда Co концентрациясининг тақсимланиши деярли бир хил бўлади, қиздирилмаган намунага нисбатан ўтиш қатламининг қалинлиги анча кичик бўлади. Бир текис легирланган қатламда CoSi_2 нинг концентрацияси $\sim 65 \div 70 \text{ ат. \%}$ ни ва CoSi ва Co_2Si нинг умумий концентрацияси $20\div 25 \text{ ат. \%}$ ни ташкил қилиши аниқланди. Имплантациядан кейинг $T\approx 900 \text{ К}$ да термик ишлов берилганда қалинлиги $d\approx 35\div 40 \text{ \AA}$ бўлган, бир жинсли CoSi_2 эпитаксиал плёнкасини ҳосил бўлишига олиб келди.

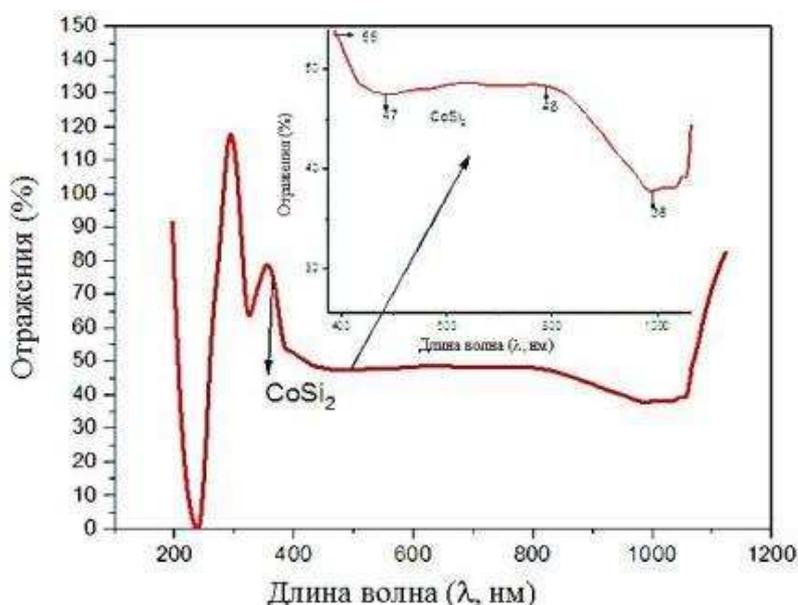
Бундан ташқари учинчи бобда SiO_2/Si (111) юзасида лазерли чанглатиш усули орқали CoSi_2 наноплёнкаларининг ҳосил бўлиши, тузилиши, тақиқланган зона кенлиги ва оптик хусусиятларининг қонуниятлари аниқланган.

Импульсли лазер чанглатиш вақтида мишен ва тагликнинг ўз ўқи атрофида айланиши, сирт бўйлаб Co ва Si атомларининг сочилишини бир хил тақсимланишини таъминлайди ва сирт аморф ҳолатда бўлади. Бу тизимни 900 К ҳароратда 1 соат қиздириш ва секин совутиш натижасида поликристалли CoSi_2 плёнкаси ҳосил бўлди. Рентген нурлари дифракцияси усулида кристалл структураси кубик панжара ва даври $a=5.356 \text{ \AA}$, зичлиги 4.976 г/см^3 эканлиги аниқланди ва бу адабиётлардаги натижалар билан солиштириб таҳлил қилинганда бир-бирига мос келди (5-расм).



5-расм. Поликристалли $\text{CoSi}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ (111) плёнкасининг рентген фазали таҳлили.

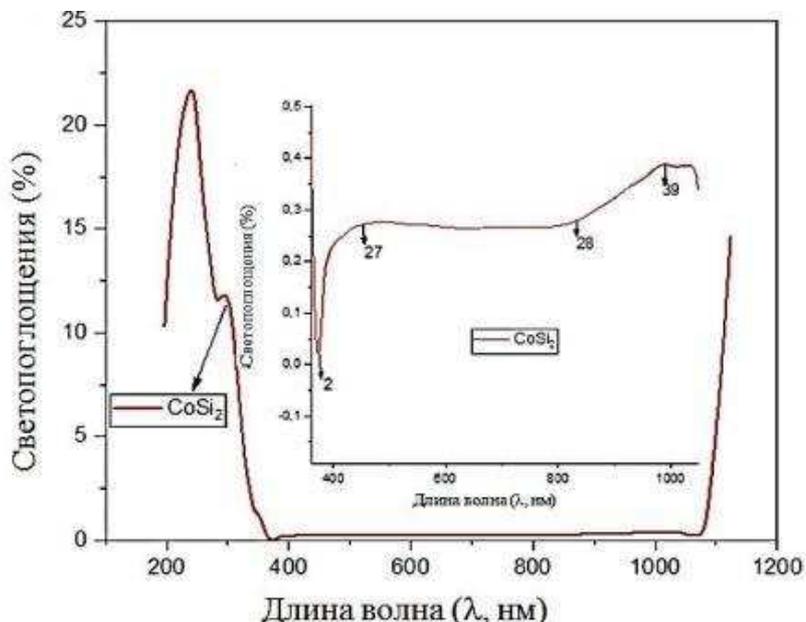
6-расмда поликристалл $\text{CoSi}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ (111) плёнкасининг ёруғликни қайтариш коэффициентини тўлқин узунлигига боғлиқлиги кўрсатилган. Кўриниб турибдики, тўлқин узунлиги $\lambda=386$ нмда ёруғликни қайтариш коэффициенти 55 % ни ташкил қилади, $388 \div 796$ нм да эса у 47 %, $796 \div 989$ нм да 36 % ни ташкил қилади.



6-расм. Поликристалли $\text{CoSi}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ (111) плёнкасининг ёруғликни қайтариш коэффициенти.

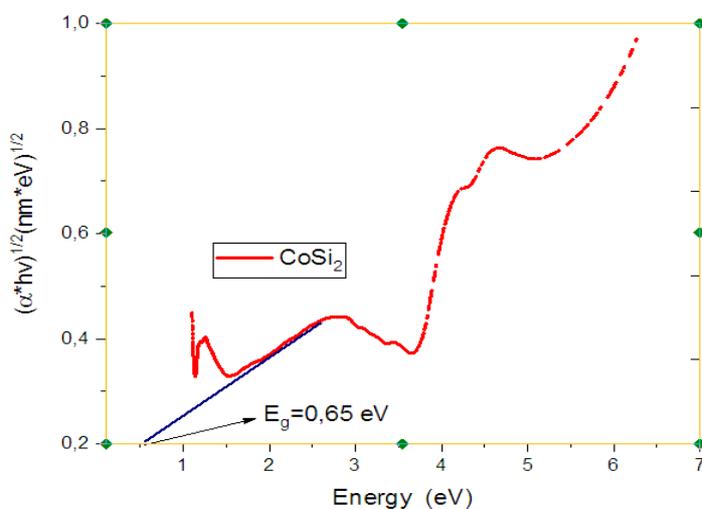
7-расмда поликристалл $\text{CoSi}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ (111) плёнкасининг ёруғлик ютишлиш коэффициентининг тўлқин узунлигига боғлиқлиги графигидан тўлқин узунлиги $\lambda=373$ нмда ютилиш коэффициенти минимал даража 0,2 % ни ташкил қилишини кўриш мумкин.

Тўлқин узунлик $376 \div 463$ нм бўлганда эса ютилиш коэффиценти $0,27\%$ гача ўзгаради, тўлқин узунлиги $463 \div 837$ нм оралиғида ёруғликнинг ютилиши $0,28\%$ гача, тўлқин узунлиги $837 \div 986$ нм оралиғида $0,39\%$ гача ошади. $\text{CoSi}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ (111) плёнкаси ёруғликнинг кўзга кўринадиган ва ИҚ соҳаларида юқори сезувчанликка эга эканлигини 6 ва 7-расмлардан кўриш мумкин.



7-расм. Поликристалли $\text{CoSi}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ (111) плёнкасининг ёруғликни ютилиш коэффиценти.

8-расмда поликристалл $\text{CoSi}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ (111) плёнкасининг “Kubelka-Munk” функциясида фойдаланган ҳолда, ютилган фотон энергиясини тушган фотонлар энергиясига боғлиқлигига асосланиб, тақиқланган зона кенлиги 0.65 эВ эканлиги аниқланди.

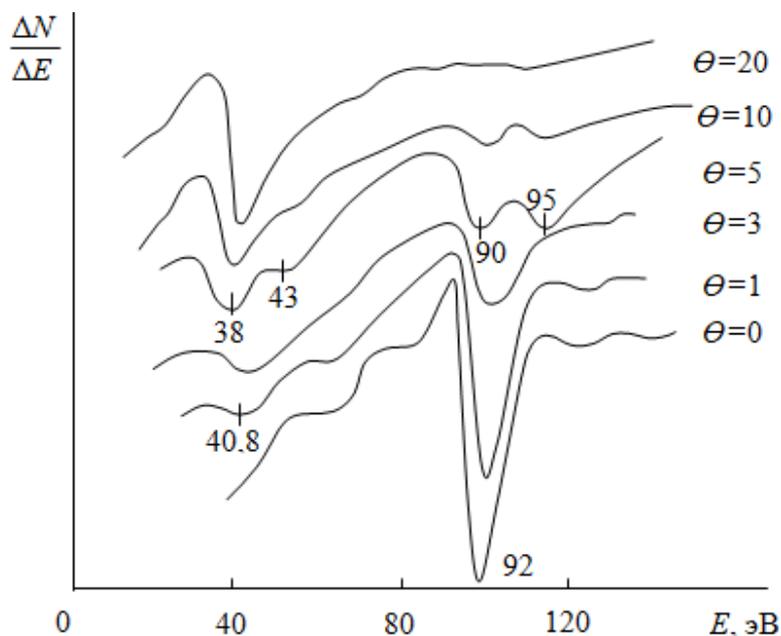


8-расм. Поликристалли $\text{CoSi}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ (111) плёнкасининг тақиқланган зона кенлиги.

Диссертация ишида сирт диаметри $\leq 20 \div 25$ нм бўлган Co нанофазаларининг тақиқланган зонаси яримўтказгичлар хусусиятларига эга эканлиги кўрсатилди ($E_g \approx 0.3$ эВ). SiO₂/Si (111) юзасида нано ўлчамли CoSi₂ плёнкалари лазерли чанглатиш усули ёрдамида олинди. Поликристалли CoSi₂/SiO₂/Si (111) плёнкасининг тақиқланган зона кенглиги 0.65 эВ эканлиги аниқланди. Поликристалли CoSi₂ плёнкасини ёруғликни ютиш ва қайтариш коэффициентларининг тўлқин узунлигига боғлиқлигини таҳлил қилиш, ёруғликни кўринадиган ва ИҚ соҳаларида юқори сезувчанликка эга эканлигини кўрсатди ва бу диапазонларда ишлайдиган наноэлектроника қурилмаларада қўлланилиши мумкин.

“Si сиртида эпитаксия усули билан марганец силицидларининг юпқа плёнкаларини ҳосил қилиш ва уларнинг физик хоссаларини ўрганиш” номли тўртирчи бобда хона ҳароратида ўта юқори вакуум (10^{-7} Па) шароитида Si (111)нинг сиртида эпитаксия усулида олинган Mn юпқа (1÷20 моноқатлам) плёнкаларини таркиби ва электрон тузилишининг ўзгаришига оид экспериментал тадқиқотлар натижалари келтирилган.

$P \approx 10^{-7}$ Па вакуум шароитида яхши тозаланган Si (111) сиртда Mn плёнкасини ўстириш электрон нурли эпитаксия усули билан амалга оширилди. Ҳар хил қалинликда ўстирилган Mn ни кичик энергияли соҳасини оже – спектрлари 9-расмда кўрсатилган. Кўриниб турибдики, $\theta=1$ моноқатламда Si нинг $L_{23}VV$



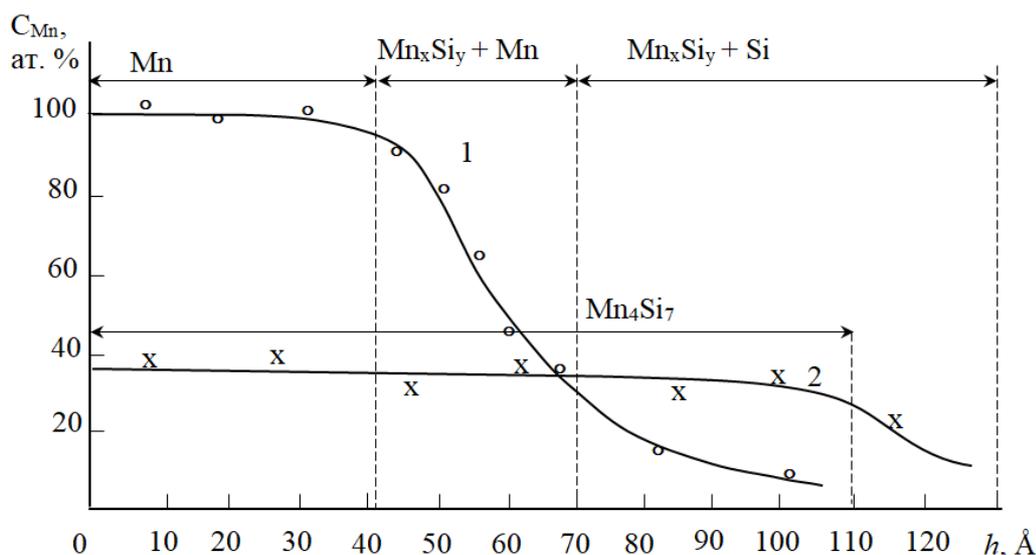
9-расм. Турли θ қалинликдаги Mn атомлари ўсишининг $L_{23}VV$ кремний оже-пикига таъсири.

($E=92$ эВ) оже пикининг шакли ва энергиясини ҳолати амалда ўзгармайди ва унинг интенсивлиги бироз камайганлиги кузатилади. Бу вақтда, 40-41 эВ энергияларда кичик интенсивликдаги кенг Mn нинг $M_{23}VV$ оже – пики пайдо бўлади. Mn қалинлиги $\theta=3$ моноқатлам бўлганда Si нинг $L_{23}VV$ оже – пики кенгайди ва унинг интенсивлиги ~ 2 марта камаяди. $\theta=5$ моноқатламда эса Si пики ~ 90 ва 95 эВ энергияли бўлган иккита пикга ажралади, Mn пикининг

интенсивлиги эса ортиб боради ва $E=43$ ва 38 эВ бўлган энергияларда Mn оже пиклари иккига бўлинади. Si ва Mn нинг оже – пикларининг ўзгариши Si ва Mn атомлари ўртасида кимёвий боғланиш ҳосил бўлишини кўрсатади. 10 моноқатламда Si нинг 90 ва 95 эВ да оже пикларининг интенсивлиги кескин камаяди ва Mn нинг $M_{23}VV E = 38$ эВ даги оже – пики қолади. Кўришиб турибдики, 10-12 моноқатламгача, Mn-Si чегарасида атомларнинг ўзаро тасирлашуви содир бўлиб, натижада Mn_xSi_y типидagi кимёвий боғланишлар ҳосил бўлишига олиб келади. $\Theta \approx 10-12$ моноқатламдан бошлаб, диффузияланувчи Mn атомлари Si сиртига етиб бормади. Бундан келиб чиқадики, хона ҳароратида Si нинг Mn даги диффузия чуқурлиги $\sim 10-12$ моноқатлам ($20-24 \text{ \AA}$) га тенг. $\Theta=20$ моноқатламдаги оже – спектрининг шакли массив Mn плёнкасининг оже спектрини шаклидан деярли фарк қилмайди.

Маълумки, Mn ва Si атомлари ўртасида кимёвий боғланишнинг ҳосил бўлиши, Si нинг валентлик зонасидаги электронлар ҳолатининг зичлик структурасининг кескин ўзгаришига олиб келиши фотоэлектронлар спектрларида кузатилади.

10-расмда Si (111) сиртида Mn атомларининг h чуқурлиги бўйича тақсимланишининг концентрация профиллари кўрсатилган. Mn плёнкаси хона ҳароратида $\sim 40-45 \text{ \AA}$ қалинликда (20 моноқатлам) \sim ўстирилди, сўнгра 1050 K температурада қиздирилди. Mn плёнкаси юзасида $\sim 2-3$ ат. % кислород ва $\sim 1-1.5$ ат. % углерод мавжуд бўлган. 10-расмда (1-эгри чизик) шуни кўрсатадики, сиртда $h \approx 35-40 \text{ \AA}$ чуқурлигигача C_{Mn} деярли ўзгармайди, $h \approx 40-60 \text{ \AA}$ оралиғида у $35-40$ ат. % га кескин пасаяди сўнгра эса аста-секин камаяди ва $h \approx 100-125 \text{ \AA}$ да C_{Mn} 0 га яқинлашади. Оже – спектрларининг таҳлил қилганимизда, сиртдан $h \approx 40-70 \text{ \AA}$ диапазонида тахминан $60-70$ ат.% Mn Si атомлари билан кимёвий боғ ҳосил қилади, яъни боғланмаган Mn ва Si атомларининг кўплиги билан стехиометрик бўлмаган Mn_xSi_y ҳосил бўлади.



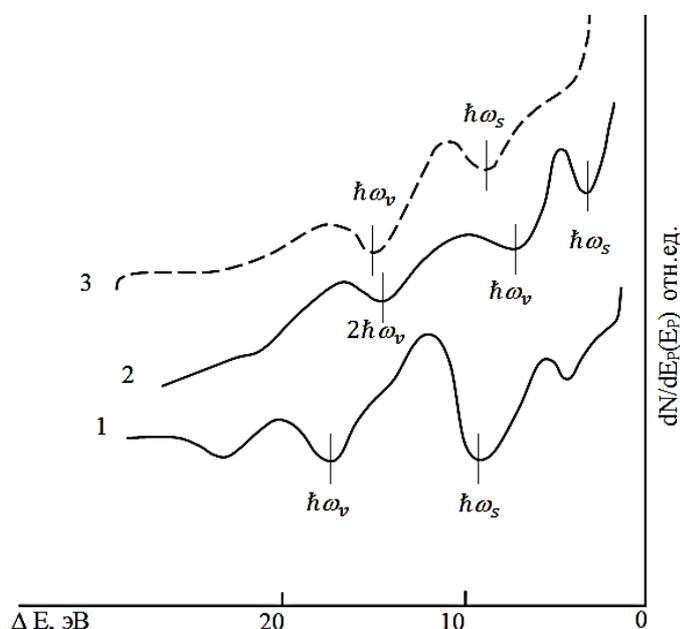
10-расм. $\Theta_{Mn}=20$ та моноқатламли ($\sim 40-45 \text{ \AA}$) Mn-Si (111) системаси чуқурлиги бўйича Mn атомларининг тарқалиш профили. 1-қиздиришдан олдин; 2-2 соат давомида $T \approx 1050 \text{ K}$ да қиздирилгандан кейин.

Ушбу тизимни ~ 1050 К да ~ 2 соат давомида термик қиздириш, монокристалл тузилишдаги қалинлиги 110 \AA бўлган Mn_4Si_7 плёнкасининг шаклланишига олиб келди (10-расм, 2-эгри чизик).

Бунда юзасидаги О ва С атомларининг умумий концентрацияси 1.5-2 ат.% дан ошмайди. Mn_4Si_7 плёнкаси ва таглик (кремний) ўртасида қалинлиги 60-70 \AA бўлган ўтиш қатлами ҳосил бўлади.

Мn ни Si юзасида ҚФЭ усулида ўстирилган ва 1100 К да термик ишлов берилгандан сўнг ҳосил бўлган Mn_4Si_7 плёнкаларининг электрон тузилиши фотоэлектрон спектроскопия, эластик қайтган ва характерли энергиясини йўқотган электронлар спектроскопияси усуллари ёрдамида ўрганилди.

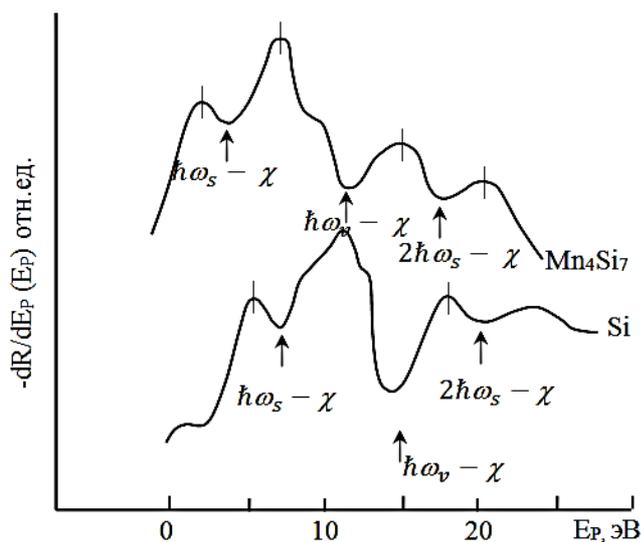
11-расмда соф Si (111), қалинликлари $\theta \approx 200 \text{ \AA}$ бўлган Мn плёнкаси ва $\theta \approx 600 \text{ \AA}$ бўлган Mn_4Si_7 плёнкаси учун 100 эВ да олинган ХЭЙЭС спектрлари келтирилган. Бунда биз асосан ХЭЙЭС пиклари билан сиртий ва ҳажмий тебранишларнинг ғалаёнланишини муҳокама қиламиз. Уларнинг энергиялари ва интерпретациялари эгри чизикларда кўрсатилган.



11-расм. Силицидларнинг ХЭЙЭС спектрлари, $E_p=100$ эВ учун. 1-Si (111); 2-Mn/Si (111), 3- Mn_4Si_7 .

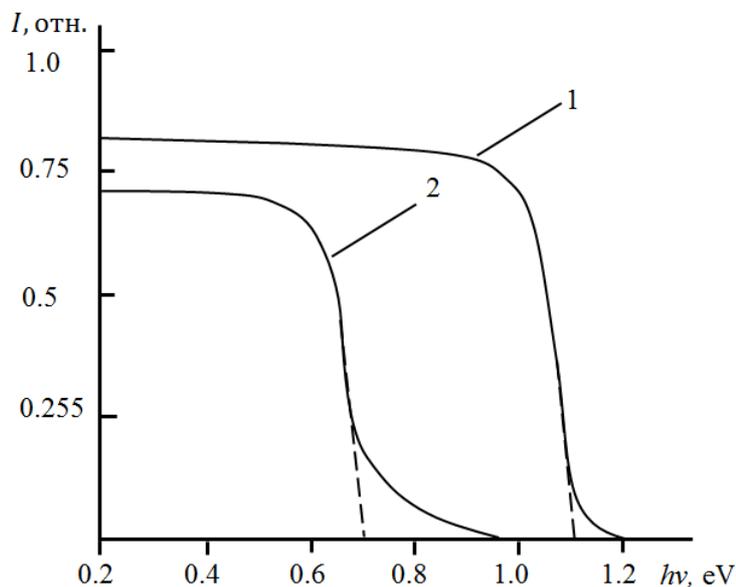
Кўриниб турибдики, Mn_4Si_7 плёнкасининг ХЭЙЭС пикларининг ҳолати ва шакли Si (111) ва Мn ларникидан сезиларли даражада фарқ қилади. Мn плёнкаси учун 4; 7.6 ва 14.5 эВ энергияда пиклар кузатилади, бу $\hbar\omega_s$, $\hbar\omega_v$, ва $2\hbar\omega_v$ плазма тебранишларининг қўзғалиши билан боғлиқ бўлиши мумкин.

12-расмда Si (111) ва $\text{Mn}_4\text{Si}_7/\text{Si}$ (111) плёнкаси учун $E_p = 1-30$ эВ энергия оралиғида қайд этилган ЭҚЭ спектрлари $\left(-\frac{dR}{dE}(E_p)\right)$ кўрсатилган. ЭҚЭ спектрлари бир қатор максимум ва минимумлардан иборат. Маълумки, баъзи максимумларнинг ҳолатлари зоналараро ўтишлар қўзғалишнинг чегара энергиясига тўғри келади, минимумлар ҳолатлари эса коллектив тебранишлар (плазмонлар) қўзғалишнинг чегара энергиясига тўғри келади.



12-расм. ЭҚЭ спектрлари ($dR/dE_p(E_p$ -боғланиш)).

13-расмда Si (111) ва 600 Å қалинликдаги Mn_4Si_7 плёнкаси учун ўтган ёруғлик интенсивлиги I нинг фотон энергиясига (ёруғлик ютилиш спектри) боғлиқликлари кўрсатилган. Ушбу спектрлар ўрганилаётган намунанинг тақиқланган зона кенлигини аниқлаш учун қўлланилган. Кўришиб турибдики, Si (111) учун $E_g \sim 1.1$ эВ га, Mn_4Si_7 учун эса $- 0.72$ эВ тенг, қайтариш коэффициенти $R \sim 0.2$ ва 0.3 ни ташкил этади.



**13-расм. Ютилиш спектри: 1-тоза Si (111),
2- Mn_4Si_7/Si (111).**

ХЭЙЭС, ЭҚЭ, УБЭС ва ёруғликнинг ютилиш спектрларини таҳлил қилиш асосида биз Si ва Mn_4Si_7 энергия диапазонларининг параметрларини (1-жадвал) ва ушбу кузатилган спектрларнинг ҳолатлари асосий хусусиятларни ва уларнинг интерпретацияларини аниқладик (2-жадвал).

Силицид учун энергия зоналари параметрлари

Тадқиқот объекти	Зона параметрлари, эВ			
	E_V	E_F	E_g	χ
Si (111), <i>n</i> -тип	5.1	4.2	1.1	4.0
Mn_4Si_7	3.7	3.6	0.7	3.0

Si (111) ва Mn_4Si_7 силициди учун фото ва эластик қайтган электронлар спектрларидаги асосий энергетик ҳолатлари

Ўрганилаётган намуна	УБНЭС		ЭҚЭ Спектри ($-dR/dE_p (E_p)$)			
	Макс. E_{CB} , эВ	Интерпретация	Макс. E_p , эВ	Интерпретация	Мин. $E+e\phi$, эВ	Интерпретация
Si(111), <i>p</i> -тип	-1.1 -2.3 -3.0 -5.0 -7.5	$E_{V1} \rightarrow PC$ $E_{V2} \rightarrow 3p$ $E_{V3} \rightarrow 3s+3p$ $E_{V4} \rightarrow 3s$ $E_{V5} \rightarrow 3s$	1.1 5.5 8 10.5 15.5	$E_V \rightarrow E_C$ $E_{V1} \rightarrow E_{C1}$ $E_{V3} \rightarrow E_{C2}$ $E_{V3} \rightarrow E^*$ $E_{V4} \rightarrow E_{C2}$ $E_{V5} \rightarrow E^*$	11.2 17.6 22.7	$\hbar\omega_s$ $\hbar\omega_v$ $2 \hbar\omega_s$
Mn_4Si_7	-0.9 -1.7 -3.5 -5.4 -6.8	- Mn $E_{V1} \rightarrow Mn+Si$ $E_{V2} \rightarrow Mn+Si$ $E_{V3} \rightarrow Mn+Si$ $E_{V4} \rightarrow Mn+Si$ $E_{V5} \rightarrow Si$	2.5 7.5 9 15 21	$E_{V1} \rightarrow E_{C1}$ $E_{V2} \rightarrow E_C$ $E_V \rightarrow E_{C2}$ $E_{V3} \rightarrow E_B$ $E_{V4} \rightarrow E_B$ $E_{V5} \rightarrow E_B^*$ $E_{V5} \rightarrow E_C^{**}$	7.8 14 23	$\hbar\omega_s$ $\hbar\omega_v$ $2 \hbar\omega_s$ $\hbar\omega_v + \hbar\omega_s$

2-жадвалда Mn_4Si_7 силицидлари учун E_g Si (111) учун E_g дан сезиларли даражада кам ва Ферми сатҳи E_V сатҳига яқин жойлашганлигини кўрсатади. Кўриниб турибдики, Mn_4Si_7 ковакли ўтказувчанлигига эга яримўтказгичдир.

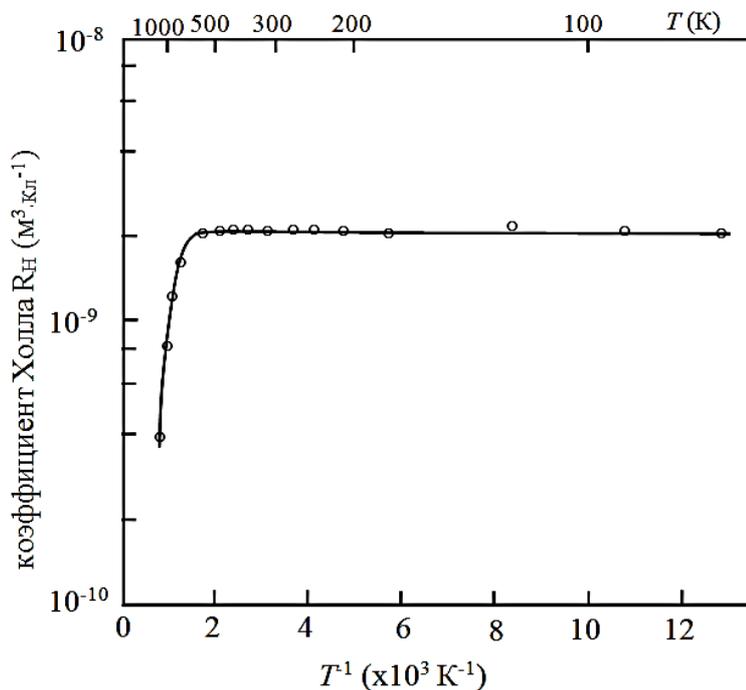
Шунингдек, тўртинчи бобда SiO_2/S (111) сиртда ўстирилган юпқа Mn_4Si_7 нинг тузилиши ва электрофизик хоссалари ўрганилди. Ушбу маълумотлар 3-жадвалда келтирилган ва илмий адабиётлардаги маълумотлар билан солиштирилган.

 Mn_4Si_7 нинг электрофизик хоссалари

Манба	Қалинлиги, нм	Солиштирма қаршилиги ρ , Ом·см. $T=300$ К	Холл коэффициенти R_H , $cm^3 \cdot Kl^{-1}$	Заряд ташувчилар концен-трацияси n_p , cm^{-3}	Ҳаракатчанлик μ_p , $cm^2/V \cdot c$	Ўтказувчанлик σ , $Om^{-1} \cdot m^{-1}$	Термо ЭЮК S , мкВ/К $T=300$ К
Ушбу ишда	500	$7.82 \cdot 10^{-4}$	$1.88 \cdot 10^{-9}$	$4.85 \cdot 10^{21}$	1.64	$1.27 \cdot 10^3$	110
Адабиётларда	65-100	$3.3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-9}$	$2.7 \cdot 10^{21}$		$8 \cdot 10^2$	

Кўриниб турибдики, бизнинг натижаларимиз адабиётлардаги маълумотлар билан деярли мос келади.

14-расмда Холл коэффициентини ўлчаш натижалари кўрсатилган. 300-650 К оралиғида Холл коэффициенти ўзгармас бўлиб, таркибидан қатъий назар $R_H(T)=1,88 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{Кл}$ ни ташкил қилади.



14-расм. Холл коэффициенти R_H нинг Mn_4Si_7 учун температурага боғлиқлиги.

Юпқа Mn плёнкалар ($\theta=1-20$ моноқатлам) $\theta=10$ моноқатламгача ўстириш жараёнида Si атомлари Mn плёнкага, Mn плёнка Si га диффузияланиши кўрсатилган. Бинобарин, Mn-Si чегарасида боғланмаган Si ва Mn атомларининг кўплиги Mn_xSi_y типидagi силициднинг ўтиш қатлами ҳосил бўлиши кўрсатилди. $T \approx 1050 \text{ K}$ да қиздирилгач, қалинлиги 100 \AA бўлган бир жинсли Mn_4Si_7 плёнкаси ҳосил бўлади.

ЎЮВ шароитида (10^{-6} Па) Si таркибидаги Mn нинг термик диффузиясида силицид ҳосил бўлиш жараёнлари ўрганилди. Стехиометрик Mn_4Si_7 ҳосил бўлиши учун оптимал термик диффузия шароитлари аниқланади. $T \leq 1000 \text{ K}$ да Mn ва Si атомлари ўртасида қисман кимёвий боғланиш пайдо бўлиши аниқланди. 1100 K да яхши стехиометрик таркибга эга бўлган Mn_4Si_7 плёнкаси ҳосил бўлади.

Mn силицид плёнкаларининг кристалл тузилиши ўрганилди. Mn_4Si_7 кристалл тетрагонал панжара параметрли $a=5.75$ ва $c=15.6 \text{ \AA}$ ва жуда силлик бўлиши кўрсатилган. Қалинлиги $\sim 107 \text{ нм}$ бўлган чанглатилган Mn ни қиздирилгандан сўнг $\theta \approx 296 \text{ нм}$ бўлган Mn_4Si_7 плёнкаси ҳосил бўлиши аниқланган.

SiO_2/Si (111) юзасида ўстирилган юпқа Mn_4Si_7 плёнкасининг электрофизик хоссалари юқори аниқликда (ρ , R_H , n_p , u_p , S) ўрганилди.

ХУЛОСА

1. Кичик энергияли ($E_0=0.5\div 1$ кэВ) ва дозаси ($D\approx 8\cdot 10^{14}$ см⁻²) бўлган Ar^+ ионлари билан дастлабки бомбардимон қилиш орқали Si монокристали юзасида тартибланган нанофазалар ва бир жинсли Co ва $CoSi_2$ плёнкаларини олиш усули кўрсатилган. Сирт ўлчамлари $\leq 20\div 25$ нм бўлган Co нанофазаларида квант ўлчамли эффектлар пайдо бўлиши кўрсатилган (тақиқланган зона кенлиги $E_g\approx 0.3$ эВ пайдо бўлади);

2. Биринчи марта Si нинг таркиби, тузилиши ва хоссаларига Co^+ ионларини имплантация қилишда таглик (кремний) ҳароратининг таъсири ўрганилди. Олинган натижалардан келиб чиқиб, хона ҳароратида $E_0=1$ кэВ билан Co^+ ионлари имплантациясида Si сиртида $35\div 40$ Å чуқурликда бир хил легирланган, сирт қатламлари бутунлай тартибсиз, Si билан Co $\sim 45\div 50$ ат.%. кимёвий боғланишга киришади. Монокристал кремний таглик 600 К да қиздирилиб Co^+ ионлари имплантация қилинганда бир хил легирланган қатламнинг чуқурлиги $50\div 60$ Å, сиртга яқин қатлам қисман тартибсиз, Si билан Co атомлари ~ 90 ат.% кимёвий боғ ҳосил қилиши аниқланди;

3. SiO_2/Si (111) сиртида $CoSi_2$ наноплёнкалари лазер билан чанглатиш усули билан ҳосил қилинди. Рентген нурлари дифракцияси таҳлили натижалари кристалл структураси кубик панжара ва даври $a=5.356$ Å эканлигини кўрсатди. $\lambda=386$ нм тўлқин узунлигида ёруғликни қайтариш коэффициенти 55%, $388\div 796$ нм да 47 % гача, $796\div 989$ нм да 36 % гача камайди. Ёруғликни ютилиш коэффициенти тўлқин узунлиги $376\div 463$ нм бўлганида 0,27 % дан $463\div 837$ нм тўлқин узунлиги оралиғида 0,28 % гача, тўлқин узунлиги $837\div 986$ нм оралиғида эса 0,39 % гача ошиши аниқланди;

4. $CoSi_2/Si$ (111) юзасига қалинлиги $\theta\leq 1$ моноқатламли Cs ётқизилганда E_g қиймати ва валент электронлари зичлиги ҳолати максималларининг ўрни амалда ўзгармаслиги кўрсатилган, фотоэлектронларнинг чиқиш иши 3 эВ гача камайд ва фотоэлектронларнинг квант чиқиши 3 ёки ундан кўп марта ортади. $\theta\geq 0.6$ да кремнийга хос бўлган спектрда $E_{\phi_0}=-7.2$ эВ да янги максимумга эга бўлган моноқатлам пайдо бўлади. $CoSi_2$ ўтказувчанлик зонасидаги эркин электронлар ҳолатининг зичлик максимум ҳолатлари биринчи марта экспериментал тарзда аниқланди. Бу максимумлар вакуум сатҳидан пастда 0.8 ва 1.9 эВ энергия интервалида жойлашган;

5. Mn нинг кичик қалинликдаги Mn – Si системаси чегарасида қалинлиги $15\div 20$ Å бўлган ўтиш қатлами ҳосил бўлиши кўрсатилган. Ўтиш қатламида $L_{23}VV$ Si оже-пики ($E=92$ эВ да) иккита пикга ажралади, бу Mn_xSi_y типидagi кимёвий боғланиш ҳосил бўлишини кўрсатади. Валентлик электронлари зичлигининг ўзгариши Si нинг 3p ҳолат электронларининг Mn нинг 3d ва 4s ҳолат электронлари билан боғланиш ҳосил қилиши орқали изоҳланади;

6. Si (111) юзасидаги Mn нинг термик диффузиясида силицидлар ҳосил бўлиш қонуниятлари ўрганилди. $1050\div 1100$ К да юзаси силлик кристалл Mn_4Si_7 плёнка ҳосил бўлиши кўрсатилди. Mn_4Si_7 плёнкаси қалинлиги Mn плёнкаси қалинлигидан ~ 3 барабар катта эканлиги кўрсатилган. Mn_4Si_7/Si

(111) системасининг рентген нурларининг диффракцияси натижалари Mn_4Si_7 плёнкаси тетрагонал ва панжарага параметрлари $a=5.75 \text{ \AA}$ ва $c=15.6 \text{ \AA}$ га эга эканлигини кўрсатди;

7. Методлар мажмуасидан фойдаланиб, юпқа Mn_4Si_7 плёнкаларнинг ($\leq 1000 \div 1100 \text{ \AA}$) валент электронлар зичлиги ҳолатларини, зона параметрларини, коллектив тебранишларда иштирок этувчи валент электронлар сонининг ўртача қиймати, зоналараро ўтиш энергиялари, термоЭЮКнинг ҳароратга боғлиқлиги, солиштирма қаршилиги, Холл коэффициенти, заряд ташувчилар концентацияси ва ҳаракатчанлиги аниқланди.

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

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА**

ТУРАПОВ ИЛХОМ ХИММАТАЛИЕВИЧ

**СТРУКТУРА И ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК
СИЛИЦИДОВ Co И Mn, ПОЛУЧЕННЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ Si**

01.04.04 – Физическая электроника

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации доктора философии (PhD) по
физико-математическим наукам**

Карши – 2022

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрировано в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2022.2.PhD/FM468.

Диссертация выполнена в 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.ziyounet.uz).

Научный руководитель:	Умирзаков Болтаходжа Ерматович доктор физико-математических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Исаханов Зайнобиддин Абилайзиевич доктор физико-математических наук, с.н.с. Аликулов Муйсин Нуртошевич кандидат физико-математических наук, доцент
Ведущая организация:	Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека

Защита диссертации состоится « 12 » 01 2023 г. в 14⁰⁰ часов на заседании Научного совета PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 по присуждению ученых степеней при Каршинском государственном университете (Адрес: 180103, г. Карши, улица Кучабог, 17. Тел.: (0375) 225-34-13; факс: (0375) 221-00-56; e-mail: qarshidu@mail.uz). Каршинский государственный университет корпус 2, ауд. 127.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Каршинском государственном университете (зарегистрирована за № 145). (Адрес: 180103, г. Карши, улица Кучабог, 17. Тел.: (0375) 225-34-13; факс: (0375) 221-00-56; e-mail: qarshidu@mail.uz).

Автореферат диссертации разослан « 30 » 12 2022 года
(реестр протокола рассылки № 3 от « 30 » 12 2022 года).



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

Г.Х.Аллаярова
ученый секретарь Научного совета
по ученых степеней, PhD

А.К.Ташатов
председатель научного семинара при
Научном совете по присуждению ученых
степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире, в настоящее время значительное внимание уделяется получению и изучению физико-химических свойств наноразмерных пленок силицидов металлов и многослойных структур на их основе. При этом в мире особый интерес представляют силициды кобальта и марганца. Хорошее соответствие постоянных решеток дисилицида кобальта и кремния делает возможным выращивание высококачественных эпитаксиальных многослойных гетероструктур типа $\text{Si-CoSi}_2\text{-Si}$, $\text{CoSi}_2\text{-Si-CoSi}_2$ которые особенно широко используются в создании СВЧ транзисторов с металлической и проницаемой базой, объемных ИС, OLED дисплеев, оптических резонаторов, элементов памяти и др.

В мире ведутся научные исследования по совершенствованию использования высокомарганцевых силицидов (ВСМ) в оптоэлектронике, спинтронике, термоэлектрических батареях, магнитной памяти и магнитных датчиках. В этом направлении, среди прочего, приоритетными считаются исследования по созданию термо- и внешних светочувствительных приборов р- и n-типа на основе высокомарганцевых силицидов. В то же время разработка технологии синтеза наноразмерных пленок кобальта и марганца, определение их структуры и свойств, изучение механизмов образования новых соединений считаются особенно актуальными задачами физической электроники.

В последние годы в Республике для создания наноматериалов, используемых в микроэлектронике и устройствах наноэлектроники, используют методы твердофазной эпитаксии и ионной имплантации с получением нанофаз и нанопленок на поверхности монокристаллического кремния и диэлектриков. Также реализованы инновационные проекты по синтезу наноразмерных систем МДП (металл-диэлектрик-полупроводник), ПДП (полупроводник-диэлектрик-полупроводник) на основе элементарных и бинарных полупроводников CoSi_2 , определены их состав, структура и физические свойства, а также по изготовлению термопар на основе пленок Mn_4Si_7 и определены задачи по научным разработкам. При реализации этих задач, в частности, определение закономерностей поверхностного и электронного строения, кристаллических состояний, оптических и электрофизических свойств пленок CoSi_2/Si (111) и $\text{Mn}_4\text{Si}_7/\text{Si}$ (111), полученных методом твердофазной эпитаксии, при нагреве подложки $\text{Si}(111)$ при различных температурах, особенно важно получить механизмы формирования пленок CoSi_2 и нанокристаллических фаз, полученных имплантацией низкоэнергетичными ионами Co^+ , определить структуру и зонно-энергетические параметры системы CoSi_2 .

Данная диссертационная работа в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Постановлениях Президента Республики Узбекистан № УП-60 от 28 января 2022 года «О стратегии развития нового

Узбекистана на 2022-2026 годы», №УП-2789 от 17 февраля 2017 года «Меры по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управлению и финансированию научно-исследовательских работ» и №УП-4422 от 22 августа 2019 г. «Об оперативных мерах по повышению энергоэффективности хозяйственной и социальной сфер, внедрению «Технологии энергосбережения и развития возобновляемых источников энергии» и другие нормативные акты, связанные с этой деятельностью. Данная диссертация в определенной мере работает на выполнение задач, определенных в нормативно-правовых документах.

Соответствие исследований приоритетным направлениям развития науки и технологий в республике. Диссертация выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан: II. «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение» и III. Развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. С появлением полупроводниковой электроники в середине прошлого века резко возросло количество научных исследований о влиянии ионного легирования на электрофизические свойства полупроводников, формирование гетероструктуры, p-n переходов и на разные активные части приборных элементов. Русскими учеными М.В.Гомоюновой (Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН), С.И.Курганским (Воронежский государственный университет) с учениками получены и изучены электронные, оптические и магнитные свойства наногетероструктур CoSi_2/Si , NiSi_2/Si и $\text{Si}/\text{CoSi}_2/\text{Si}$. Ученые A.L.Schmitt (Университет Висконсин-Мэдисон), С.А.Decker, J.Kim, К.С.Lu, J.D.Carter, Y.C.Chou показали, что силициды переходных металлов вызывают значительный интерес благодаря своим разнообразным физическим свойствам, важным не только для фундаментальных исследований, но и для практических приложений. Yongquan Qu (Кафедра химии и биохимии Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе), R.T.Tung, Jeong Hoon Park (SK Hynix Semiconductor, Bupal-eup, Ichon-Si, Kyounggi-do, Koreya) впервые обнаружили что, общий уровень тока утечки на микросхемах уменьшается из-за значительного уменьшения количества дефектных участков, таких как всплески Co. Pelleg J., Белоусов И.В. (Киевский национальный университет им. Т.Шевченко) и др. показали, что на структурных дефектах поверхности кремния в процессе экзотермической реакции происходит локальное зарождение силицидной фазы и наблюдается ее самоупорядоченный латеральный рост. Migas D.V., Caprara S. (Dipartimento di Fisica, Университет Рима «Ла Сапиенца») и др. получили большое количество тетрагональных фаз силицидов марганца и изучили их электронную структуру и электрофизические свойства. Ими установлено, что $\text{Mn}_{11}\text{Si}_{26}$ при $T \leq 500$ К является вырожденным полупроводником *p* типа. Barczak S.A., Isoda Y., Chen X. показали, что силициды высшего марганца (ВМС) являются эффективными материалами для термоэлектрической и фотоэлектрической энергетики, излучения и

обнаружения света. Японские ученые Udono H., Nakamori K. (Университет Ибараки, Высшая школа науки и техники) показали, что однофазный Mn_4Si_7 является собственным полупроводником и не обладает магнитным моментом.

Учеными Узбекистана, в частности, М.Т.Нормурадовым, Б.Е.Умирзаковым, А.С.Рысбаевым и М.С.Боходирхоновым, К.П.Абдурахмановым, Т.С.Камиловым впервые исследованы закономерности формирования и механизмов образования наноразмерных фаз и слоев $CoSi_2$, Mn_4Si_7 на поверхности Si и в приповерхностных слоях при имплантации ионов Co^+ и Mn^+ и изучены их структура, эмиссионные и оптические свойства. Пленки $CoSi_2$ и Mn_4Si_7 на поверхности Si привлекают внимание ученых мира своей кристаллографической и термической совместимостью.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертационная работа. Диссертационная работа выполнена в Ташкентском государственном техническом университете им. Ислама Каримова в рамках фундаментального проекта Ф-ОТ-2021-422 «Формирование наноразмерных термоэлектрических пленок $BaSi_2$ и Mn_4Si_7 и их свойства» и в рамках научного плана кафедры «Общая физика» на 2021-2026 гг. «Изменение электронной, кристаллической структуры и свойств материалов различной природы (металл, полупроводник, диэлектрик) путем имплантации высокой дозы низкоэнергетичных ионов, термической, ИК и лазерной обработки».

Целью исследования является исследование закономерностей формирования тонких силицидных пленок кобальта и марганца на поверхности кремния в процессах напыления, термодиффузии и ионной имплантации и изучение их электронной структуры, эмиссионных, оптических и электрофизических свойств.

Задачи исследования:

изучить влияние предварительного создания упорядоченных центров на формирование нанопленок Co и $CoSi_2$ на поверхности Si при твердофазном осаждении. Оценить критические размеры слоев Co, при котором проявляются свойства характерные для узкозонных полупроводников;

изучить состав, структуру и свойства Si, имплантированного ионами Co^+ в различных температурных режимах подложки. Выяснить основные механизмы образования химической связи между атомами Si и Co и оценить минимальные размеры нанофаз $CoSi_2$ при которых начинает увеличиваться ширина запрещенной зоны;

определить оптимальные режимы лазерного напыления для получения нанопленочной системы $CoSi_2/SiO_2/Si$ (111);

изучить влияние осаждения субмонослойных покрытий Cs на плотность состояния электронов валентной зоны и зоны проводимости, а также параметров энергетических зон;

изучить влияние осаждения тонких слоев Mn на состав, структуру и свойства Si(111);

исследовать процессы силицидообразования при термодиффузии Mn в Si. Определить оптимальные условия формирования пленок Mn_4Si_7 ;

изучить электронную структуру и электрофизические свойства пленок Mn_4Si_7 .

Объектами исследования являлись монокристаллы Si(111) *p* и *n* – типа, пленки $CoSi_2$ и Mn_4Si_7 .

Предметом исследования являются закономерности формирования гетеропленочных структур $CoSi_2/Si$, Mn_4Si_7/Si и изучение их состава, кристаллической и электронной структуры, эмиссионные и оптические свойства.

Методы исследований. Электронная оже-спектроскопия (ЭОС), спектроскопия упруго-рассеянных электронов (СУРЭ), спектроскопия характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ), ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия (УФЭС), дифракция быстрых электронов (ДБЭ), рентгенофазный анализ (РФА), растровая электронная микроскопия (РЭМ) и спектроскопия отраженных электронов (СОЭ).

Научная новизна исследования заключается в следующем:

Образование однородных нанопленок Co и $CoSi_2$ при бомбардировке, предварительно обработанной поверхности Si(111), ионами Ar^+ с малой энергией ($E_0=0,5-1$ кэВ) и дозой ($D \approx 8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$), при этом ширина запрещенной зоны нанопаз Co составляет $E_g=0,3$ эВ и они обладают полупроводниковыми свойствами;

установлено, что при имплантации подложки монокристаллического кремния ионами Co^+ , нагретыми до 600 К, глубина одного и того же легированного слоя составляет 50-60 Å, а также приповерхностный слой частично разупорядочен, а атомы Si и Co образуют химическую связь около 90 ат.%;

На установке ВУП-5 путем лазерного распыления $CoSi_2$ на поверхности $SiO_2/Si(111)$ получены поликристаллические нанопленки $CoSi_2/SiO_2/Si(111)$. Нагрев нанопленки $CoSi_2/SiO_2/Si(111)$ при 900 К показал что для разных длин волн коэффициенты отражения и поглощения света различаются;

При выращивании тонких пленок атомов Cs толщиной $\theta \leq 1$ на поверхности $CoSi_2/Si(111)$ было установлено, что величина E_g и положение максимумов состояний плотности валентных электронов практически не изменяются, а работа выхода фотоэлектронов уменьшается до 3 эВ, а квантовый выход фотоэлектронов увеличивается в 3 и более раз.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

методом предварительной бомбардировки ионами Ar^+ получены упорядоченно – расположенные нанопазы и однородные нанопленки Co и $CoSi_2$. Показано, что наноразмерные фазы Co обладают свойствами узкозонных ($E_g = 0.3$ эВ) полупроводников;

методом лазерного напыления получены однородные нанопленки $CoSi_2$ на поверхности $SiO_2 / Si(111)$. Установлено, что при уменьшении толщины

пленки CoSi_2 от 5 ÷ 6 монослоев до 3 монослоев E_g увеличивается от 0.65 эВ до 0.8 эВ;

изучены закономерности формирования силицидов марганца при термодиффузии Mn в Si в условиях СВВ ($P=10^{-7}$ Па). Показано, что при $T \approx 1100$ К формируется монокристаллический силицид Mn_4Si_7 с тетрагональной решеткой.

Достоверность результатов исследований обеспечивается использованием современных методов электронной спектроскопии и диагностики поверхности высокого разрешения, проведением экспериментов в условиях сверхвысокого вакуума, хорошим соответствием результатов для чистого кремния с данными других авторов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость исследований заключается в выяснении закономерностей и механизмов формирования силицидных пленок при напылении атомов Co и Mn на Si и имплантации ионов Co^+ в Si с последующим термическим прогревом.

Анализ результатов зависимости коэффициентов поглощения и отражения света поликристаллической пленкой CoSi_2 от длины волны показал, что она обладает высокой чувствительностью в видимой и ИК-областях, что может использоваться в наноэлектронных устройствах, работающих в этих диапазонах.

Внедрение результатов исследования. На основе исследований формирования пленок Co, Mn и силицидных структур на поверхности монокристаллического кремния, их электронных, оптических и электрофизических свойств, а также полученных гетероструктуры:

в ОТ-Ф2-70 представлены результаты образования однородных нанопленок Co и CoSi_2 при поверхностной бомбардировке ионами Ar^+ малой энергии ($E_0=0,5-1$ кэВ) и дозы ($D \approx 8 \cdot 10^{14}$ см^{-2}) и ширина запрещенной зоны нанопленок Co составляет $E_g=0,3$ эВ и они обладают полупроводниковыми свойствами. При реализации фундаментального проекта «Влияние температуры, деформации и света на параметры наноразмерных полупроводников в сильном электромагнитном поле» результаты были использованы (задание № 06/10-09/753 от 7 сентября 2022 г. ректора Наманганского инженерно-строительного института). Было установлено, что пленки $\text{CoSi}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ (111), полученные методом лазерного напыления, имеют разные коэффициенты отражения и поглощения света на разных длинах волн. Созданием переноса атомов Mn разной толщины на поверхность Si и нагревания при разных температурах установлено, что электроны 4s-Mn и 3s-Si образуют взаимосвязи 3s-Si+3d-Mn, 3s-Si+4s-Mn. Определена плотность валентных электронов тонких пленок силицидов Co и Mn на поверхности Si;

Получены результаты на установке ВУП-5 путем лазерного распыления CoSi_2 на поверхности $\text{SiO}_2/\text{Si}(111)$ поликристаллические нанопленки $\text{CoSi}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}(111)$. Нагрев нанопленки $\text{CoSi}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}(111)$ при 900 К показал, что на разных длинах волн коэффициенты отражения и поглощения света различаются и эти результаты были использованы при реализации практического

проекта «Разработка технологии напыления многокомпонентных тонкопленочных покрытий с помощью лазерного излучения» под номером ГНПТ АФ-Атекс-2018 (15-274) и прилагается (Справка № 2/1255-2203 Вице-президента АН РУз). В результате была создана технология формирования термочувствительных покрытий путем напыления мишеней сложного состава в вакуумном функциональном устройстве. Путем модернизации вакуумного блока типа ВУП-5 разработаны новые способы получения покрытий на поверхности кремния и других подложек.

Апробация результатов исследования. Результаты исследований были обсуждены на 7 международных и 5 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. По материалам диссертации опубликованы 18 научных трудов, 6 статей, из них 2 статьи в журналах, входящих в базу Web of Science Core Collection, Scopus.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Текст диссертации изложен на 115 страницах текста, включая 55 рисунков и 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, описана степень изученности проблемы, приводится связь исследований с приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике, сформулирована цель и задачи диссертационной работы, приводится научная новизна, научная и практическая значимость полученных результатов, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

Первая глава **«Обзор литературы по исследованию структуры и физических свойств пленок силицидов Со и Mn»** посвящена краткому литературному обзору работ, посвященных исследованию закономерностей формирования тонких силицидных пленок кобальта и марганца на поверхности кремния в процессах напыления, термодиффузии и ионной имплантации и изучению их электронной структуры, эмиссионных, оптических и электрофизических свойств.

В конце главы приводятся выводы из обзора, цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава **«Методика экспериментальных исследований»** посвящена описанию методов обработки поверхности: очистки поверхности монокристалла Si, ионной имплантации и последующего отжига, а также краткому описанию принципов работы, использованных современных методов диагностики поверхности и приповерхностной области монокристаллов Si: Электронная оже-спектроскопия, спектроскопия упруго-рассеянных электронов, спектроскопия характеристических потерь энергии электронов, ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия, дифракция быстрых электронов, рентгенофазный

анализ, растровая электронная микроскопия и спектроскопия отраженных электронов.

Третья глава «Получение и изучение состава, структуры и свойств нанofаз и нанослоев CoSi_2 » посвящена получению методом твердофазной эпитаксии и ионной имплантации наноразмерных фаз и пленок Co и CoSi_2/Si (111) с использованием метода предварительной бомбардировки Si ионами Ar^+ и изучению зависимости параметров энергетических зон от размеров нанofаз Co и CoSi_2 .

Нанесение пленок Co на поверхность Si осуществлялось нагревом Co электронной бомбардировкой и проводилось при комнатной температуре подложки. Скорость роста пленок определялась использованием метода ОЭС в сочетании с ионным травлением и она составляла $\sim 2 \text{ \AA/мин}$. Напыление атомов Co , прогрев образцов, исследование их состава и параметров энергетических зон использованием методов оже-электронной спектроскопии ОЭС и измерением интенсивности проходящего через образец света, проводились в одном и том же приборе в условиях сверхвысокого вакуума (10^{-7} Па). Морфология поверхности изучалась методом растровой электронной микроскопии РЭМ (Jeol).

На рисунке 1 приведены зависимости интенсивности I проходящего через образец света от энергии $h\nu$, для $\text{Si}(111)$ с нанопленкой Co разной толщины θ .

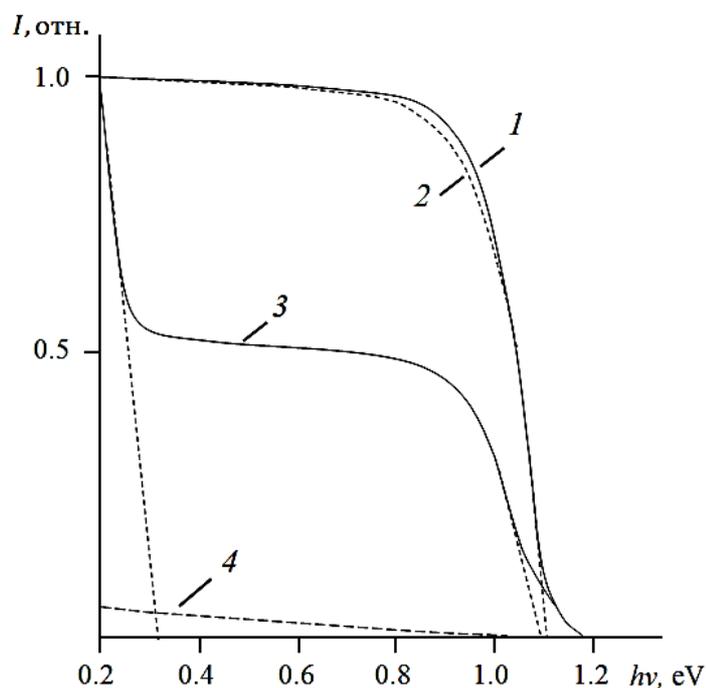


Рисунок 1. Зависимости $I(h\nu)$ для $\text{Si}(111)$ с пленкой Co различной толщины θ (монослой): 1- $\theta=0$ (чистый Si); 2- $\theta=1$; 3- $\theta=3$; 4- $\theta=6$.

Здесь $I = \frac{I_{\text{CoSi}_2}}{I_{\text{Si}}}$; I_{Si} – интенсивность проходящего света через чистый

Si (111). I_{CoSi_2} – интенсивность проходящего света через Si (111), с пленкой CoSi_2 . Видно, что при $\theta = 1$ монослой вид зависимости $I(h\nu)$ не отличается

от таковой для чистого Si(111). Только в области $h\nu \approx 0.9 \div 1$ эВ наблюдается более существенное уменьшение I . По-видимому, скопление атомов Co в центрах зародышей пока ещё существенно не влияет на оптические свойства Si. В случае $\theta=3$ монослоя значение I резко уменьшается в двух областях $h\nu$: при $h\nu \approx 0.2$ эВ и при $h\nu = 0.9$ эВ. Первое уменьшение I связано с наличием на поверхности участков покрытых атомами Co, а второе – не покрытых Co участков Si. Экстраполяция правой части кривой к оси $h\nu$ дает значение ~ 0.3 эВ, т.е. E_g этих участков составляет ≈ 0.3 эВ. По формуле

$$Q = 1 - \frac{I_{Co}}{I_{Si}}$$

можно оценить степень покрытия Q поверхности Si атомами Co.

В данном случае значение Q составляет $0.35 \div 0.4$. Это приблизительно согласуется с данными РЭМ (рис. 2). Если учесть, что расстояние между центрами этих фаз $\sim 50 \div 60$ нм, то их средние поверхностные диаметры составляют $d \approx 25 \div 20$ нм, а примерная толщина наночастиц $\sim 6 \div 8$ монослоев ($\sim 12 \div 15$ Å). Исходя из этого можно предположить, что при небольших размерах наночастиц Co ($\theta \leq 3$ монослоя) проявляются квантово-размерные эффекты: в фазе металлического Co появляется узкая запрещенная зона, характерная для узкозонных полупроводников. При 6 монослоев степень покрытия поверхности Si наночастицами Co приближается к 1 и на кривой $I(h\nu)$ не наблюдается двойное резкое уменьшение I , т.е. значение $I(h\nu)$. При $8 \div 10$ монослоев поверхность полностью покрывается атомами Co. Однако свет небольшой интенсивности проходит через пленку вплоть до $10 \div 12$ нм. По-видимому, очень тонкая пленка Co пропускает свет. Отметим, что наночастицы и нанопленки Co были аморфными. Результаты ОЭС показали, что при комнатной температуре не происходит заметная взаимодиффузия атомов между подложкой и пленкой. После прогрева кремния с наночастицами и нанопленками Co при $850 \div 900$ К формировались нанокристаллические фазы и пленки $CoSi_2$.

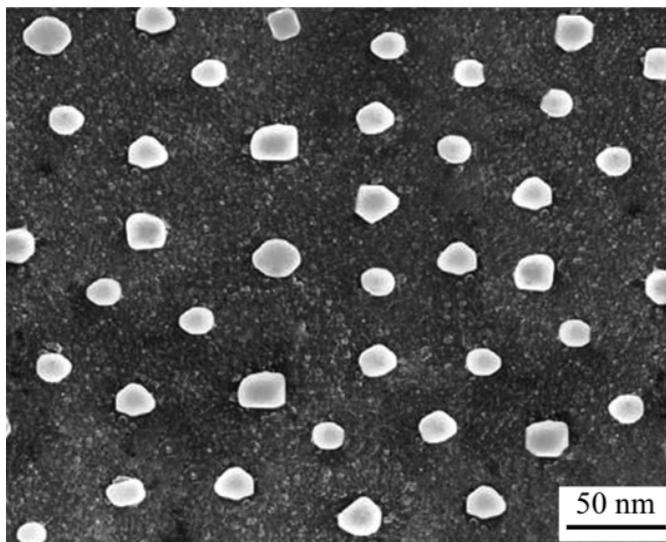


Рисунок 2. РЭМ – изображения поверхности Si (111) с пленкой Co с $\theta=6$ монослоев.

На рис. 3. приведены зависимости $I(h\nu)$ для Si покрытого пленкой CoSi_2 толщиной 3 и 10 монослоев (кривая 2 и 3), измеренные после прогрева при ~ 900 К в течение 40 мин. Из кривой 2 видно, что в случае нанофаз CoSi_2 с $\theta \approx 3$ монослоя степень покрытия поверхности составляет $0.5 \div 0.6$, $d \approx 25 \div 30$ нм, а значение $E_g \sim 0.8$ эВ. В случае $\theta_{\text{CoSi}_2} \approx 10$ монослоев, значение I практически уменьшается до нуля в интервале $h\nu = 0.45 \div 0.65$ эВ. Можно полагать, что при этом поверхность Si полностью покрывается сплошным, однородным эпитаксиальным слоем CoSi_2 толщиной $\sim 20 \div 25$ монослоев и E_g этого слоя составляет ~ 0.6 эВ, что характерно для толстых эпитаксиальных слоев CoSi_2 .

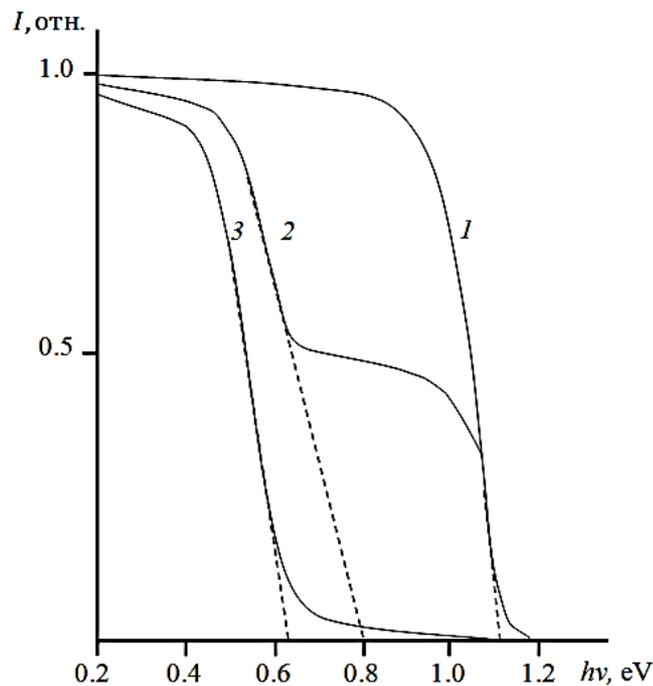


Рисунок 3. Зависимости $I(h\nu)$ для пленки $\text{CoSi}_2/\text{Si}(111)$ с толщиной θ (монослой): 1- $\theta=0$ (чистый Si); 2- $\theta=6$; 3- $\theta=10$.

На рис. 4. приведены концентрационные профили распределения Co по глубине h для Si имплантированного ионами Co^+ при комнатной температуре с $E_0=1$ кэВ при различных дозах D облучения. Видно, что при $D=5 \cdot 10^{14}$ см^{-2} на глубине $h \approx 3.5 \div 4$ нм появляется максимум, т.е. можно полагать, что проецированный пробег ионов Co составляет ~ 4 нм. С ростом дозы ионов C_{Co} увеличивается по всей области ионно – имплантированного слоя. При этом положение максимума немного смещается в сторону малых глубин. При $D > 10^{16}$ см^{-2} зависимость $C_{\text{Co}}(h)$ имеет ступенчатый характер. Начиная с $D=6 \cdot 10^{16}$ см^{-2} структура кривой $C_{\text{Co}}(h)$ практически не меняется, т.е. $6 \cdot 10^{16}$ см^{-2} для данной энергии является дозой насыщения. При этом поверхностная концентрация C_{Co} составляет $\sim 50 \div 52$ ат.% и она не меняется до глубины $35 \div 40$ Å. Анализ спектров Оже – электронов показал, что начиная с дозы с $5 \cdot 10^{14}$ см^{-2} в области максимума наблюдается образование соединения

между атомами Co и Si. С ростом D концентрация атомов Co, образующих связи с атомами Si, увеличивается.

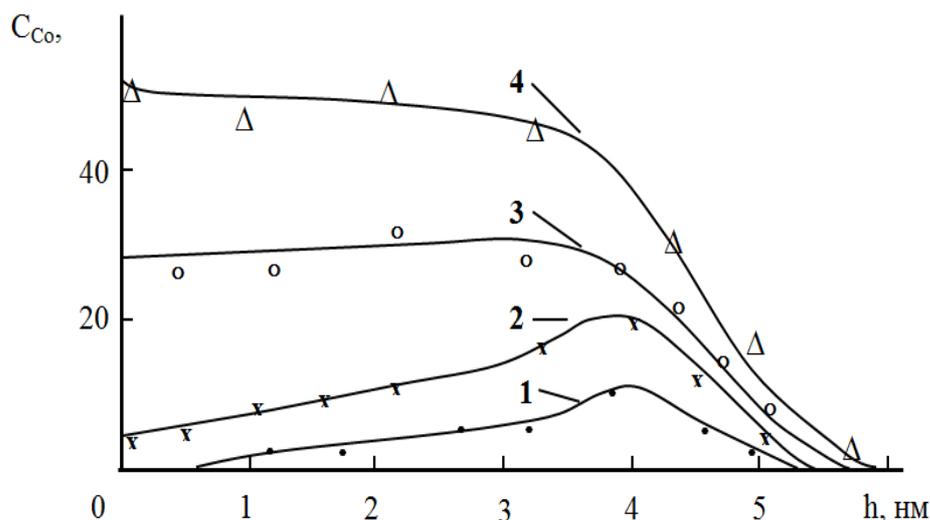


Рисунок 4. Зависимость концентрации Co от глубины h для Si, имплантированного ионами Co^+ с $E_0 = 1$ кэВ при дозах D , см $^{-2}$; 1- $5 \cdot 10^{14}$, 2- $5 \cdot 10^{15}$, 3 - 10^{16} , 4 - $6 \cdot 10^{16}$.

Часть атомов Co и Si не входят в химическую связь. При $D = D_n$ в ионно – имплантированном слое толщиной $d \approx 35 \div 40$ Å образуются соединения типа $CoSi_2$ с концентрацией $\sim 25 \div 30$ ат. %, $CoSi$ – $10 \div 12$ ат. % и Co_2Si – $5 \div 10$ ат. %. На рис. 4 приведены зависимости $C_{Co}(h)$ для Si (111), имплантированного ионами Co^+ с $E_0 = 1.0$ кэВ и дозой $D = D_n$ при комнатной температуре и при 650 К подложки. Видно, что в случае нагретого образца Co до глубины $30 \div 35$ Å распределяется практически однородно, концентрация Co в приповерхностном слое и толщина переходного слоя относительно не нагретого образца значительно меньше. В однородно легированном слое концентрация $CoSi_2$ составляет $\sim 65 \div 70$ ат. %, а общая концентрация $CoSi$ и Co_2Si – $20 \div 25$ ат. %. Постимплантационный отжиг при $T \approx 900$ К в обоих случаях приводил к формированию однородной эпитаксиальной пленки $CoSi_2$ толщиной $d \approx 35 \div 40$ Å.

В третьей главе также приводятся результаты изучения закономерностей формирования нанопленок $CoSi_2$ на поверхности SiO_2/Si (111) при лазерном напылении и их зонной структуры и оптических свойств.

При импульсном лазерном напылении вращательное движение мишени и подложки вокруг оси обеспечивает равномерное распределение атомов Co и Si по поверхности, которая находится в аморфном состоянии. Нагрев этой системы при температуре 900 К в течении 1 ч. и последующем медленном охлаждении формировалась поликристаллическая пленка $CoSi_2$ (рис. 5). Результаты рентгеноструктурного анализа показали, что структура кристалла кубическая и период решетки $a = 5.3560$ Å, плотность 4.976 г/см 3 , что хорошо согласуется с литературными данными.

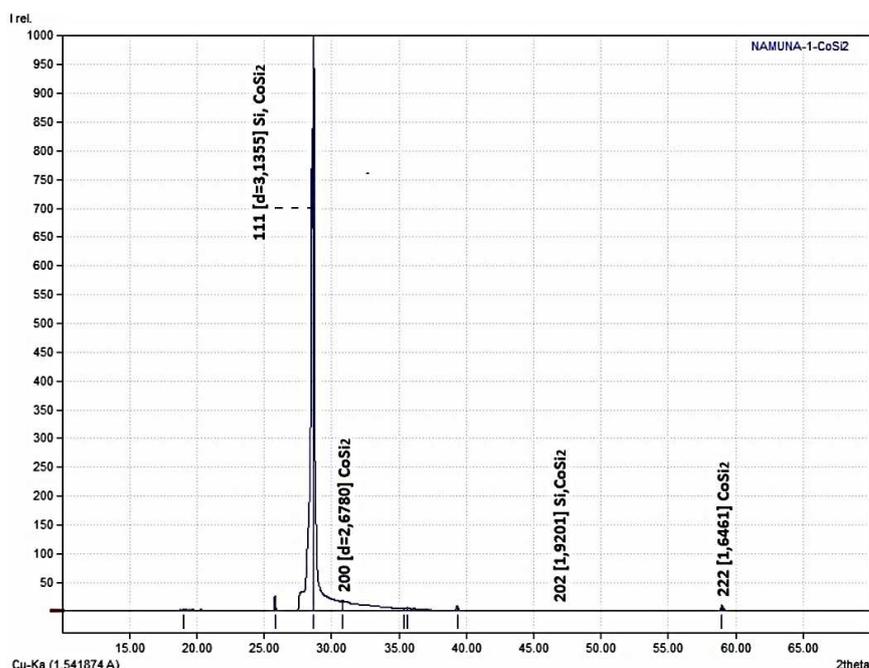


Рисунок 5. Рентгенофазовый анализ поликристаллической пленки $\text{CoSi}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ (111).

На рис. 6 приведен график зависимости коэффициента светоотражения поликристаллической пленкой $\text{CoSi}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ (111) от длины волны. Видно, что коэффициент отражения света при длине волны $\lambda = 386$ нм составляет 55 %, при $388 \div 796$ нм снижается до 47 %, а при $796 \div 989$ нм – до 36 %.

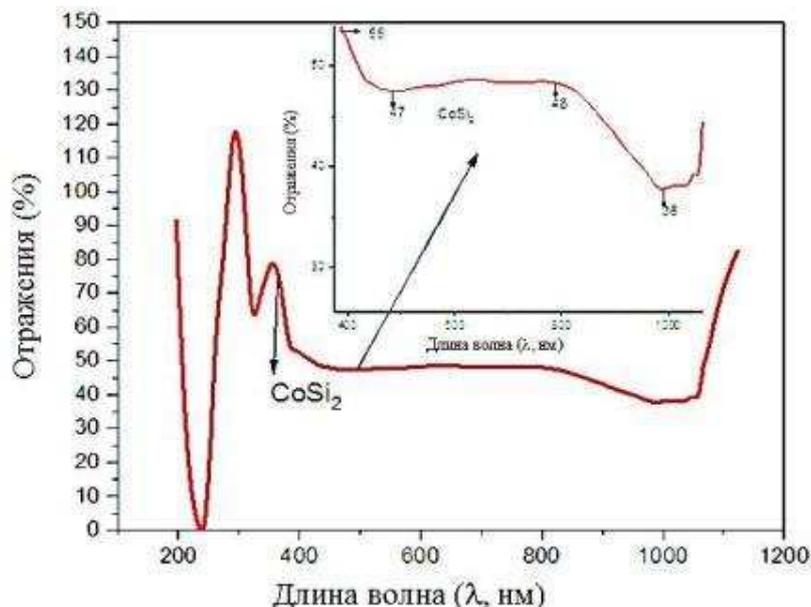


Рисунок 6. Коэффициент отражения света поликристаллической пленкой $\text{CoSi}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ (111).

Из рис. 7, где представлен график зависимости коэффициента светопоглощения поликристаллической пленкой $\text{CoSi}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ от длины волны, видно, что коэффициент поглощения при длине волны $\lambda = 373$ нм в видимой области достигает минимума 0,2 %.

При длине волны $376 \div 463$ нм коэффициент поглощения колеблется в пределах 0,27 %. В диапазоне длин волн $463 \div 837$ нм поглощение света увеличивается до 0,28 %, а в диапазоне длин волн $837 \div 986$ нм – до 0,39 %. Из рисунков 6 и 7 также видно, что сформированная пленка $\text{CoSi}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ обладает высокой чувствительностью в видимой и ИК-областях.

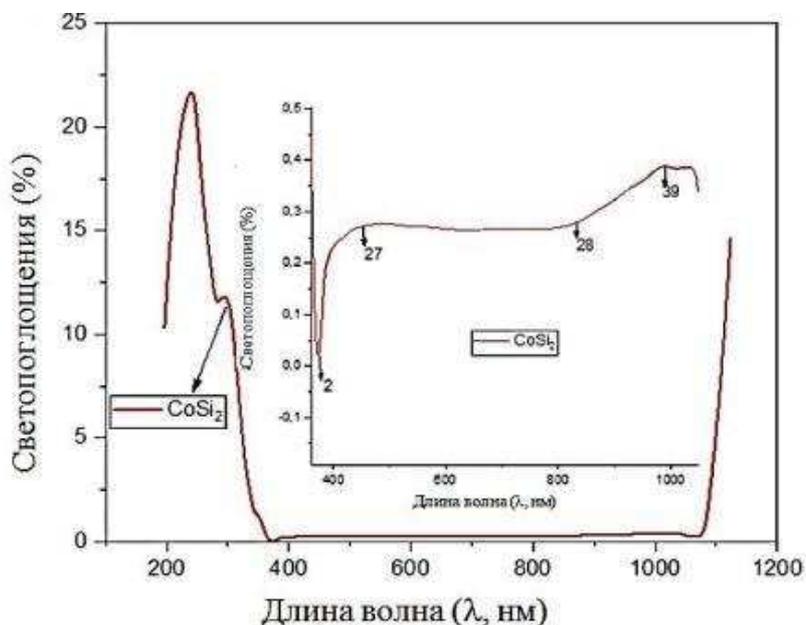


Рисунок 7. Коэффициент светопоглощения поликристаллической пленкой $\text{CoSi}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ (111).

На рисунке 8: α -коэффициент поглощения, $h\nu$ -энергия фотона, λ -длина волны света. На основе зависимости энергии фотонов поглощения поликристаллической пленкой $\text{CoSi}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ (111) от энергии падающих фотонов с использованием функции «Kubelka – Munk» было установлено, что ширина запрещенной зоны пленки составляет 0,65 эВ.

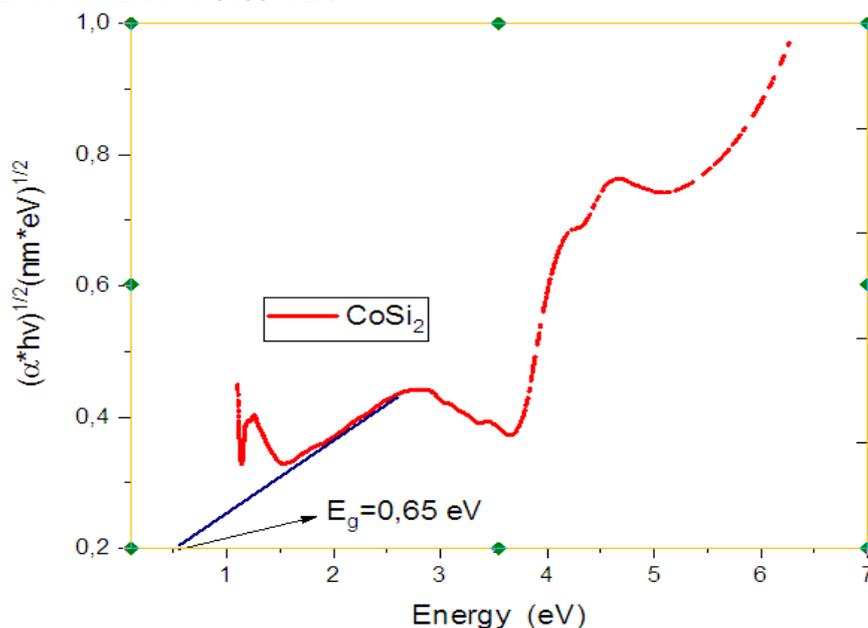


Рисунок 8. Ширина запрещенной зоны поликристаллической пленки $\text{CoSi}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ (111).

Впервые показано, что наноразмерные фазы Co с поверхностными диаметрами $\leq 20 \div 25$ нм обладают свойствами узкозонных полупроводников ($E_g \approx 0.3$ эВ). Используя метод лазерного напыления, получены наноразмерные пленки $CoSi_2$ на поверхности SiO_2/Si (111). Ширина запрещенной зоны, полученной поликристаллической пленки $CoSi_2/SiO_2/Si$, оказалась равной 0.65 эВ и с уменьшением θ до 3 монослоя E_g увеличивается до 0.8 эВ. Анализ результатов зависимости коэффициентов поглощения и отражения света поликристаллической пленкой $CoSi_2$ от длины волны показал, что она обладает высокой чувствительностью в видимой и ИК-областях, что может использоваться в нанoeлектронных устройствах, работающих в этих диапазонах.

В четвертой главе «Получение тонких пленок силицидов марганца на поверхности Si методами осаждения и изучение их физических свойств» приводятся результаты экспериментальных исследований по изучению изменения состава и электронной структуры Si (111) при осаждении тонких пленок (1÷20 монослоев) Mn при комнатной температуре в условиях сверхвысокого вакуума (10^{-7} Па).

Напыление Mn осуществлялось на хорошо очищенную поверхность Si (111) методом электронно лучевого испарения чистого Mn при вакууме $P \approx 10^{-7}$ Па. Начальная часть оже – спектров, полученных при осаждении Mn различной толщины, приведены на рис. 9. Видно, что при $\theta = 1$ монослой форма и энергетическое положение Si $L_{23}VV$ ($E=92$ эВ), практически, не меняется, наблюдается некоторое уменьшение его интенсивности. При этом в области 40-41 эВ появляется слабый широкий оже – пик Mn $M_{23}VV$. Уже при $\theta=3$ монослоев оже – пик $L_{23}VV$ Si уширяется и его интенсивность уменьшается ~ в 2 раза. При $\theta = 5$ монослоев пик Si расщепляется на два с энергиями ~ 90 и 95 эВ, а интенсивность пика Mn увеличивается и также расщепляется на два пика с $E=43$ и 38 эВ.

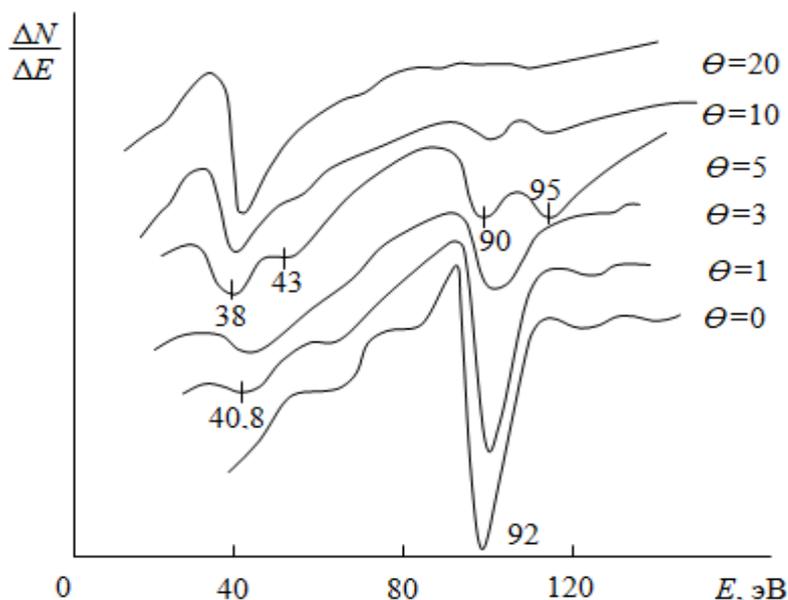


Рисунок 9. Влияние осаждение атомов Mn различной толщины θ на оже – пик $L_{23}VV$ кремни.

Наблюдаемые поведения оже – пиков Si и Mn указывают на образование химической связи между атомами Si и Mn. При $\Theta=10$ монослоев интенсивности пиков с 90 и 95 эВ резко уменьшаются и остается только оже–пик $M_{23}VV$ с 38 эВ Mn. По – видимому, до $\Theta=10-12$ монослоев происходит интенсивная взаимодиффузия атомов на границе Mn – Si, приводящая к образованию химической связи типа Mn_xSi_y . Начиная с $\Theta \approx 10-12$ монослоев диффундирующие атомы Si не достигают поверхности Mn. Из этого следует, что при комнатной температуре глубина диффузии Si в Mn составляет $\sim 10-12$ монослоев (20-24 Å). Вид оже – спектра при $\Theta=20$ монослоев практически не отличается от вида спектра массивной пленки Mn.

Известно, что образование химической связи между атомами Mn и Si приводит и резкому изменению структуры плотности состояния электронов валентной зоны Si, что хорошо отражается на спектрах фотоэлектронов.

На рис. 10 приведены концентрационные профили распределения атомов Mn по глубине h для системы Si (111) с пленкой Mn толщиной $\sim 40-45$ Å (20 монослоев), осажденной при комнатной температуре до и после отжига при ~ 1050 К. Отметим, что на поверхности пленки Mn содержались $\sim 2-3$ ат. % кислорода и $\sim 1-1.5$ ат. % углерода.

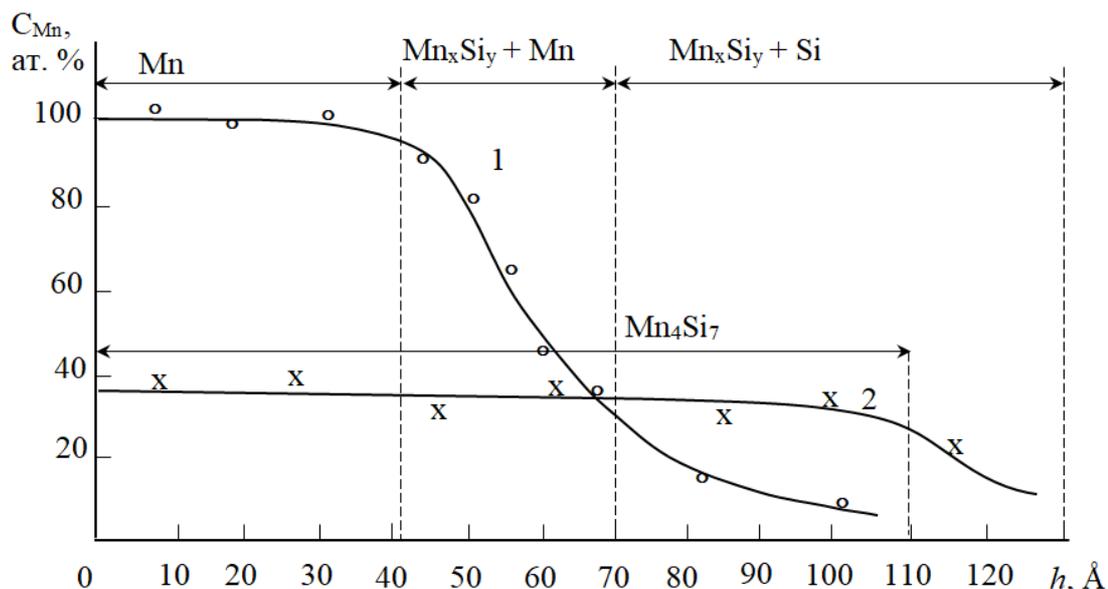


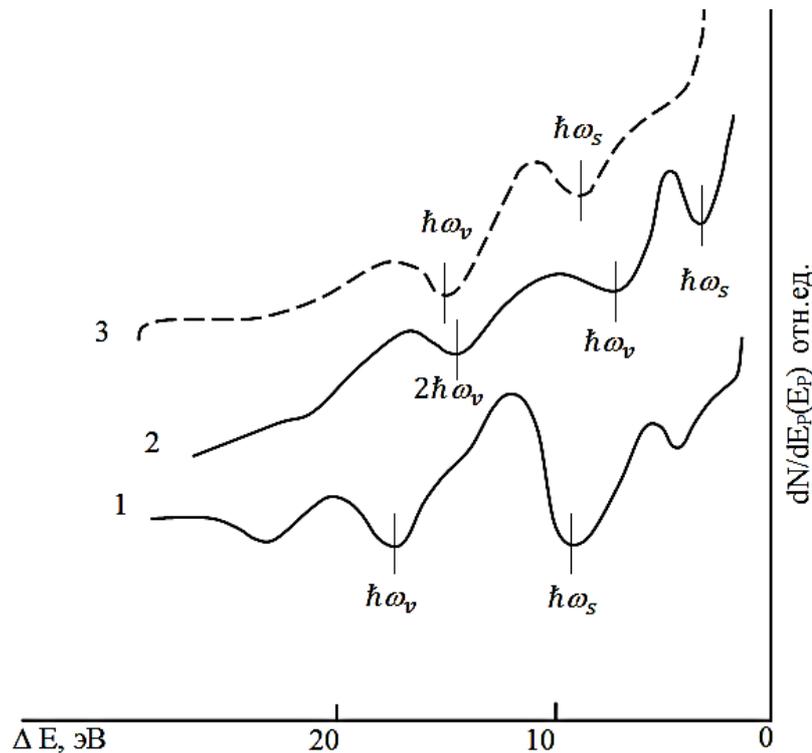
Рисунок 10. Профиль распределения атомов Mn по глубине системы Mn – Si (111) с $\Theta_{Mn} = 20$ монослоев ($\sim 40 \div 45$ Å). 1-до прогрева; 2-после прогрева при $T \approx 1050$ К в течении 2 часа.

Из рис. 10 (кривая 1) видно, что до глубины $h \approx 35-40$ Å C_{Mn} , практически, не меняется, в интервале $h \approx 40-60$ Å резко уменьшается до 35-40 ат. %, а затем медленно уменьшается и при $h \approx 100-125$ Å C_{Mn} приближается к 0. Анализ оже спектров показал, что в интервале $h \approx 40-70$ Å приблизительно 60-70 ат. % Mn образует химическую связь с атомами Si, т.е. формируется нестехиометрический Mn_xSi с большим избытком несвязанных атомов Mn и Si. Отжиг этой системы при ~ 1050 К в течении ~ 2 часов приводил

к образованию монокристаллической ВСМ пленки типа Mn_4Si_7 толщиной $\sim 110 \text{ \AA}$. (рис. 10, кривая 2). При этом, общая концентрация примесных атомов O и C на поверхности не превышала 1.5-2 ат. %. Между пленкой Mn_4Si_7 и подложкой (кремния) формируется переходный слой толщиной 60-70 \AA .

Электронная структура ТФЭ пленок Mn_4Si_7 , полученных методом осаждения Mn на поверхность Si с последующим прогревом при 1100 К, исследованы с использованием комплекса методов спектроскопии фотоэлектронов, упругоотраженных электронов и характеристических потерь энергии.

На рис. 11 приведены спектры ХПЭЭ измеренные при 100 эВ, для чистого Si (111), пленки Mn с $\theta \approx 200 \text{ \AA}$ и пленки Mn_4Si_7 с $\theta \approx 600 \text{ \AA}$.



**Рисунок 11. Спектры ХПЭЭ силицидов, для $E_p=100$ эВ.
1-Si(111); 2-Mn/Si (111), 3- Mn_4Si_7 .**

Видно, что положение и форма пиков ХПЭЭ пленки Mn_4Si_7 существенно отличаются от таковых для Si и Mn. Для пленки Mn наблюдаются пики при энергиях 4; 7.6 и 14.5 эВ, которые можно связать с возбуждением плазменных колебаний $\hbar\omega_s$, $\hbar\omega_v$ и $2\hbar\omega_v$.

На рис. 12. представлены спектры УОЭ $\left(-\frac{dR}{dE}(E_p)\right)$ записанные в области энергии $E_p = 1 \div 30$ эВ для Si (111) и для пленки Mn_4Si_7/Si (111). Спектры УОЭ состоят из ряда максимумов и минимумов. Известно, что положения некоторых максимумов совпадают с пороговой энергией возбуждения межзонных переходов, а минимумов – с пороговой энергией возбуждения коллективных колебаний (плазмонов).

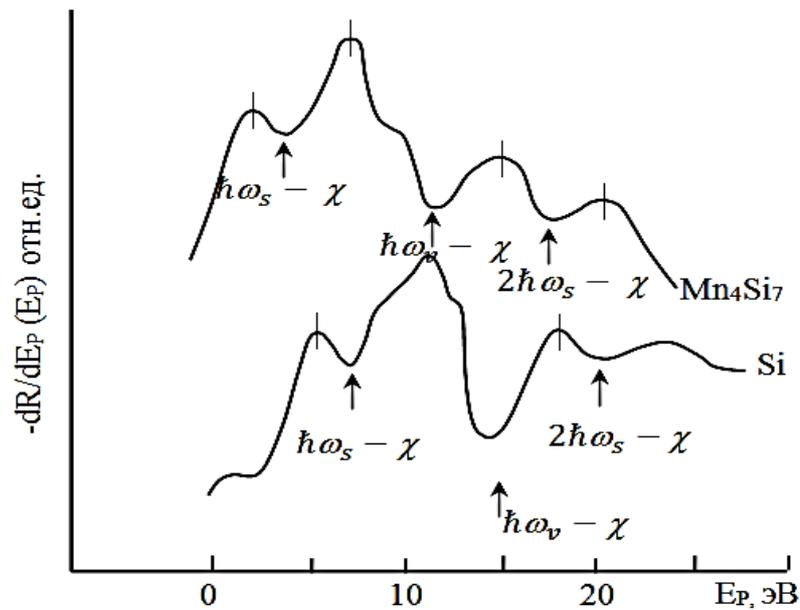


Рисунок 12. Спектры УОЭ (зависимости $-dR/dE_p(E_p)$) для энергий $E_p = 0 - 30$ эВ.

На рис. 13. приведены зависимости интенсивности I проходящего света от энергии фотонов (спектра поглощения света) для Si (111) и Si (111) с пленкой Mn_4Si_7 толщиной 600 \AA . По этим спектрам можно оценить ширину запрещенной зоны исследуемых образцов. Видно что E_g для Si (111) равна ~ 1.1 эВ, а для Mn_4Si_7 — 0.72 эВ, коэффициент отражения $R \sim 0.2$ и 0.3 , соответственно.

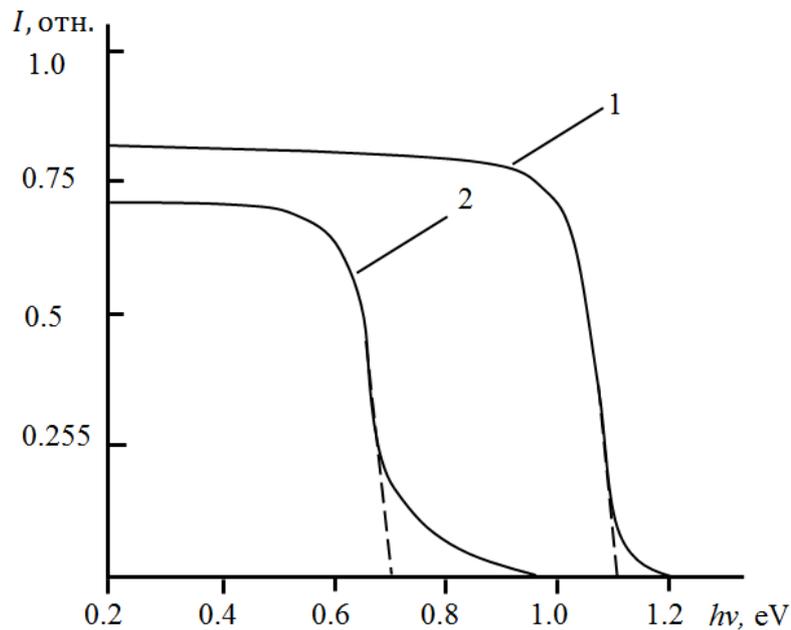


Рисунок 13. спектры поглощения для: 1-чистого Si (111), 2- Mn_4Si_7/Si (111).

На основе анализа спектров ХПЭЭ, УОЭ, УФЭС и поглощения света определены параметры энергетических зон Si и Mn_4Si_7 (таблица 1) и положения основных особенностей, наблюдаемых в этих спектрах и дана их интерпретация (табл. 2).

Таблица 1.

Параметры энергетических зон для силицидов

Объект исследования	Параметры зон, эВ			
	E_V	E_F	E_g	χ
Si (111), n-тип	5.1	4.2	1.1	4.0
Mn_4Si_7	3.7	3.6	0.7	3.0

Таблица 2.

Энергетические положения особенностей в спектрах фото- и упругоотраженных электронов для Si и силицида Mn_4Si_7

Исследуемая система	УФЭС		Спектр УОЭ ($-dR/dE_p(E_p)$)			
	Макс. $E_{св}$, эВ	Интерпретация	Макс. E_p , эВ	Интерпретация	Мин. $E+\epsilon\phi$, эВ	Интерпретация
Si(111), p – тип	-1.1	$E_{V_1} \rightarrow PC$	1.1	$E_V \rightarrow E_C$	11.2	$\hbar\omega_s$
	-2.3	$E_{V_2} \rightarrow 3p$	5.5	$E_{V_1} \rightarrow E_{C_1}$	17.6	$\hbar\omega_v$
	-3.0	$E_{V_3} \rightarrow 3s+3p$	8	$E_{V_3} \rightarrow E_{C_2}$	22.7	$2 \hbar\omega_s$
	-5.0	$E_{V_4} \rightarrow 3s$	10.5	$E_{V_3} \rightarrow E^*$		
	-7.5	$E_{V_5} \rightarrow 3s$	15.5	$E_{V_4} \rightarrow E_{C_2}$ $E_{V_5} \rightarrow E^*$		
Mn_4Si_7	-0.9	- Mn	2.5	$E_{V_1} \rightarrow E_{C_1}$	7.8	$\hbar\omega_s$
	-1.7	$E_{V_1} \rightarrow Mn+Si$	7.5	$E_{V_2} \rightarrow E_C$	14	$\hbar\omega_v$
	-3.5	$E_{V_2} \rightarrow Mn+Si$	9	$E_V \rightarrow E_{C_2}$	23	$2 \hbar\omega_s$
	-5.4	$E_{V_3} \rightarrow Mn+Si$	15	$E_{V_3} \rightarrow E_B$		$\hbar\omega_v + \hbar\omega_s$
	-6.8	$E_{V_4} \rightarrow Mn+Si$ $E_{V_5} \rightarrow Si$	21	$E_{V_4} \rightarrow E_B$ $E_{V_5} \rightarrow E_B^*$ $E_{V_5} \rightarrow E_C^{**}$		

Из таблицы 2. видно, что E_g силицида Mn_4Si_7 существенно меньше, чем E_g для Si и уровень Ферми располагается вблизи уровня E_v . По – видимому, Mn_4Si_7 является вырожденным полупроводником с дырочной проводимостью.

В четвертой главе приводятся результаты по изучению структуры и электрофизических свойств тонких пленок Mn_4Si_7 , осажденных на поверхности $SiO_2/Si(111)$.

Эти данные сведены в таблицу 4.3. и сравнены с известными литературными данными.

Таблица 3.

Электрофизические параметры Mn_4Si_7

Источник	Толщина, нм	ρ , Ом·см. при $T = 300$ К	Коэффициент Холла R_H , $см^3 \cdot Кл^{-1}$	Концентрация носителей n_p , $см^{-3}$	Подвижность, u_p , $см^2/В \cdot с$	Проводимость σ , $Ом^{-1} \cdot м^{-1}$	S , мкВ/К, $T = 300$ К
В данной работе	500	$7.82 \cdot 10^{-4}$	$1.88 \cdot 10^{-9}$	$4.85 \cdot 10^{21}$	1.64	$1.27 \cdot 10^3$	110
В литературе	65÷100	$3.3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-9}$	$2.7 \cdot 10^{21}$		$8 \cdot 10^2$	

Видно, что полученные данные удовлетворительно согласуются с литературными данными.

На рис. 14 показаны результаты измерения коэффициента Холла. В диапазоне 300÷650 К коэффициент Холла остается постоянным и составляет $R_H(T)=1,88 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{Кл}$ независимо от состава.

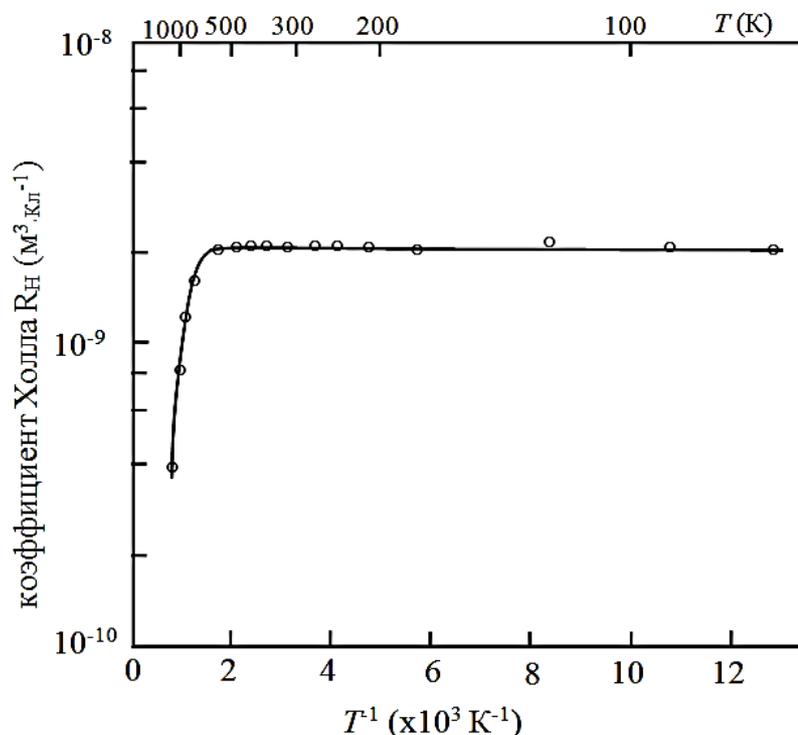


Рисунок 14. Температурная зависимость коэффициента Холла R_H для Mn_4Si_7 .

Показано, что при осаждении тонких пленок Mn ($\Theta=1\div 20$ монослой) до $\Theta=10$ монослоев атомы Si диффундируют в пленку Mn, а Mn – в пленку Si. Следовательно, на границе Mn–Si формируется переходный слой силицида типа Mn_xSi_y с большим избытком несвязанных атомов Si и Mn. После прогрева при $T \approx 1050 \text{ К}$ формируется однородная пленка Mn_4Si_7 толщиной 100 Å.

Изучены процессы силицидообразования при термодиффузии Mn в Si в условиях СВВ (10^{-6} Па). Определены оптимальные условия термодиффузии для формирования стехиометрического Mn_4Si_7 . Установлено, что при $T \leq 1000 \text{ К}$ происходит частичное образование химической связи между атомами Mn и Si. При 1100 К формируется пленка Mn_4Si_7 с хорошим стехиометрическим составом.

Изучена кристаллическая структура пленок силицида Mn. Показано, что Mn_4Si_7 кристаллизуется тетрагональной решеткой с параметрами $a = 5.75$ и $c = 15.6 \text{ Å}$ и обладает высокой гладкостью. Установлено, что при напылении Mn толщиной $\Theta \sim 100 \text{ нм}$ после прогрева формируется пленка Mn_4Si_7 с $\Theta \approx 290 \text{ нм}$.

Впервые изучены электрофизические параметры (ρ , R_H , n_p , u_p , S) тонкой пленки Mn_4Si_7 , выращенной на поверхности SiO_2/Si (111).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена методика получения упорядоченно расположенных наночастиц и однородных пленок Co и CoSi_2 на поверхности монокристаллов Si, основанная на предварительной бомбардировке ионами Ar^+ с низкой энергией ($E_0=0.5\div 1$ кэВ) и дозой ($D\approx 8\cdot 10^{14}$ см⁻²). Показано, что в наноразмерных фазах Co с поверхностными размерами $\leq 20\div 25$ нм проявляются квантово – размерные эффекты (появляется запрещенная зона с $E_g \approx 0.3$ эВ);

2. Впервые изучено влияние температуры подложки (кремния) при имплантации ионов Co^+ на состав, структуру и свойства Si. Показано, что в случае имплантации Co^+ с $E_0 = 1$ кэВ при комнатной температуре Si однородно легируется до глубины $35 \div 40$ Å, поверхностные слои полностью разупорядочиваются, $\sim 45 \div 50$ ат. % Co входят в химическую связь с Si. В случае имплантации Co^+ при $T = 600$ К глубина однородно легированного слоя составляет $50\div 60$ Å, приповерхностные слои частично разупорядочиваются, ~ 90 ат. % Co образуют химическую связь с атомами Si;

3. Методом лазерного напыления получены нанопленки CoSi_2 на поверхности SiO_2/Si (111). Результаты рентгеноструктурного анализа показали, что структура кристалла кубическая и период решетки $a=5.3560$ Å. Показано, что коэффициент отражения света при длине волны $\lambda = 386$ нм составляет 55 %, при $388 \div 796$ нм снижается до 47 %, при $796 \div 989$ нм – до 36 %, а при длине волны $376 \div 463$ нм коэффициент поглощения колеблется в пределах 0,27 %. В диапазоне длин волн $463 \div 837$ нм поглощение света увеличивается до 0,28 %, а в диапазоне длин волн $837 \div 986$ нм – 0,39 %;

4. Показано, что при напылении Cs на поверхность CoSi_2 толщиной $\Theta \leq 1$ монослоя, значение E_g и положение максимумов плотности состояния валентных электронов, практически, не изменяется, работа выхода фотоэлектронов уменьшается до 3 эВ, квантовый выход фотоэлектронов увеличивается в 3 и более раза. При $\Theta \geq 0.6$ монослоя на спектре появляется новый максимум при $E_{cv} = -7.2$ эВ, характерный для кремния. Впервые показано, что в зоне проводимости CoSi_2 имеются максимумы при энергиях 0.8 и 1.9 эВ ниже уровня вакуума;

5 Показано, что при малых толщинах Mn ($\Theta \leq$ монослоя) на границе системы Mn-Si формируется переходный слой толщиной $15\div 20$ Å. В переходном слое оже – пик $L_{23}VV$ Si при $E = 92$ эВ разлагается на два пика, что указывает на образование химической связи типа Mn_xSi_y . Изменение плотности состояния валентных электронов объясняется гибридизацией 3p – состояний Si с 3d и 4s состояниями Mn;

6. Изучены закономерности формирования силицидов при термодиффузии Mn в Si. Показано, что при $1050 \div 1100$ К формируется монокристаллическая пленка Mn_4Si_7 с гладкой поверхностью. Показано, что толщина пленки Mn_4Si_7 ~ 3 раза больше, чем толщина пленки Mn. Рентгенограммы системы $\text{Mn}_4\text{Si}_7/\text{Si}$ (111) показали, что пленка Mn_4Si_7 имеет тетрагональную решетку с параметрами $a = 5.75$ Å и $c = 15.6$ Å;

7. Используя комплекс методов, определины плотности состояния валентных электронов, параметры зон, средние значения числа валентных электронов, участвующих в коллективных колебаниях, энергии межзонных переходов, температурные зависимости термоэдс, удельного сопротивления, коэффициент Холла и подвижность носителей тонких пленок ($\leq 1000 \div 1100 \text{ \AA}$) Mn_4Si_7 .

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

**TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY NAMED
AFTER ISLAM KARIMOV**

TURAPOV ILKHOM KHIMMATALIEVICH

**STRUCTURE AND ELECTRONIC PROPERTIES OF Co AND Mn
SILICIDE FILMS PRODUCED ON A Si SURFACE**

01.04.04 – Physical electronics

**ABSTRACT OF DISSERTATION
of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences**

Qarshi – 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 B2022.2.PhD/FM468.

Dissertation has been prepared at 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.ziyounet.uz).

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

Official opponents: Isakhanov Zainobiddin Abilpayzievich
doctor of physical and mathematical sciences, s.r.
Alikulov Muysin Northoshevich
candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor

Leading organization: National University of Uzbekistan named
after Mirzo Ulugbek

The defense will take place on "12" 01 2023 at 19⁰⁰ 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: 180103, 17, Kuchabag Street, Karshi. Tel.: (0 375) 225-34-13; fax: (0375) 221-00-56; e-mail: qarshidu@umail.uz). Karshi State University building 2, room 127.

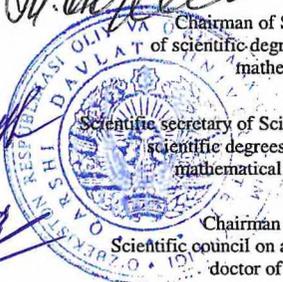
The doctoral dissertation is possible to review in Information-resource centre at Karshi State University (is registered № 145) (Address: 180103, 17, Kuchabag Street, Karshi. Tel.: (0 375) 225-34-13; fax: (0375) 221-00-56; e-mail: qarshidu@umail.uz).

The Abstract of the dissertation sent out on "30" 12 2022.
(Mailing report № 3 on "30" 12 2022).


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


G.Kh. Allayarova
Scientific secretary of Scientific council on award of scientific degrees, candidate of physical and mathematical sciences, senior researcher


A.K. Tashatov
Chairman of scientific seminar under Scientific council on award of scientific degrees, doctor of physical and mathematical sciences, professor



INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The purpose of the work is to study the laws of formation of thin silicide films of cobalt and manganese in the methods of epitaxy and ion implantation on the silicon surface and to study their electronic structure, emission, optical and electrophysical properties.

The objects of study were Si (111) p and n single crystals, CoSi_2 and Mn_4Si_7 films.

The scientific novelty of the research is as follows:

production of homogeneous nanofilms of Co and CoSi_2 formed by the method of surface bombardment with Ar^+ ions produced with low energy ($E_0=0.5-1$ keV) and dose ($D \approx 8 \cdot 10^{14}$ cm^{-2}) and the corrected zone of Co nanophases is $0.3 E_g$. it is determined that it is equal to the semiconductor property;

it was determined that when monocrystalline silicon substrate is implanted with Co^+ ions heated at 600 K, the depth of the same doped layer is $50 \div 60$ Å, the layer near the surface is partially disordered, and Si and Co atoms form a chemical bond of ~ 90 at.%;

polycrystalline $\text{CoSi}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ (111) nanofilm at different wavelengths by heating at 900 K with the formation of $\text{CoSi}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ (111) nanofilm on the SiO_2/Si (111) surface in the VUP-5 device by solid-state laser sputtering light reflection and absorption coefficients are found to be different;

by growing thin Cs atoms with a thickness of $\theta \leq 1$ on the CoSi_2/Si (111) surface, it was found that the value of E_g and the position of the state maxima of the valence electron density practically do not change, and the output work of photoelectrons decreases to 3 eV, and the quantum output of photoelectrons increases by 3 or more times.

Implementation of the research results. Based on the study of the formation of Co and Mn films and silicide structures on the surface of single-crystal silicon, the results of their electronic and optical properties, electrophysical properties, as well as the resulting heterostructures were obtained:

production of homogeneous nanofilms of Co and CoSi_2 formed by the method of surface bombardment with Ar^+ ions produced with low energy ($E_0=0.5-1$ keV) and dose ($D \approx 8 \cdot 10^{14}$ cm^{-2}) and the forbidden zone of Co nanophases is $0.3 E_g$. From the conclusions regarding the determination of the property of equal and semi-conductor properties, fundamental data and light-based controls entitled F-OT-2021-422 number "Temperature, deformation and illumination of nano-sized semiconductor parameters in a strong electromagnetic field" carried out at the Namangan Institute of Engineering Construction data and the place of illumination 2 year information source No. 2. Data sheet No. 06/10-09/753). that the reflection and absorption coefficients of long wavelength light are different, Mn atoms on the surface of Si at different temperatures and heating at different temperatures 4s-Si electron 3-Si and electron 3+3d-Mn, 3s-Si+4s-Mn interconnections are formed ability to determine the valence electron density of Co and Mn thin silicide films on the Si surface;

polycrystalline $\text{CoSi}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ (111) nanofilm at different wavelengths by heating at 900 K with the formation of $\text{CoSi}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ (111) nanofilm on the SiO_2/Si (111) surface in the VUP-5 device by solid-state laser sputtering the results of the determination that the coefficients of light reflection and absorption are different were used in the implementation of the project named “Development of technology for deposition of multicomponent thin-film coatings using laser radiation” carried out at the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan under the number GNPT AF-Atex-2018 (15-274) (Vice- reference No. 2/1255-2203 of the president). As a result, it was possible to create a technology for forming heat-sensitive coatings by dusting targets with a complex composition in a vacuum functional device.

The structure and scope of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion and a list of references. The text of the dissertation is presented on 115 pages of text, including 55 figures and 6 tables.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть, part I)

1. Т.С.Камилов, А.С.Рысбаев, В.В.Клечковская, А.С.Орехов, И.Х.Турапов. Влияние структурных дефектов в кремнии на формирование фоточувствительных гетероструктур $Mn_4Si_7-Si<Mn>-Mn_4Si_7$ и $Mn_4Si_7-Si<Mn>-M$ // Uzbek Journal of Physics. Vol.21 (№1) 2019. – Pp. 22-28. (01.00.00. №5)
2. В.В.Клечковская, А.С.Рысбаев, Т.С.Камилов, И.Р.Бекпулатов, И.Х.Турапов. Формирование тонких пленок Mn_4Si_7 на различных подложках методом магнетронного распыления и импульсного лазерного осаждения // Uzbek Journal of Physics, 2021. Vol. 22. No.3. – Pp. 43-48. (01.00.00. №5)
3. И.Х.Турапов, И.Р.Бекпулатов, А.К.Ташатов, Б.Е.Умирзаков. Влияние предварительной ионной бомбардировки на формирование нанопленок Co и $CoSi_2$ на поверхности Si при твердофазном осаждении // Письма в ЖТФ, 2022, том 48, вып. 5. с. 27-29. (Импакт-фактор РИНЦ: 0,769)
4. В.Е.Umirzakov, I.R.Bekpulatov, I.Kh.Turapov, B.D.Igamov. Effect of Deposition of Submonolayer Cs Coatings on the Density of Electronic States and Energy Band Parameters of $CoSi_2/Si(111)$ // JOURNAL OF NANO- AND ELECTRONIC PHYSICS Vol. 14 No 2, 02026 (4pp) (2022). (Scopus: IF=0,474)
5. Б.Е.Умирзаков, И.Р.Бекпулатов, И.Х.Турапов, Б.Д.Игамов. Влияние напыления атомов Cs электронную структуру $CoSi_2/Si(111)$. // Ўзбекистон миллий университети хабарлари, 2022, [3/1/1]. – С. 472-474. (01.00.00. ОАК Раёсатининг 2021 йил 31 мартдаги 295/6-сон қарори)
6. Б.Е.Умирзаков, И.Р.Бекпулатов, Б.Д.Игамов, И.Х.Турапов, А.З.Фаттахов. Получение пленок $CoSi_2/SiO_2/Si(111)$ методом лазерного напыления и их электрофизические свойства // Uzbek Journal of Physics, Vol. 24, No. 2. – Pp. 150-155, 2022. (01.00.00. №5)

II бўлим (II часть, part II)

7. А.С.Рысбаев, М.Т.Нормурадов, И.Р.Бекпулатов, И.Х.Турапов, С.У.Иргашев, Б.Д.Игамов. Формирование пленки Mn_4Si_7 на диэлектрической подложке методом локального лазерного переноса и отжига // XXV Международная конференция Взаимодействие ионов с поверхностью «ВИП-2021». – М.: Россия, 2021. Том 3. – С. 111-114.
8. Т.С.Камилов, И.Р.Бекпулатов, И.Х.Турапов, С.Т.Абраева. Формирование тонких пленок Mn_4Si_7 на различных подложках методом магнетронного распыления и импульсного лазерного осаждения // Восьмая международная конференция по физической электронике IPES-8. – Ташкент, 2021. – С. 196-197.
9. И.Х.Турапов, Б.Е.Умирзаков, И.Р.Бекпулатов. Влияние предварительной ионной бомбардировки на формирование нанопленок Co и $CoSi_2$ на поверхности Si при твердофазном осаждении // “Яримўтказгичлар физикаси, микро- ва наноэлектрониканинг фундаментал ва амалий муаммолари” I Халқаро анжуман. – Тошкент, 2021. – С. 80-82.

10. И.Х.Турапов, Б.Е.Умирзаков, И.Р.Бекпулатов, Р.Ф.Файзуллаев. Влияние предварительной ионной бомбардировки на формирование нанопленок Co и CoSi_2 на поверхности кремния // Fotoenergetikada nanostrukturali yarimo'tkazgich materiallar II Xalqaro ilmiy anjumani. 2021 yil. – С. 120-123.

11. А.А.Симонов, А.И.Камардин, Б.Д.Игамов, И.Х.Турапов. Лазерное распыление материалов и формирование функциональных покрытий на диэлектриках // 14-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом». 21-24 сентября 2021 г., Минск, Беларусь.

12. Б.Д.Игамов, Ж.Б.Хужаниёзов, И.Х.Турапов, С.У.Иргашев, З.Р.Саидахмедова. Формирование пленки Mn_4Si_7 на диэлектрической подложке методом лазерного осаждения // Яримўтказгичлар физикаси, микро ва наноэлектроника: фан, таълим ва ишлаб чиқариш интеграцияси истиқболлари, Республика илмий анжуман материаллари, 2021 йил, 21-22 май. – С. 44-46.

13. Б.Е.Умирзаков, И.Р.Бекпулатов, И.Х.Турапов. Формирование нанопленок со и CoSi_2 на поверхности si при твердофазном осаждении // Яримўтказгичлар ва полимерлар физикасининг долзарб муаммолари, Республика илмий-амалий анжумани, 2022 йил, 1 февраль. – Тошкент, 2022. – С. 151-156.

14. Б.Д.Игамов, А.И.Камардин, Т.С.Камилов, И.Х.Турапов. Оценка толщины вакуумных металлических и полупроводниковых покрытий // Яримўтказгичлар ва полимерлар физикасининг долзарб муаммолари, Республика илмий-амалий анжумани, 2022 йил, 1 февраль. – Тошкент, 2022. – С. 116-118.

15. В.Е.Umirzakov, I.R.Bekpulatov, I.Kh.Turapov, D.M.Shukurova, Kh.A.Abdixalilov, B.J.Uta, A.Z.Fattakhov. Effect OF Cs coating deposition on the density of electronic states of $\text{CoSi}_2/\text{Si}(111)$ // “Инновацион техника ва технологияларнинг қишлоқ хўжалиги – озиқ-овқат тармоғидаги муаммо ва истиқболлари” мавзусидаги II Халқаро илмий ва илмий-техник анжумани / 2022, 22-23 апрель. – Тошкент, 2022. – Б. 347-349.

16. T.S.Kamilov, B.D.Igamov, I.R.Bekpulatov, I.Kh.Turapov, Z.R.Saidakhmedova, B.J.Uta. Obtaining films of Mn_4Si_7 with high thermoelectric properties obtained by the method of magnetron sputtering // “Инновацион техника ва технологияларнинг қишлоқ хўжалиги – озиқ-овқат тармоғидаги муаммо ва истиқболлари” мавзусидаги II Халқаро илмий ва илмий-техник анжумани / 2022, 22-23 апрель. – Тошкент, 2022. – Б. 355-356.

17. T.S.Kamilov, I.R.Bekpulatov, I.Kh.Turapov, R.F.Fayzullaev A.Z.Fattakhov, Kh.A.Abdixalilov. Obtaining films of higher manganese silicide with high thermoelectric properties // Проблемы фотоники и перспективы развития, Материалы Республиканской научно-практической конференции, 27-28 май. – Урганч, 2022. – С. 272-274.

18. Б.Д.Игамов, А.И.Камардин, И.Х.Турапов, Д.М.Шукурова, Д.С.Шомухаммедова, С.У.Иргашев. Исследование структурного и элементного состава пленки по глубине // Проблемы фотоники и перспективы развития, Материалы Республиканской научно-практической конференции. 2022, 27-28 май. – Урганч, 2022. – С. 275-277.

Автореферат Қарши давлат университетининг “ҚарДУ хабарлари” илмий-назарий,
услубий журнали таҳририясида таҳрирдан ўтказилди (22.12.2022 йил).

Гувоҳнома № 14-061
23.12.2022. Босишга рухсат этилди.
Офсет босма қоғози. Қоғоз бичими 60x84 1/16.
“Times” гарнитураси. Офсет босма усули.
Ҳисоб-нашриёт т. 3.2. шартли б.т. 3,7.
Адади 60 нусха. Буюртма № 120.

Қарши давлат университети
Кичик босмахонасида чоп этилди.