

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҚОШИДАГИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

ЙЎЛЧИЕВ ШАҲРИЁР ХУСАНОВИЧ

**ЛЕГИРЛАНГАН КРЕМНИЙ АСОСИДАГИ КЎП ҚАТЛАМЛИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛИ ТУЗИЛМАЛАРДАГИ ФИЗИКАВИЙ
ЖАРАЁНЛАР**

01.04.10 - Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2020

Докторлик (DSc) диссертацияси автореферати мундарижаси

Оглавление автореферата докторской (DSc) диссертации

Contents of the Doctoral (DSc) Dissertation Abstract

Йўлчиев Шахриёр Хусанович

Легирланган кремний асосидаги кўп қатламли яримўтказгичли тузилмалардаги физикавий жараёнлар 3

Йулчиев Шахриёр Хусанович

Физические процессы в многослойных полупроводниковых структурах на основе легированного кремния..... 27

Yulchiev Shakhiyor Khusanovich

Physical processes in the multilayer semiconductor structures based on doped silicon..... 51

Эълон қилинган илмий ишлар рўйхати

Список опубликованных научных работ
List of published research works 56

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҚОШИДАГИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.03/30.12.2019. FM/T.01.12 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

ЙЎЛЧИЕВ ШАҲРИЁР ХУСАНОВИЧ

**ЛЕГИРЛАНГАН КРЕМНИЙ АСОСИДАГИ КЎП ҚАТЛАМЛИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛИ ТУЗИЛМАЛАРДАГИ ФИЗИКАВИЙ
ЖАРАЁНЛАР**

01.04.10 - Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2020

Фан доктори (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси хузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2020.2.DSc/FM158 рақам билан рўйхатга олинган

Докторлик диссертацияси Андижон давлат университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (Ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида (www.ispm.uz) ва «ZiyoNet» Ахборот-таълим порталида (www.ziyounet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи	Далиев Хожакбар Султанович физика-математика фанлари доктори, профессор
Расмий оппонентлар	Зикриллаев Нурулло Фатхуллаевич физика-математика фанлари доктори, профессор
	Рахматов Ахмад Зайниддинович техника фанлари доктори, профессор
	Отажонов Салимжон Мадрахимович физика-математика фанлари доктори, профессор
Етакчи ташкилот	Қорақалпоқ давлат университети

Диссертация ҳимояси Ўзбекистон Миллий университети қошидаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти хузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 рақамли Илмий кенгашнинг 2020 йил «31» 10 соат 16⁰⁰ даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 100057, Ўзбекистон, Тошкент шаҳри, Янги Олмазор кўчаси, 20-уй. Тел. (99871) 248-79-94, факс: (99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz, ЎЗМУ қошидаги ЯФМ ИТИ мажлислар зали).

Диссертация билан Ахборот технологияларини жорий этиш бўлимида танишиш мумкин (18 рақам билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100057, Ўзбекистон, Тошкент шаҳри, Янги Олмазор кўчаси, 20-уй. Тел. (99871) 248-79-59. e-mail: info@ispm.uz).

Диссертация автореферати 2020 йил «20» 10 кунни тарқатилди.

(2020 йил «20» 10 даги 18 рақамли реестр баённомаси)



Ш.Б. Утамурадова
Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш раиси, ф.-м.ф. д., профессор

Ж.Ж. Хамдамов
Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш илмий котиби, (PhD)

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

КИРИШ (фан доктори (DSc) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Бугунги кунда яримўтказгич материалшунослиги ва электрон асбобсозлик соҳасида жаҳон миқёсидаги илмий тадқиқотлар ғоят катта суръатлар билан ривожланмоқда. Бунинг сабаби, барчага аёнки, яримўтказгичли қурилмаларнинг микро ва наноэлектроникада жадал қўлланилиши уларнинг турлари ва функционал имкониятларини янада кенгайтиришга бўлган талабларнинг ортиши дейиш мумкин. Замонавий микроэлектрониканинг асосини ташкил этувчи кремний асосида тайёрланган металл-диэлектрик-яримўтказгич (МДЯ) тузилмалар, юпқа пардали кўп қатламли ва металл-оксид қатламларидан иборат гетеротузилмалари халқ хўжалигининг турли соҳаларида маиший асбоб-анжомлардан тортиб, ҳарбий техника, космонавтика, алоқа тизимлари ва бошқаларда асосий элементлар бўлиб қолмоқда. Бундай қурилмаларнинг сифати ва ишончлилигини кафолатловчи асосий физик жараёнлар – уларни ташкил қилувчи қатламлар чегерасида, улар сиртида мавжуд бўлган сиртий ҳолатлар табиати ва уларнинг ҳар хил ташқи таъсирлар туфайли ўзгаришлари эканлиги инкор этиб бўлмайдиган омилдир. Бундай ҳолатлар МДЯ-тузилмаларда яримўтказгич-диэлектрик, юпқа яримўтказгичларли кўп қатламли қурилмаларда асос Si ва уларни ташкил этган қатламлар орасидаги соҳаларда, кремний-металлооксид турдаги гетероўтишларда бўлиниш чегарасида зарядларнинг кўчиш жараёнларини ўрганиш муҳим вазифалардан биридир. Маълумки, МДЯ-тузилмаларининг асосий хусусиятлари сиртий ҳолатлардан ташқари Si, диэлектрик қатламларининг ўз хоссаларига ҳам кўп жиҳатдан боғлиқ. SiO₂ диэлектрик қатламни ҳосил қилиш технологиялари Si асосининг ҳажмий хусусиятлари улардан алоҳида тайёрланган транзисторлар, интеграл схемалар ва бошқа микроэлектрон асбобларни ишлаш тамойилларига сезиларли таъсир этиши аниқланган. Аммо бундай тузилмаларнинг параметрларини аввалдан аниқ белгиланган қийматларда ҳосил қилиш технологияларини яратиш ҳалигача муаммо бўлиб келмоқда.

Жаҳоннинг етакчи илмий марказларида мураккаб таркибли кўп қатламли яримўтказгичли A²B⁶, A³B⁵ турдаги икки ва ундан ортиқ юпқа пардаларни, Ge, Si, GaAs ва бошқа монокристалларга ўстирилиб, олинган гетероструктураларни олиш технологияларининг ва уларнинг хусусиятларини ўрганиш бўйича кўплаб тадқиқотлар ўтказилмоқда. Бундай кўпқатламли тузилмаларнинг бўлиниш чегараларида одатдаги нуқтавий сирт ҳолатларидан ташқари квант ўлчамли наночўққилар, наночуқурликлар ва бошқа ҳали ўрганилмаган ҳолатлар ҳосил бўлиши аниқланган. Аммо бундай ҳолатларнинг юзага келиш шароитлари, уларнинг табиати, таркиби ҳамда уларнинг бу тузилмаларда заряд ташувчиларнинг ҳаракатларига таъсирлари ҳалигача аниқланмаган. Шунга қарамасдан, бундай кўпқатламли тузилмаларнинг таркибий қисмлари, қатламларнинг қалинлиги ва миқдорининг олиниш технологияларини оптималлаштириш орқали ноёб хусусиятли электрон қурилмалар, юқори самарадорли куёш элементлари ва лазер қурилмалари яратиш имкониятлари мавжуд. Шунингдек, яна бир муҳим йўналиш бу ZnO,

SnO₂ каби металлооксидларини олиш технологияларини такомиллаштириш, шу асосда ёруғликнинг ютилиш спектрини бинафша ва ултрабинафша нурланишлар томонга кенгайтириш, яъни қуёш энергиясини электр энергиясига айлантириш самарадорлигини орттириш маталлооксидлар таркибини ўзгартириш ва уларга киришма элементлар атомларини киритиш орқали уларнинг ҳар хил, алоҳида газларга сезгирлигини орттириш имконлари мавжудлиги ва бу хусусиятлардан ҳарбий эҳтиёжлар, тиббий, қишлоқ хўжалиги ва маиший асбоб-ускуналарни ишлаб чиқаришда фойдаланиш мумкинлиги башорат қилинмоқда.

Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида кўзда тутилган “Иқтисодиётнинг энергия ва ресурс ҳажмининг қисқартирилиши, ишлаб чиқаришга энергия тежовчи технологияларни кенг татбиқ қилиш, муқобил энергия манбаларини қўллашни кенгайтириш, иқтисодиёт соҳаларида меҳнат самарадорлигини ошириш” вазифасига металлооксиднинг золь-гель технологиялар ёрдамида олиниш усулларининг соддаллиги, материаллар ва энергия тежамкорлиги, яримўтказгичли микроэлектроникада қўлланиши қулай бўлгани туфайли муҳим ҳисобланади.

Юқоридагилардан келиб чиққан ҳолда, ушбу диссертация иши Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2019 йил 30 майдаги ПФ-4348-сон “Электротехника саноатини янада ривожлантириш учун қулай шарт-шароитлар яратиш ва тармоқнинг инвестициявий ҳамда экспорт салоҳиятини ошириш бўйича қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида”ги, 2018 йил 14 июлдаги ПФ-3855-сон “Илмий ва илмий-техникавий фаолият натижаларини тижоратлаштириш самарадорлигини ошириш бўйича қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида”ги, 2017 йил 26 майда ПФ-3012-сон “2017-2021 йилларда қайта тикланувчи энергетикани янада ривожлантириш, иқтисодиёт тармоқлари ва ижтимоий соҳада энергия самарадорлигини ошириш чора-тадбирлари дастури тўғрисида”ги фармонлари ва бошқа бу соҳада қабул қилинган норматив-ҳуқуқий ҳужжатларда қўйилган вазифаларни ечишга хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Ушбу диссертация иши Ўзбекистон Республикаси фан ва технологияларни ривожланишининг III ва IV: “Энергетика, энергоресурс тежамкорлиги, транспорт, машина ва асбобсозлик, замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника ва электрон асбобсозлигини ривожланиши” ва “Қайта тикланадиган энергия манбаларидан фойдаланиш усулларини ишлаб чиқиш, нанотехнология, фотоника ва бошқа замонавий технологиялар асосида янги технологиялар ва қурилмалар ишлаб чиқиш” устувор йўналишлари доирасида бажарилди.

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи.¹ Кремний асосида нанообъектлари бўлган кўп қатламли гетерострук-туралар

¹Диссертация мавзуси бўйича халқаро тадқиқотларнинг шарҳи: Masayuki Tachi et.al. Atomic configuration of boron pile-up at the Si/SiO₂ interface. IEICE Electronics Express. 2004 Vol.1. Issue 6. pp. 126-130.

олиш, нанокристаллитлар (квант нуқталар ва чуқурлар)нинг блоклар бўлиниш чегараларида ҳосил бўлиши ва уларнинг физик хоссалари жаҳоннинг кўплаб етакчи илмий марказлари ва Олий ўқув юртларида тадқиқот этилмоқда. Жумладан: Яримўтказгичлар технологиялари институти (Германия), А.Ф. Иоффе номидаги Физика-техника институти (С.Петербург, РФА), Қаттиқ жисмлар физикаси институти (РФА), Технологиялар институти (Массачусет, АҚШ), Токио технологиялар институти (Япония), Яримўтказгичлар физикаси (Киев, Украина) ва Электрон технологияси институтлари (Москва области, РФА), Калифорния университети (АҚШ), металлооксидларни золь-гель технологиялари асосида спрей-пиролиз, чўктириш, сиртига суртиш усуллари билан олиш, уларнинг структуравий хоссаларини аниқлаш, улар асосида ҳар хил сезгир электрон асбоблар тайёрлаш масалалари билан Воронеж давлат техника университети (РФ), Токио технология институти (Япония), Яримўтказгичлар тадқиқоти институти (Испания) ва бошқа илмий жамоалар шуғулланади.

МДЯ-қурилмаларни олиш, уларнинг ўрганиш усулларини яратиш ҳамда электрофизик хоссаларини ўрганиш (А.Ф. Иоффе номидаги Физика-техника институти, РФА), бу тузилмалар асосида янги кўп элементли интеграл схемалар олиш ва уларни амалиётга қўллаш масалалари билан “Электрон” ИИЧБ (Санкт-Петербург), Беларусь давлат университети илмий жамоалари шуғулланади.

Ҳозирда жаҳон илмий марказларида икки ва ундан ортиқ, яримўтказгичли юпқа пардали мураккаб таркибли гетероструктуралар асосида кўп қувватли мосланувчи лазерлар, интеграл схемаларнинг бирлик юзадаги элементлар сонини кўпайтириш, уларнинг ўзаро уланиш даражасини орттириш, ташқи таъсирлар, жумладан, ёруғликни ютиш спектрларини кенгайтириш, юқори даражадаги газ, ҳарорат, босимларга сезгир электрон қурилмалар яратиш, ноёб хусусиятли, кенг имкониятларга эга бўлган янги яримўтказгичли моддалар яратиш, амалдаги мавжуд моддалар хусусиятларини бошқаришнинг технологик усулларини қидириш бўйича тадқиқотлар олиб борилмоқда.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Микроэлектрониканинг бугунги кундаги юксак ютуқларига металл-диэлектрик-яримўтказгич (МДЯ) тузилмаларининг Si-SiO₂ ўтиш чегараларидаги электрофизик жараёнлар сабабчи эканлиги эътироф этилса ҳам, С.Т. Саҳ, А.С.Крове ва С.М.Зи ларнинг (АҚШ) фикрича, ҳали бу ҳодисалар тўлиқ тадқиқ этилмаган. Бунга сабаб, термик оксидлаш усулида олинган МДЯ-тузилмаларда термик нуқсонларнинг ҳосил бўлиши, бўлиниш чегарасини аниқ моделлаштириш-нинг мураккаблиги, диэлектрик қатлам SiO₂ да бошқариб бўлмайдиган, жойлашиб қолган ва ҳаракатчан зарядларнинг мавжудлиги бўлса, япониялик М.Тачи, Н.Сугияма ва бошқалар технологик жараёнларни такомиллаштиришдаги муаммоларни, россиялик А.С.Берман, А.А.Лебедев ҳамда ўзбекистонлик академик С.З.Зайнабидинов, С.И. Власов бундай қурилмалар параметрларини аниқлашнинг назарий мукамал эмаслигини асослаб, бу масалаларда ҳали

ечилмаган муаммолар мавжудлигини таъкидлаганлар.

Кремний асосидаги юпка яримўтказгичли диэлектрик ва металл пардаларни олиш технологияларини, ҳосил бўлган икки ва кўп қатламли гетеротузилмалар хусусиятларини ўрганиш ва уларни амалиётда қўллаш бўйича россиялик академиклар К.А.Валиев, Ж.И.Алфёров, германиялик Х.Россел, ўзбекистонлик академиклар М.С.Саидов, Р.А.Мўминов ва бошқаларнинг тадқиқотлари туфайли гетеротузилмалар асосида лазерлар, қуёш элементлари ва бошқа электрон ва оптоэлектрон қурилмалар яратилди. Илмий ва амалий изланишлар шуни кўрсатдики, янги таркибли тузилмалар олиш технологияларини такомиллаштириш, уларнинг физик хусусиятларини чуқур ўрганиш орқали XXI асрни гетеротузилмалар асрига айлантириш мумкин (Ж.И. Алфёров).

Олиниш технологияларининг соддалиги ва қулайлиги билан металлоксид моддалар кўплаб олимларни қизиқтирмоқда. Жумладан, япониялик олимлар Юши Шичи, Сатоши Таниматолар кремнийга TiO_2 , ZrO_2 ва ZnO ларни ўстириб, ташқи ҳарорат, ёруғликка сезгир гетероўтишли қурилмалар ясадилар. Россиялик С.И. Рембеза бошчилигида бир гуруҳ изланувчилар кремний асосида металлоксидли гетероўтишлар олиш технологияларининг бир неча усулларини ишлаб чиқдилар. Уларнинг тузилмавий таркиби ва олиниш технологияларини такомиллаштириш орқали юқори сезгирли сенсорлар, қайд қилгичлар ва қуёш элементларини яратиш мумкинлигини кўрсатдилар. Шу билан бирга, бундай ихчам, қулай асбоблар металлоксиднинг таркибини ўзгартириб, олиниш технологияларини такомиллаштириш орқали турли мақсадлар учун ноёб хоссали электрон қурилмалар яратиш имкониятлари борлигини қайд этдилар.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқотлари Андижон давлат университетининг ОТМ-Ф2-002 “Ташқи (термик, оптик ва радиацион) таъсирлар туфайли рағбатлантирилган поликристалл, аморф ва нанокристалли кремний тузилмаларидаги номувозанатий заряд ташиш жараёнлари” (2008-2012 йиллар) ва ОТМ-2-68 “Кристалларда киришма-нуксонли микро ва нанобирикмаларни ҳосил бўлиш механизмлари ва уларни кенг қамровли функционал имкониятларга эга бўлган кўпқатламли тузилмалар олишдаги роли” (2017-2020 йиллар) мавзусидаги лойиҳалар доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади кремний асосида металл-диэлектрик-яримўтказгич тузилмалар, кремний асосидаги кўптаркибли юпка яримўтказгичли ва металлоксидли кўпқатламли пардаларнинг электрофизик, фотоэлектрик ва структуравий хусусиятларни тадқиқ этиш, ҳамда уларни олишнинг оптимал шароитлари ва амалиётда қўлланиш имкониятларини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари: кремнийни киришма атомлари билан легирлашнинг $Si-SiO_2$ бўлиниш чегарасидаги сиртий ҳолатлар зичлигига таъсирини ўрганиш;

нам хлорли ва хлорсиз термик оксидлаш усулида олинган диэлектрик қатламга тезлаштирилган электрон ва γ -нурланишлар таъсирини аниқлаш;

МДЯ-тузилмаларга термик, электрон ва γ -нурланишлар билан ишлов бериш ва шу асосда тайёрланадиган электрон қурилмалар характеристикаларини яхшилаш шароитларини аниқлаш;

квант нуқталарга эга бўлган $(\text{SiGe})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ қаттиқ қоришмани суюқ фазали эпитаксия усулида олиш имкониятларини аниқлаш;

$\text{SiGe}_{1-x}\text{GaAs}_x$ турдаги қаттиқ эритма сиртида цинк селениди нанокристалларининг nanoоролчалар шаклида ҳосил бўлиш механизмлари ва уларнинг кимёвий таркибини аниқлаш;

кўп қатламли гетеротузилмаларнинг олиниш технологиялари, уларнинг тузилмавий, электрофизик ва фотоэлектрик хусусиятларини ўрганиш;

кремний асосида олинган ZnO , SnO_2 юпқа пардаларнинг структуравий тузилиши ва уларда ҳосил бўлган ZnO нанокристаллитлари ўлчами ва кимёвий таркибини аниқлаш;

кремнийда ўстирилган ZnO ва SnO_2 юпқа пардаларини қуёш энергетикаси ва оптоэлектроникада инфрақизил, кўринувчи ва ультрабинафша нурларга сезгир элементлар сифатида шаффоф ва эгилувчан электроника қурилмаларида фойдаланиш мумкинлигини кўрсатиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида кремний монокристалли асосида олинган МДЯ-тузилмалари, кўп таркибли ва кўпқатламли яримўтказгичли гетеротузилмалар ҳамда ZnO ва SnO_2 турдаги металлооксид юпқа пардалари олинган.

Тадқиқотнинг предмети кремний асосидаги яримўтказгич-диэлектрик, эпитаксиал ва металлооксидли қатламларнинг бўлиниш чегарасидаги номувозанатий зарядли ҳолатларнинг табиати, уларнинг ҳосил бўлиш механизмлари ҳамда бундай тузилмаларнинг хусусиятларига ёруғлик, ҳарорат ва нурланишларнинг таъсири ташкил этади.

Тадқиқотнинг усуллари. Қўйилган вазифалардан келиб чиққан ҳолда кремний асосида гетеротузилмалар олиш учун юқори ҳароратли диффузия, суюқ фазали эпитаксия ва золь-гель усулларидан; тузилмавий тадқиқотларда рентгенодифрактометр усулидан; морфологик тадқиқотларда атомий куч микроскопидан; вольт-фарада ва вольт-ампер тавсифларини текширишда ўлчаш қурилмалари мажмуасидан ва спектрал тавсифини аниқлашда оптик спектроскопия усулидан; солиштирма қаршиликни текширишда тўрт зондли усулдан фойдаланилди.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

кремнийни Rh ва Ir киришма атомлари билан легирлаш Si-SiO₂ бўлиниш чегарасида сиртий ҳолатлар зичлиги ва уларнинг энергия бўйича тақсимооти қонуниятларининг атомлар ионланиш энергияларига мос ҳолда ўзгаришга олиб келиши аниқланган;

нам ва қуруқ хлорли муҳитда термик оксидлаш усулида ўстирилган SiO₂ – диэлектрик қатлами 10⁶ рад дозада γ – нурлар билан нурлантирилиб, 80-270

К ҳарорат ва 30-150 кГц частоталарда ўрганилганда, улар спектрида 0,11 ва 0,26 эВ ҳолатларда янги релаксацион чўққилар пайдо бўлиши аниқланган;

МДЯ-тузилмаларга термик, электрон ва γ -нурланишлар билан ишлов бериб, Si-SiO₂ бўлиниш чегарасининг сиртий ҳолатлар зичликларини, диэлектрик қатламдаги ҳаракатчан зарядларни бошқариш орқали электрон қурилмалар характеристикаларини яхшилаш имкониятлари кўрсатилган;

илк бор (SiGe)_{1-x}(GaAs)_x қаттиқ қоришмаси субкристаллитлари бўлиниш чегараларида ҳамда сиртида ZnSe нанооролчалари (квант нуқталар) суюқ фазали эпитаксия усулида олинган:

(SiGe)_{1-x-y}(GaAs)_x(ZnSe)_y қаттиқ қоришма сиртида ва ҳажмида характерли GaAs нанокристаллитлари ҳамда ZnSe квант нуқталарининг ҳосил бўлиш механизмлари, зичлиги, шакли ва геометрик ўлчами технологик меъёрлари (ўсиш температураси оралиғи, совутиш тезлиги)га боғлиқлиги аниқланган;

GaAs, Ge, ZnSe компоненталари ионланиш энергияларининг тафовути туфайли n-Si-p-(SiGe)_{1-x-y}(GaAs)_x(ZnSe)_y гетеротузилма танловчи фотосезгирликка эга бўлган қуёш элементлари олиш мумкинлиги аниқланган;

Кремний асосида олинган ZnO металлооксид юпқа пардалари кристалл панжараси қийматлари $a=0,3265$ нм ва $c=0,5212$ нм гексоганал сингония ва вюрцит тузилишли, блоклари ўлчами 67 нм бўлган, сирти (001) кристаллографик ориентацияга эга бўлган монокристалл эканлиги, шунингдек, сиртида ёнбош геометрик ўлчами $L_{ZnO}=84$ нм бўлган ZnO нанокристаллитлари борлиги аниқланган;

ZnO ва SnO₂ металлооксидли юпқа қатламлар қуёш энергетикаси ва оптоэлектроникада инфрақизил, кўринувчи ва ультрабинафша нурларга сезгир элементлар сифатида қуёш энергиясини электр энергиясига айлантирувчи қурилмаларда қўлланилиши мумкинлиги аниқланган;

SnO₂ юпқа қатламларини Ag билан легирлаш газларнинг қайд қилувчи сезгирлигини ошириб, металлооксид хусусиятларини яхшилаб ва уларни зарарли ва портловчи газларни аниқловчи индикаторларда ишлатиш имкони борлиги кўрсатилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

Кремний асосида олинган МДЯ қурилмаларни диэлектрик-яримўтказгич бўлиниш чегарасидаги сиртий ҳолатлар ва нуқсонлар зичлигини бошқаришнинг аниқланган шароитлари МДЯ транзисторлар, интеграл схемалар ишлаб чиқаришда қўллаш тавсия этилган.

Квант нуқталари, чўққилари ва чуқурлари ҳосил бўлган (SiGe)_{1-x-y}(GaAs)_x(ZnSe)_y турдаги қаттиқ эритмалардан фотофаол материал сифатида ИҚ ва кўринувчи нурлар спектри соҳасида ишловчи селектив фотоқабулқилгичлар ишлаб чиқаришда фойдаланиш имконияти асосланган.

Металлооксидлар юпқа қатламларининг олиниш технологияларини такомиллаштириш, таркибини бошқариш ва киришма атомлари билан легирлаш орқали турли хил газларни қайд қилгич сенсорларни яратиш ва уларни шаффоф ва эгилувчан электрон қурилмалар сифатида ишлатиш тавсия этилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Олинган натижаларнинг юқори аниқликка эга бўлган, жаҳон амалиётида фаол қўлланилувчи электр ва фотосезгир асбоблар, ИҚ ва рентгеноспектрометрлар, атом куч микроскоп, синалган технологиялар асосида олинган моддалардан фойдаланилганлиги билан асосланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Натижаларнинг илмий аҳамияти кўп қатламли гетероструктураларда заряд ташиш механизмларининг аниқланганлиги, бу қурилмалардаги электрофизик ва фотоэлектрик жараёнлар, металлоксидларнинг селектив сезгирлиги хусусиятларининг моҳияти ҳақидаги илмий-назарий тушунчалар бу соҳадаги мавжуд тасаввурларни, уларни амалиётга қўлланиш имкониятларини аниқлаштиришга хизмат қилади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти. МДЯ-тузилмалар асосида яратилган электрон қурилмалар ва интеграл схемалар кўп қатламли гетеротузилмалар асосида олинадиган фотосезгир, самарадорлиги юқори бўлган кўп функцияли электрон асбоблар ва қуёш элементларини ишлаб чиқаришни жадаллаштиришдан иборат.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Rh ва Ir атомлари билан легирланган монокристалл кремний асосида олинган МДЯ-тузилмаларнинг Si-SiO₂ бўлиниш чегарасида сиртий ҳолатлар зичлиги ва уларнинг энергия бўйича тақсимоти қонуниятларининг атомлар ионланиш энергияларига мос ҳолда ўзгариши ҳамда кремний асосидаги металлоксид юпка пардалардан газлар, ҳарорат ва нурланишга сезгир, шаффоф ва эгилувчан хусусиятли моддалар олиш бўйича олинган натижалар Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академияси Ядро физикаси институтида бажарилган АЗ-ФА-Ф003 рақамли “Компенсирланган кремний датчиги асосида озик-овқатлар сақланадиган омбор температурасини ва намлигини узоқ масофадан назорат қилиб турадиган қурилмани яратиш” мавзусидаги лойиҳада қўлланилган (Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академиясининг 2020 йил, 27 августдаги 2/1255-1768 рақамли маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши газлар ва ҳароратга сезгир электрон қурилмаларнинг ишчи хусусиятларини яхшилаш имконини берган;

Кремний асосида SiGe/GaAs/ZnSe гетротузилмаларни олиш, уларда характерли GaAs нанокристалитлари ҳамда ZnSe квант нуқталарининг табиати ва тақсимотини бошқариш, SiGe/GaAs/ZnSe турдаги гетеротузилмаларни фотосезгирлик спектрларини ўрганиш, улар асосида инфрақизил ва кўзга кўринувчи спектрал нурлар соҳасида ишловчи фотоқабулқилгичлар яратиш бўйича олинган натижаларидан «FOTON» АЖДа ишлаб чиқариладиган яримўтказгич электрон қурилмалар тайёрлашда қўлланилган (“Узэлтехсаноат” акциядорлик компаниясининг 2020 йил 26 августдаги 04-4/1561 рақамли маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши инфрақизил ва кўзга кўринувчи спектрал нурлар соҳасида ишловчи фотоэлементларнинг ва оптоэлектрон қурилмаларнинг янги синфини яратиш имконини берган;

Кремнийни киришма атомлар билан легирлашда аниқланган оптимал технологик ва термик шароитлар, киришма атомларнинг кремний кристалл панжарасида яқка ёки бирикма таркибида жойлашиш қонуниятлари, уларнинг ўзаро ва кристалл нуқсонлари билан таъсирлашиш механизмлари ҳамда уларнинг кремний электрофизик хусусиятларига таъсирлари, легирланган кремнийга иссиқлик ва радиация таъсирлари туфайли унинг электрофизик хусусиятларини ўзгариш қонуниятлари, хусусан, киришма атомларнинг ҳарорат ва радиацияга чидамлилиги ва фотосезгирлигини орттириш механизмлари ҳақидаги илмий-амалий тавсиялардан Тошкент давлат техника университетида бажарилган Ф-2-55 рақамли “Янги функционал имкониятларга эга наноматериалларнинг янги синфи сифатидаги киришма атомлар нанокластерларини шаклланиши негизида ҳажмий структуралашган кремнийни олишнинг илмий асосларини ишлаб чиқиш” мавзусидаги лойиҳада қўлланилган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2020 йил 27 августдаги 89-03-2968 рақамли маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши кремний асосида ҳарорат ва радиацияга чидамлили, шунингдек, юқори фотосезгирликка эга бўлган намуналар олиш имконини берган;

МДЯ-қурилмаларини олиниш технологияларини оптималлаштиришни, уларни хусусиятларини тадқиқ этишни усулларини такомиллаштириш ва улардаги заряд ташувчилар хатти-ҳаракатларини назарий таҳлил этиш натижалари Наманган муҳандислик технологиялари институтида “Электроника ва микропроцессорли асбоблар” ва “Рақамли электроника” махсус ўқув курсларида фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигидан 2020 йил, 7 августда олинган 89-03-2744 рақамли маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши ўқув жараёнида талабаларнинг ноёб физик хусусиятларга эга яримўтказгичли электрон қурилмаларни яратиш ва уларнинг қўлланилиш соҳалари бўйича илмий тасаввурларини орттириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишининг асосий натижалари 6 та ҳалқаро ва 11 та республика миқёсидаги илмий ва амалий анжуманларда муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича 32 та илмий иш, шу жумладан 2 та монография, 1 та ўқув қўлланма, Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссия-сининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш учун тавсия этилган илмий журналларда 11 та мақола нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, бешта боб, хулоса, эълон қилинган ишлар рўйхати, адабиётлар рўйхати 150 та номдан иборат бўлиб, 59 та расм, 7 та жадвални ўз ичига олган ҳолда 198 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида тадқиқотнинг долзарблиги ва зарурияти асослаб берилган, тадқиқотнинг республика фан ва технологоялари ривожланишининг истиқболли йўналишлари билан боғлиқлиги аниқланган, диссертация мавзуси бўйича халқаро илмий тадқиқотлар натижалари таҳлил қилинган, муаммонинг ўрганилганлик даражаси, мақсад ва вазифалар, илмий янгиликлари ҳамда тадқиқот усуллари баён этилган, иш натижаларининг қўлланилиши ва апробацияси ҳамда диссертациянинг тузилиши бўйича қисқача маълумотлар келтирилган.

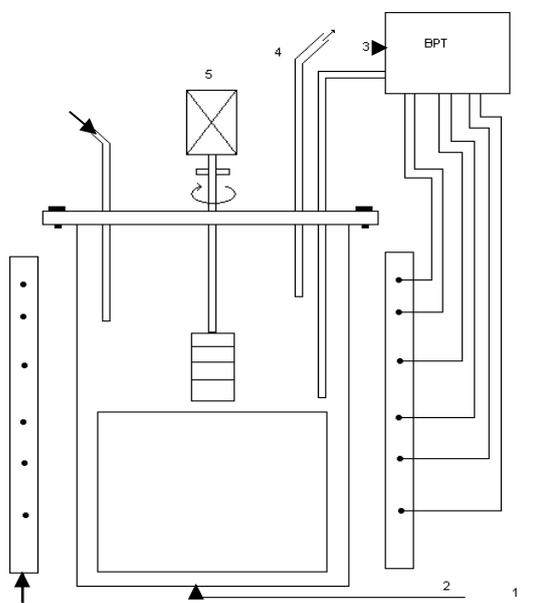
Диссертациянинг **“Кремний асосидаги кўпқатламли яримўтказгичли гетеротузилмаларни тадқиқотлар ҳолати ва келажак истиқболлар”** номли биринчи бобида Al – SiO₂ – Si турдаги тузилмани олишдаги технологик жараёнларнинг мураккаблиги, Si – SiO₂ тизим бўлиниш чегарасидаги сиртий ҳолатларнинг хилма – хиллиги ва уларга киришма атомларининг таъсирлари, SiO₂ қатламнинг тузилиши мукамаллигидан анча йироқ эканлиги, металл электроднинг материали тузилма параметрларига сезиларли қўшимчалар киритиши, ташқи муҳитларнинг тузилма хусусиятларига таъсирлари ҳали чуқур ўрганилмаганлиги ҳақида мулоҳазалар келтирилган. Кремний фосфидлар (AlP, GaP, InP), арсенидлар бирикмалари (AlAs, GaAs), олтингугурт бирикмалари (ZnS, CdS) ва ZnSe билан бир қатор ўзаро ўрин алмашинувчи узлуксиз қаттиқ қоришмаларнинг ҳосил қилиниши, шунингдек, антимонидлар (BSb ташқари), селенидлар (ZnSe бундан мустасно) ва теллурид бирикмалари билан узлуксиз қаттиқ қоришмаларни ҳосил қилмаслиги аниқланган. Кремний тақиқланган соҳаси кенглигида киришмавий ҳолатлар мавжудлиги ёки кремнийли эпитаксиал қатлам субкритсталлитлари (блоклар) бўлиниш чегараларида нанокристаллитлар шаклланиши тўғрисида назарий ва экспериментал тадқиқот натижалари ўрганилган. Металлооксидли яримўтказгичлар деформациянинг механик энергиясини электр энергиясига, электр энергиясини ёруғлик энергиясига, шунингдек, қуёш энергиясини электр энергиясига айлантириш мосламаларида муваффақиятли қўлланилади. Шунинг қилиб янги металлооксидли материалларни синтези ва улар асосида турли хил энергия конверторларини ишлаб чиқиш юқори илмий ва амалий аҳамиятга эга.

Диссертациянинг **“Легирланган кремний асосида яримўтказгичли кўп қатламли тузилмаларни олиш технологияси ва уларни тадқиқ қилиш усуллари”** деб номланган иккинчи бобида Si монокристаллари асосидаги кўпқатламли қурилмаларнинг хусусиятларини кўриб чиқилган. Керакли параметрли намуналарни олиш учун улар киришма атомлари билан юқорихароратли диффузия орқали легирланган. МДЯ-тузилмаларнинг металлооксид Si турдаги намуналарини олиш учун $\rho \sim 1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ бўлган диаметри 150 мм, қалинлиги 250÷300 мкм бўлган пластинкалар танлаб олиниб, 1000 °C да керакли қалинликдаги SiO₂ қатлам олингунча қиздирилди. Олинган намуналар сифатини аниқлаш учун уларнинг C-V-характеристикалари таҳлил қилинди. Si да киришма атомлар ҳолатини

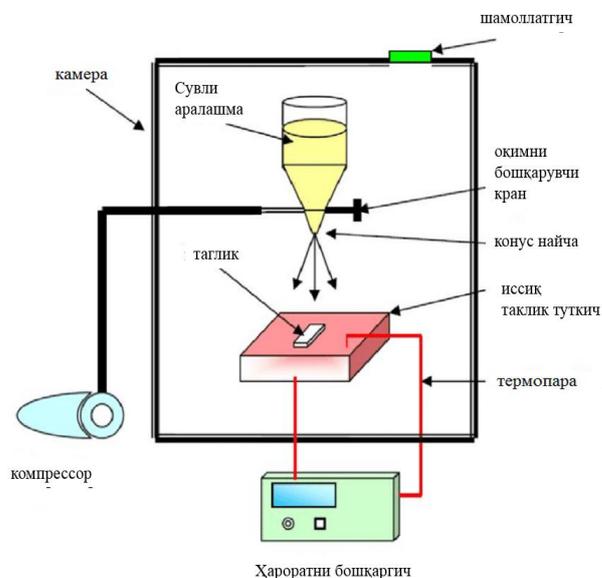
аниқлаш учун оксид қатлами олиб ташланган намуналардан Шоттки диодлари тайёрланди ёки тоза легирланган кремний пластинкаларини электрофизик ва оптик хусусиятлари ўрганилди. Таҳлиллар Si ҳажмидаги киришма атомлари ҳолатларининг МДЯ-тузилмаларнинг хусусиятларига таъсирини кўрсатди.

$(\text{SiGe})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ эпитаксиал қатламлар вертикал реакторда суюқ эпитаксия усулида висмутли эритмадан мажбурий совутиш йўли билан кремний тагликларга ўстирилди. Вертикал реакторли қурилма қуйидаги блоклардан ташкил топган: 1-иссиқлик блоки, 2-реактор, 3-бошқариш блоки, 4-газ тозалаш блоки, 5-центрифуга (1-расм). Иссиқлик блоки уч қисмдан иборат бўлиб, ҳар бири алоҳида бошқарилиши мумкин. Бошқарув блокида юқори аниқликдаги ҳарорат регулятори (P-111, И-102) мавжуд бўлиб, унинг ёрдамида аралашма ёки эритмани совутиш жараёнини олдиндан берилган дастур ёрдамида автоматик тарзда амалга ошириш мумкин. Атмосферадан реакторга назоратсиз киришмаларнинг тушиб қолмаслиги учун ўстириш жараёни водород атмосферасида амалга оширилди. Водородни тозалаш “Палладий – 2” қурилмасида бажарилди. $n\text{-Si-p-(SiGe)}_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ гетеротузилмаларни тайёрлаш ва олинган намуналарни баъзи бир физик хоссаларини текшириш учун керакли юқори аниқликдаги технологик ишланмалар ҳамда стандарт ўлчов асбобларидан фойдаланилди.

Спрей-пиролиз қурилмасининг принципиал схемаси 2-расмда келтирилган. Станат цинк плёнкасини синтез қилишда прекурсор сифатида цинк ацетати $[\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$, қалай хлориди $[\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$ танланди. Zn_2SnO_2 бирикмаларни синтезида цинк ацетати $(\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ цинк оксиди манбаи сифатида, қалай хлориди $[\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$ қалай оксиди манбаи сифатида ишлатилди. Цинк ацетати ва қалай хлориди моляр муносабати 2:1 қилиб олинди. Ҳисобланган цинк ацетати ва қалай хлориди миқдори иккита эритма ҳосил қилиш учун дистирланган сувда эритилди.



1-расм. ЭПОС туридаги суюқ фазали эпитаксия қурилмаси



2-расм. Спрей-пиролиз қурилмасининг принципиал схемаси

Тузлар гидролизининг олдини олиш учун қалай хлориди эритмасига HCl хлорид кислотаси қўшилди. Кўп қатламли плёнкаларни ўстириш режими киздирилган тагликка 1,5 минутли узлуксиз аэрозоль бериш цикллardan иборат бўлиб, таглик температурасини тўла тиклаш учун 40 секундли танаффуслардан иборат бўлди. Тагликкача масофа 85 см ни ташкил этди. Натижада таглик сиртида бир циклда 1 қатлам, ҳаммаси бўлиб 7 қатлам Zn_2SnO_4 плёнка ҳосил қилинди.

Диссертациянинг “**Легирланган кремний асосидаги МДЯ-тузилмаларнинг физик хоссалари ва уларга ташқи омилларнинг таъсирлари**” деб номланган учинчи бобида етарлича юқори частоталарда ўлчанган МДЯ-тузилмаларнинг вольт-фарада (C-V) боғланишлари билан сиртий ҳолатларсиз олинган идеал C-V характеристикалари таққослаш натижалари муҳокама қилинган. Сиртий ҳолатларнинг, шунингдек, оксид қатламдаги зарядлар мавжудлиги МДЯ-тузилманинг C-V эгри чизиқларининг кучланиш ўқи бўйлаб силжишига олиб келади. Икки эгри чизиқни таққослаб, ΔV силжишни V га боғланиши аниқланади. ϕ сиртий потенциалнинг берилган қийматидаги сиртий ҳолатларнинг тўла заряди Q_{ss} қуйидаги ифода билан аниқланади:

$$Q_{ss} = C_{ss}(\Delta V) \quad (1)$$

Бунда C_{ss} – сиртий ҳолатлар сиғими. Юқоридаги (1) тенгламани график усулда дифференциаллаб, бирлик энергия интервалига тўғри келувчи сиртий ҳолатлар зичлиги учун ифода ҳосил қиламиз:

$$N_{ss} = \frac{1}{q} \left(\frac{\partial Q_{ss}}{\partial \phi_{ss}} \right). \quad (2)$$

3-расмда 900 °C да 60 минут давомида термик оксидлаш йўли билан тайёрланган Al-SiO₂-Si МДЯ-тузилмасининг вольт-фарада характеристикаси келтирилган (1-эгри чизиқ). Бунда кремний кристаллининг солиштирма қаршилиги 15 Ом·см, кристаллографик ориентацияси <100> ва диэлектрикнинг сиғими $C_0=1540$ пФ ни ташкил этган. Тажрибада аниқланган C-V эгри чизиқ кучланиш чизиғи бўйлаб мусбат йўналишда 1.9 В га силжиган бўлиб, бу “текис зона” кучланишига мос келади.

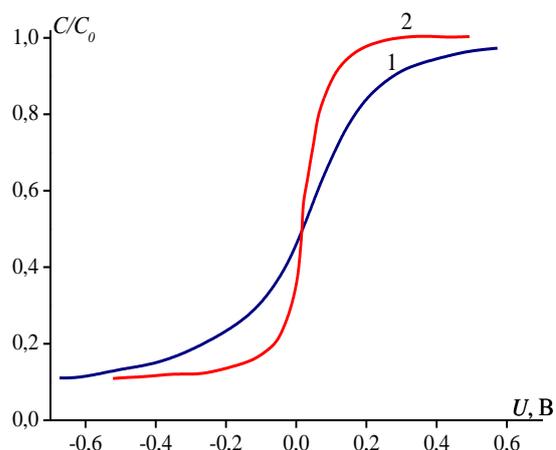
Шундай қилиб, МДЯ-тузилмани яримўтказгич-диэлектрик бўлиниш чегарасида сиртий ҳолатлар зичлиги N_{ss} ни аниқлаш учун текширилаётган тузилманинг юқори частотали вольт-фарада характеристикаси ўлчанади ва унинг ҳисобланган қийматлари билан таққослаб ΔV аниқланади. Сиртий ҳолатлар зичлиги

$$N_{ss} = \frac{C_0 \Delta V}{qS} \quad (3)$$

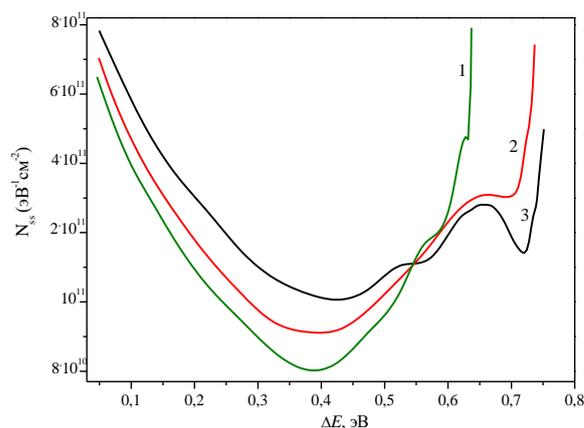
кўринишга эга бўлади.

МДЯ-тузилмаларда ионловчи нурланишлар таъсирида диэлектрик қатламда статистик зарядларнинг тўпланиши, сиртий тез ҳолатлар зичлиги N_{ss}

нинг ортиши ва бунинг натижасида диэлектрик-яримўтказгич чегарасида заряд ташувчилар генерация ва рекомбинация тезликларининг ортиши каби жараёнлар юз беради.



3-расм. Тажрибавий (1) ва назарий (2) МДЯ-тузилмаларнинг вольт-фарада боғланиши графиги



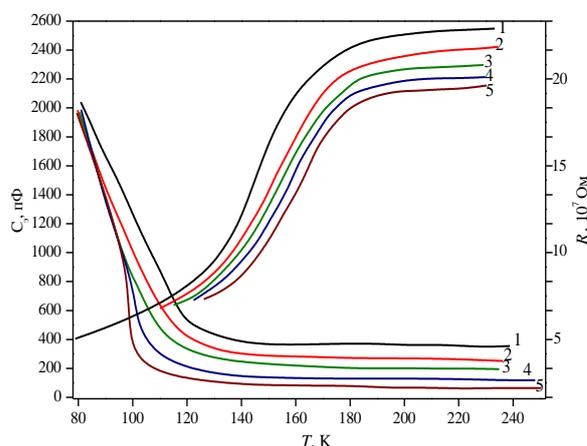
4-расм. МДЯ-тузилмаларда N_{ss} ни Si тақиқланган соҳаси бўйича нейтрон нурланишларидан олдинги (1) ва Φ , н/см², $2 \cdot 10^{11}$ (2) ва $1.2 \cdot 10^{12}$ (3) интеграл доза билан нурлантирилгандан кейинги тақсимоти графиглари

Келтирилган мулоҳазалар асосида, 4-расмдаги N_{ss} кремнийнинг тақиқланган соҳаси бўйича тақсимотини қуйидагича таърифлаш мумкин. $E=0,1\text{эВ}$ ($E_c=0$ деб олинади) энергиягача бўлган соҳага мос келувчи сиртий ҳолатлар диэлектрик қатламда Si-SiO₂ бўлиниш чегарасидан узоқ масофада жойлашган ва уларнинг зичлиги нурланиш таъсирида ўзгармайди. $E = (0,1 \div 0,5)$ эВ оралиқда N_{ss} қисман тўсилувчи потенциалли бўлиниш чегарасига яқин жойлашган ҳолатларга мос келади ва уларнинг зичлиги нурланиш дозасининг ортиши билан ортиб боради. $E \geq 0,5$ эВ га мос келувчи сирт ҳолатлар Si-SiO₂ ўтиш қатламида бўлиниш чегараси жуда тор ($\sim 1\text{мкм}$) қатламида жойлашган зарядланган марказлар томонидан ҳосил қилинади.

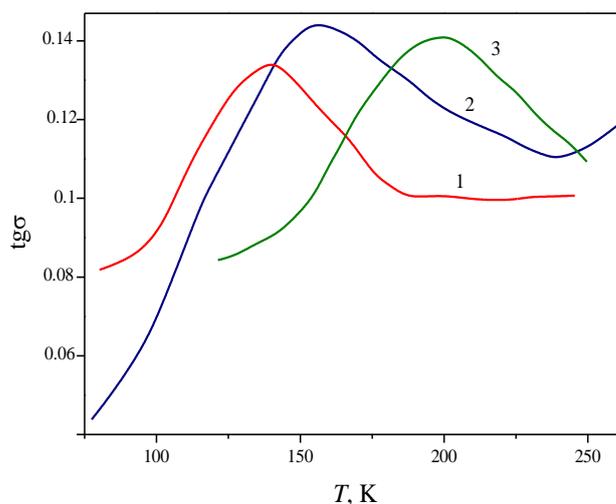
Si-SiO₂ ўтиш қатламининг доимий сиғим режимида сиғимий спектороскопия CC – DLTS усулидаги тадқиқотлар кўрсатдики, электронлар билан нурлантиришдан кейин N_{ss} ни кремнийнинг тақиқланган соҳаси кенглиги бўйича тақсимоти Si атомидаги эркин боғланишларга боғлиқ бўлган радиацион нуқсонларнинг Si ва SiO₂ орасидаги ўтиш қатлами тақсимотига боғлиқ.

Маълумки, бундай 10^{19} см⁻² миқдордаги марказлар ҳарорат таъсирида Квази-Ферми сатҳининг ўзгариши туфайли қайта зарядланиши, ҳажмий заряд қатлами сиғимини сезиларли ўзгартира олмайди. Шундай қилиб, C_s (эффektiv сиғим)нинг ўсиши сиртий заряд ва SiO₂ даги зарядларнинг ортишини билдиради (5-расм). Тажрибаларда кузатилган R_s (эффektiv қаршилик)нинг камайиши эса нурланишдан кейин SiO₂ қатламда ҳаракатчан зарядлар пайдо

бўлиши ва ҳароратнинг ортиши билан бу марказларнинг фаоллашишини кўрсатади. Нурлантирилган тузилмалар SiO_2 қатламида ҳаракатчан зарядлар мавжудлигига бу намуналарда C-V боғланишида гистерезис пайдо бўлиши мисол бўла олади.



5-расм. МДЯ-тузилмалар учун 10^6 рад (Si) доза билан нурлантирилгандан кейин эффектив сиғим ва қаршиликларининг ҳар хил частоталарда олинган ҳарорат билан боғланишлари: 1-10 кГц; 2-30 кГц; 3-60 кГц; 4-90 кГц; 5-150 кГц



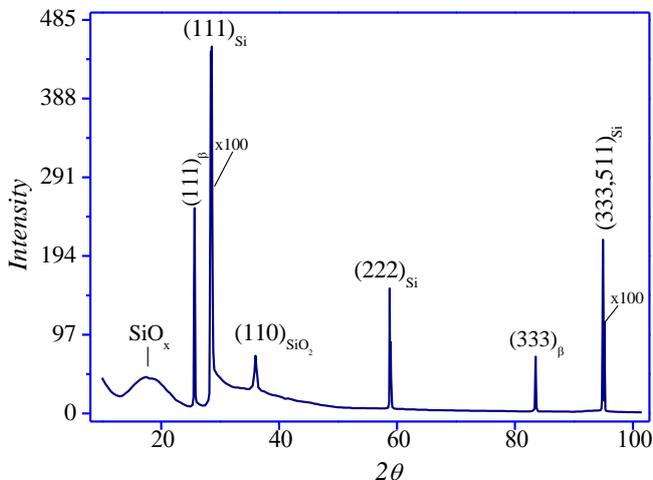
6-расм. $\text{tg}\delta$ нинг 1-10 кГц; 2-90 кГц; 3-150 кГц частоталардаги ҳарорат билан боғланишлари

Агар МДЯ-тизимни бойитиш режимидаги эквивалент схемасини RC занжир сифатида қарайдиган бўлсак, унга ўзгарувчан сигнал берилганда ундаги қувват диэлектрик йўқотишлар бурчак тангенсини $\text{tg}\delta = (WRC)^{-1}$ билан аниқланадиган қонуният билан сочилади.

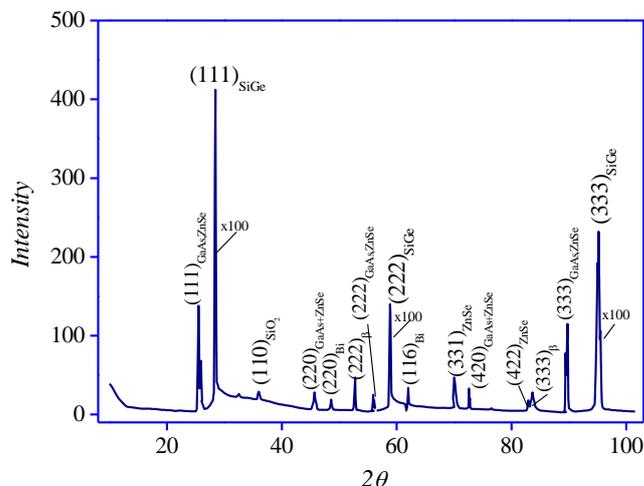
Тажрибалар кўрсатдики, $\text{tg}\delta$ (T) боғланишда релаксацион кўринишдаги аниқ максимум кузатилди (6-расм). Биринчи гуруҳ намуналарида N_{ss} нинг частотага боғланиши текширилганда $\text{tg}\delta$ (T_{max}), (T_{max} - $\text{tg}\delta$ нинг энг катта қийматга эришгандаги ҳарорати) чизиқли характерга эга эканлиги кўрсатилди. Бундай чизиқли боғланишлардан МДЯ тузилмалар энг катта диэлектрик йўқотишларга эга бўлган релаксацион максимумларнинг энергетик ҳолатини аниқлаш имконияти яратилади.

Диссертациянинг **“Кремний асосидаги кўпқатламли яримўтказгичли гетеротузилмаларнинг тузилмавий хусусиятлари ва физик хоссаларини тадқиқ қилиш”** тўртинчи бобида $n\text{-GaAs-p-(SiGe)}_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ гетеротузилмасининг тузилмавий, морфологик ва фотоэлектрик хоссаларининг тадқиқоти бўйича натижалар ёритилган. 7-расмда монокристал Si таглигининг рентгенограммаси келтирилган. Дифракциявий расмдан турли интенсивликдаги селектив табиатга эга бўлган бир нечта тузилмавий рефлекслар кўриш мумкин. Биринчи $(111)_{\text{Si}}$ тартибдаги тузилма чизиғининг бета (β) ташкил этувчиси $2\theta = 25,7^\circ$ да ва учинчи $(333)_{\text{Si}}$ тартибдаги тузилма чизиғиники эса 2θ

= 83,3° сочилиш бурчларида кузатилган. (111)_{Si} асосий рефлекснинг юқори интенсивликда ($2 \cdot 10^5$ имп·сек⁻¹) эканлиги ва кузатилаётган чўққининг торлиги (FWHM = $3.49 \cdot 10^{-3}$ рад) таглик кристалл панжарасининг мукамаллигидан далолат беради.



7-расм. Монокристалл кремний таглигининг рентгенограммаси



8-расм. Ўстирилган (SiGe)_{1-x-y}(GaAs)_x(ZnSe)_y эпитаксиал қатламининг рентгенограммаси

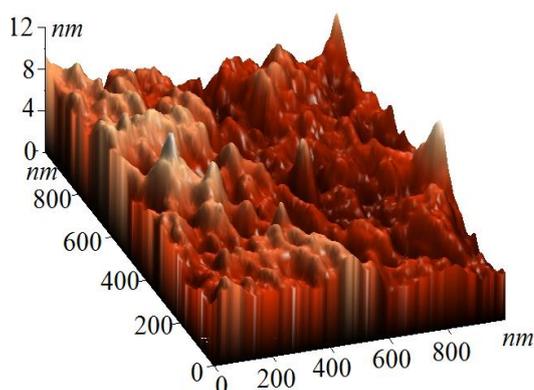
8-расмда ўстирилган (SiGe)_{1-x-y}(GaAs)_x(ZnSe)_y эпитаксиал қатламининг рентгенограммаси тақдим этилган ва у таглик рентгенограммасидан сезиларли даражада фарқ қилади. Эпитаксиал қатламининг рентгенограммасида кичик бурчак сочилишларида диффузион аксланиш кузатилмаган, асосий рефлекснинг (111) интенсивлиги таглик рефлексининг (111) интенсивлиги билан қиёсланганда ~ 28% га камайган ва иккинчи даражали (222) (тақиқланган рефлекс) интенсивлиги 110 марта ортган, учинчи тартибдаги рефлекснинг (333) интенсивлиги эса 59% га ортган. Киришма фазасидан рефлекс (110) интенсивлиги 25% га камайган, кичик бурчак сочилишлардаги ноэластик фон сатҳи 37% га камайган, шунингдек, ўрта ва узок бурчак сочилишларда эса ноэластик фон сатҳи 45% га ортган. Бундан ташқари турли интенсивликдаги $d/n = 3.440 \text{ \AA}$ ($2\theta = 25,9^\circ$) да (111)_{ZnSe+GaAs}, $d/n = 3.142 \text{ \AA}$ ($2\theta = 28,4^\circ$) да (111)_{SiGe}, $d/n = 2.001 \text{ \AA}$ ($2\theta = 45.19^\circ$) да (220)_{GaAs+ZnSe}, $d/n = 1.868 \text{ \AA}$ да (220)_{Bi}, $d/n = 1.631 \text{ \AA}$ да (222)_{GaAs+ZnSe}, $d/n = 1.491 \text{ \AA}$ ($2\theta = 62.16^\circ$) да (116)_{Bi}, $d/n = 1.341 \text{ \AA}$ ($2\theta = 70,2^\circ$) да (331)_{ZnSe}, $d/n = 1.158 \text{ \AA}$ ($2\theta = 83,7^\circ$) да (422)_{GaAs+ZnSe}, $d/n = 0.9422 \text{ \AA}$ да (333)_{GaAs+ZnSe} янги тузилма чизиклари пайдо бўлган.

Асосий (111)_{Si+Ge} рефлекснинг кенглиги (FWHM = $2,620 \cdot 10^{-3}$ рад) ва юқори интенсивликка ($2 \cdot 10^5$ имп·с⁻¹) эга эканлиги, қаттиқ қоричма кристалл панжарасининг юқори даражадаги мукамаллигини кўрсатади, яъни ўстирилган эпитаксиал қатлам (111) ориентацияли монокристалл ҳисобланади. Селяков-Шеррер² усули билан бу чўққи кенглиги аниқланганда,

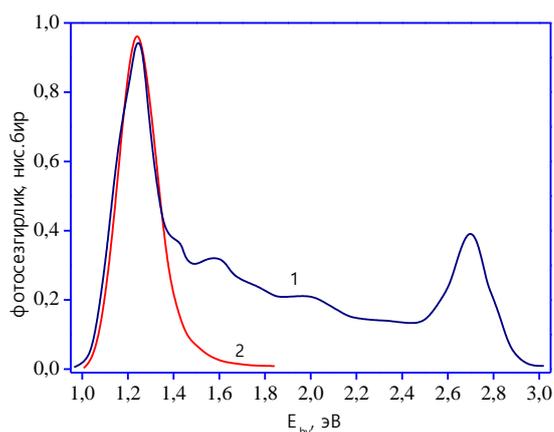
²Л.И. Гладких и др. Дифракционные методы анализа внутренних напряжений. Теория и эксперимент. Харьков: НТУ «ХПИ». 2006. С. 304.

эпитаксиал қатламлар субкристаллит (блоклари) ўлчами 48 нм ни ташкил этди.

9-расмда эпитаксиал қатлам сиртининг уч ўлчовли атомий куч микроскопи ёрдамида олинган тасвири кўрсатилган. Расмда сирт бўйлаб турли ўлчамдаги ўзига хос нанооролчалар ҳосил бўлганини кўриш мумкин. Олинган натижаларнинг таҳлили нанооролчалар асосининг диаметри $50 \div 90$ нм, баланлиги эса $3 \div 12$ нм оралиғидаги қийматларни қабул қилишини кўрсатади. Турли яримўтказгич материалларининг эпитаксиал қатламини ҳосил қилиш жараёнида уларнинг кристалл панжараси қийматларининг бир-бирига мос келмаслиги, кристалл панжарада деформация энергияси юзага келиши ўз-ўзини шакллантирадиган уч ўлчамли нанооролларни ҳосил бўлишига олиб келади.



9-расм. $(\text{SiGe})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ эпитаксиал қатлам сиртининг уч ўлчовли АҚМ тасвири



10-расм. $n\text{-GaAs-p-(SiGe)}_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ гетеротузилмаси (1) ва $n\text{-Si-p-Si}$ тузилма (2) ларининг спектрал фотосезгирлиги

Шунинг учун $\text{SiGe}_{1-x}\text{GaAs}_x/\text{ZnSe}$ тизимларининг кристалл панжара қийматлари номувофиқлиги, яъни 3,67% га фарқланиши туфайли, ZnSe квант нуқта сифатида ҳосил бўлиши мумкин. Рентгенографик таҳлил ҳамда атомий куч микроскопи тадқиқотлари натижалари ёрдамида олинган нанооролчаларининг (квант нуқталари) ўлчамлари бир-бирига жуда ҳам яқин ҳамда бу икки тадқиқот натижалари бир-бирларини қаноатлантиради (8-расм).

10-расмда 10 мкм қалинликдаги $(\text{SiGe})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ эпитаксиал қатлам фотосезгирлигининг спектрал боғланиши ҳамда қиёслаш учун $n\text{Si-pSi}$ тузилманинг фотосезгирлигининг экспериментал натижалари келтирилган (10-расм 2-чизиқ). Расмдан намунада GaAs молекулалари борлиги туфайли унинг фотосезгирлиги $E_{\text{ф}} \geq 1,45$ эВ фотон энергияли, қисқа тўлқинли спектрал соҳалар томон силжиганини кўриш мумкин. Шунингдек, намунада Ge атомлари борлиги туфайли унинг фотосезгирлиги узун тўлқинли спектрал соҳалар томон силжиганлиги ҳам кузатилди.

Максимал фотосезгирлик фотоннинг 1,23 эВ энергиясида кузатилади (10-расм). Бу эса $(\text{SiGe})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})$ қаттиқ қоришманинг тақиқланган

соҳаси кенглиги билан боғлиқ бўлиши мумкин. 1,23 эВ дан юқори фотон энергияларида спектрал фотосезгирликнинг пасайиши кузатилди, бизнингча, бу бўлиниш чегарасининг чуқурлиги билан боғлиқдир яъни бу ҳолда $p-n$ ўтиш ~ 10 мкмни ташкил этувчи эпитаксиал қатламнинг қалинлиги билан белгиланади. Тадқиқ этилаётган тузилманинг фотосезгирлиги спектрининг 2,4 дан 3 эВ гача бўлган энергия оралиғида кенг тақиқланган соҳага эга бўлган ZnSe атомлари боғланишларига тегишли 2,68 эВ ли чўққи кузатилган. Маълумки, соф яримўтказгичли ZnSe материалининг тақиқланган соҳаси кенглиги $E_{g,ZnSe} = 2,7$ эВ ни ташкил этади ва унинг ковалент ва қисман ионли боғланиши Si-Si, Ga-As ва Ge-Ge боғларга нисбатан мустақкамроқ бўлади. Аммо, ZnSe молекуласи Si_2 , GaAs ёки Ge_2 молекулалари билан қаттиқ қоришманинг тетраэдрик кристалл панжарасида ўзаро ўрин алмашилиб жойлашганида Zn-Se боғининг мустақкамлиги Si, Ga, As ва Ge атомларининг таъсири остида заифлашади.

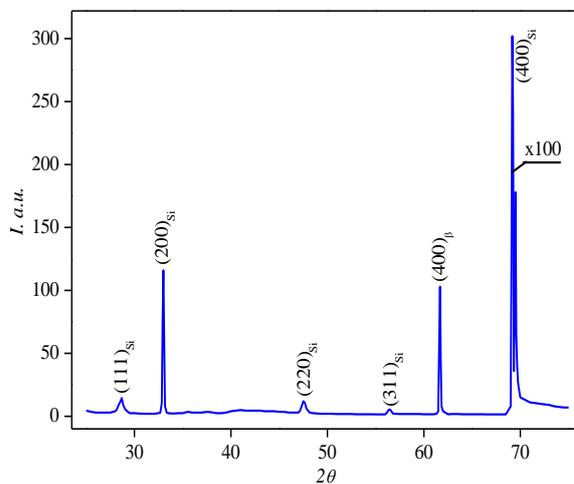
Тадқиқотнинг “**Металлооксидли юпқа қатламларнинг тузилмавий хусусиятлари ва физик хоссалари**” бешинчи бобида металлооксидларнинг тузилмавий хусусиятлари, сиртий ва фотоэлектрик тавсифларини тадқиқ қилиш ҳамда уларнинг фото-, термо- ва газсезувчанлик хоссаларини текшириш натижалари тақдим этилган. 11-расмда p -Si таглигининг рентгенограммаси кўрсатилган. Дифракцион расмдан турли хил интенсивликда селектив табиатга эга бир қатор тузилмавий рефлексларни кўриш мумкин. (400) дифракцион аксланишнинг юқори интенсивлиги ($2 \cdot 10^5$ имп·сек⁻¹) ва ингичка кенглиги (FWHM = $3,29 \cdot 10^{-3}$ рад) таглик кристалл панжарасининг мукамаллигидан далолат беради. Бундан ташқари, фақатгина (400) рефлекснинг энг юқори интенсивликдалиги ва ингичкалиги тагликнинг кристалл панжарасининг қийматини аниқлаш учун мувофиқ келди. Таглик панжарасининг экспериментал қиймати $a_s = 0,54292$ нм лиги аниқланди.

12-расмда ўстирилган ZnO юпқа қатламининг рентгенограммаси келтирилган ва у p -Si таглигининг рентгенограммасидан сезиларли даражада фарқ қилади. Юпқа қатлам рентгенограммасида кичик бурчакли сочилишларда $d/n = 0,2774$ нм ($2\theta = 31,7^\circ$) да (111), $d/n = 0,2723$ нм ($2\theta = 32,97^\circ$) да (002) ва $d/n = 0,249$ нм ($2\theta = 36,34^\circ$) да (101) кристаллографик ориентацияли селектив рефлексларга эга бўлган кенг диффузиявий аксланиш кузатилган.

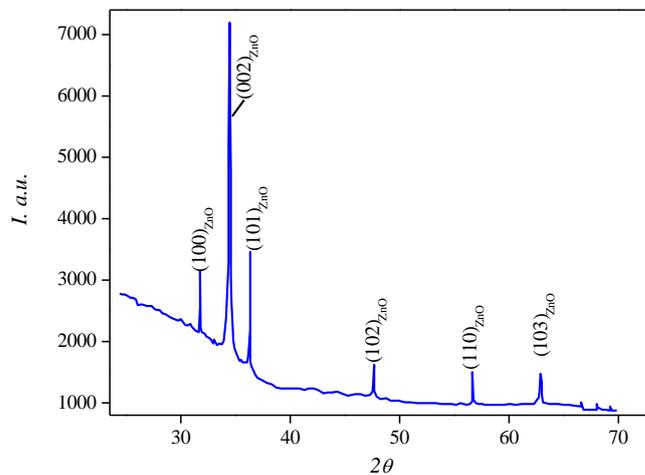
Дифракцион расмдан $d/n = 0,2723$ нм ($2\theta = 32,97^\circ$) да кузатилган (002) тузилмавий чизик юқори интенсивликда ($\sim 10^5$ имп·с⁻¹) ҳамда ингичка кенгликда (FWHM = $2,62 \cdot 10^{-3}$ рад) эканлигини кўриш мумкин.

Бу эса, юпқа қатлам кристалл панжарасининг мукамаллиги юқори даражада эканлигидан далолат беради³.

³И.Л.Шулпина и др. Журнал технической физика, 2010. Т. 80. № 4. С. 105.

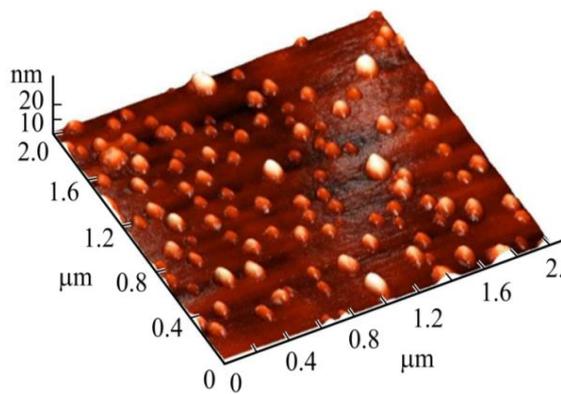


11-расм. *p*-Si таглигининг рентгенограммаси

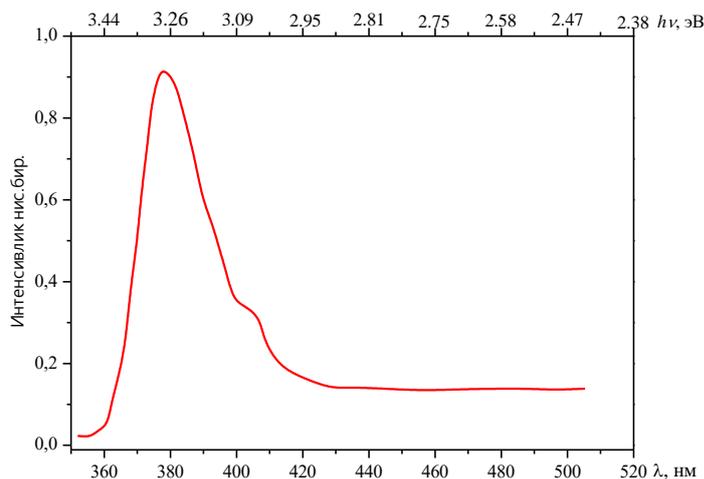


12-расм. ZnO юққа қатламининг рентгенограммаси

13-расмда *n*-ZnO/*p*-Si гетеротузилмаси микрорельеф тасвирлари ва сиртий ножинсликларнинг тақсимланиш профили тақдим этилган. Сиртий рельеф баландликлари ўртача 14 нм тартибини ташкил этди. Нотекисликлар баландлиги тақсимоти профилига кўра, 10 дан 18 нм гача бўлган намунанинг юзасида жойлашган сиртий объектлар ҳажмини визуал баҳолаш мумкин. Шунингдек, *n*-ZnO/*p*-Si намуналарда цинк оксиди улушининг ортиши билан пленка сиртидаги бузилишлар камайганлигини аниқлаш мумкин.



13-расм. *n*-ZnO/*p*-Si гетеротузилмаси уч ўлчамли тасвири

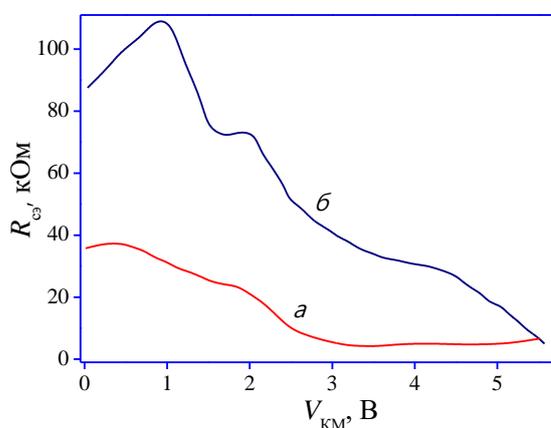


14-расм. ZnO юққа пардасининг спектрал фотолюминесценцияси

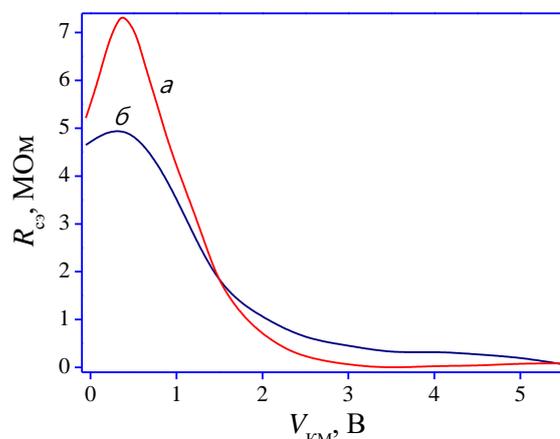
Ушбу рефлекс экспериментал натижаларининг таҳлили тузилма $C6/mmc$ фазовий гуруҳга тегишли ва кристалл панжара вюрцит тузилишли гексагонал сингонияга (руҳ атомлари орасидаги боғланиш кислород атомлари орқали амалга оширилиши туфайли) эга бўлган кристалл панжара ва унинг хона ҳароратидаги қийматлари мос равишда $a = 0.3265$ нм ва $c = 0.5212$ нм ни ташкил этади. Ушбу тузилмавий чўққининг ярим кенглиги бўйича субкристалларнинг ўлчамлари 67 нм га тенглиги аниқланди.

14-расмда хона ҳароратида $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$ гетеротузилмасининг спектрал фотолюминесценцияси тақдим этилган. Спектрал фотолюминесценцияда донор-акцептор жуфтликларининг алмашилиши билан боғлиқ кучли ёрқин нурланиш чўққиси фақат 377 нм да пайдо бўлади. Лекин, гетеротузилманинг спектрал фотолюминесценциясида ҳар хил турдаги нуқсонлар (масалан, ~550 нм да ZnO юққа қатламидаги кислородли бўш жой туфайли яшил чизиқнинг эмиссияси) эмиссия чўққиларининг йўқлиги ZnO юққа қатламининг нуқсонлардан ҳоли эканлигини кўрсатади ва $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$ гетеротузилма 377 нм ли ультрабинафша нурларни чиқарадиган юқори хусусиятли эканлигини тасдиқлайди.

$n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$ гетеротузилманинг спектрал фотолюминесценциясининг инфрақизил ва кўринувчи нурлар соҳасида нуқсонларга тегишли алоҳида силжишлар кузатилмагани, юқори сифатли ZnO юққа қатламини ўстириш учун оптимал шароитлар танланганлигини тасдиқлайди. Тадқиқ қилинаётган гетеротузилманинг бундай хусусиятлари юқори самарали ва арзон нархлардаги ультрабинафша детекторларини тайёрлаш имконини беради.



15-расм. SnO₂ асосидаги газ сенсорини қиздиришда (a) ҳамда совутишда (б) V_{KM} манба кучланишини R_{cs} (сезгир элемент қаршилиги)га боғлиқлиги (қиздиришдан олдин)



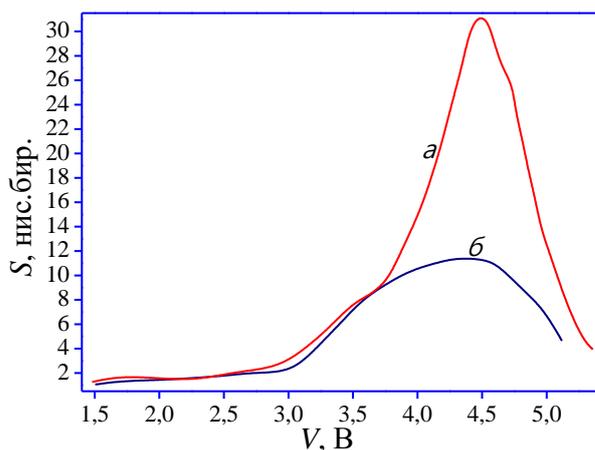
16-расм. SnO₂ асосидаги газ сенсорини қиздиришда (a) ҳамда совутишда (б) V_{KM} манба кучланишини R_{cs} (сезгир элемент қаршилиги)га боғлиқлиги (қиздиришдан кейин)

15-расмда қиздиришгача олинган $R(V)$ боғланиш келтирилган. Шунингдек таъкидлаш керакки, иситиш ва совутиш пайтида қаршилик бошланғич ҳолатидаги изидан қайтмайди. Сезгир элемент (СЭ) қаршилигининг қийматларидаги фарқ 115% (52 кОм) ни ташкил этади. Изотермик қиздириш қаршилик қийматларининг камроқ ўзгаришини кўрсатди. Сўнгра намуналар изотермик равишда 370°C да 4 соат мобайнида қиздирилди. Шунингдек, изотермик қиздиришдан кейин R_{cs} қийматлари V_{KM} (манба кучланиши)га боғлиқлиги текширилди (16-расм). Иситиш ва совутишдан кейин сезгир элементнинг қиздиришдан келиб чиққан қаршилиги дастлабки ҳолатига

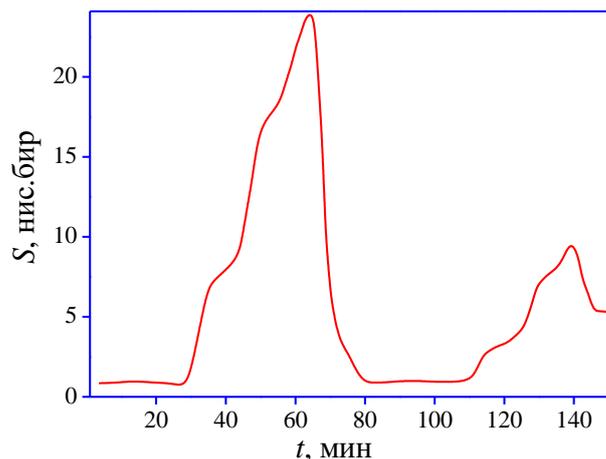
қайтиши аниқланди. Бироқ, СЭ қаршилигини қиздирмасдан олдин олинган қийматлари билан солиштирганда, қаршилик уч марта юқори қийматларга эга бўлиши кузатилди.

Ўтказилган экспериментал тадқиқотлар натижалари SnO_2 асосидаги газ сенсорни кумуш билан легирлангандан сўнг, унинг спиртли газларга нисбатан сезувчанлиги пасайишини кўрсатади. Газ сенсорларига кучланиш берилганда спирт газининг $C_s=3000$ ppm ($3000 \text{ ppm}=0.3 \%$) концентрациясига кумуш киришмасининг сезгирликка таъсири туфайли бундай боғлиқлик аниқланди (17-расм). 17-расмда SnO_2 сиртини легирлашдан сўнг унинг сезувчанлиги 3 марта тушиб кетиши ва максимал сезувчанлик ҳарорати деярли ўзгармаслиги акс этиб, бу эса аммиак ва спиртга нисбатан селектив сенсорлар яратиш имконини беради.

Легирланган сенсорнинг турли газларга селективлик таъсирини ўрганиш учун бир қатор тажрибалар ўтказилди. Тажрибаларнинг биринчи қисмида юпқа қатламнинг захарли аммиак буғлари билан тўйиниш вақти ва шунга мос равишда максимал сезувчанлик қиймати аниқланди. Бунинг учун намуна $C_s=2000$ ppm ($2000 \text{ ppm} = 0.2 \%$) коцентрацияли захарли газлар буғлари билан тўлдирилган ёпиқ гумбазсимон идиш ичига жойлаштирилди. Аммиак газининг яримўтказгич намуна сирти билан ўзаро таъсирлашиш жараёнлари узоғи билан 10÷12 дақиқани олади. Кейинги қадамда легирланган сенсорнинг бир вақтнинг ўзида иккита захарли газга сезгирлигини аниқлаш учун қўшимча тажриба ўтказилди.



17-расм. Газ sensori кучланишига $C_s=3000$ ppm концентрацияли спирт газига сезгирликка (1Н эритма) легирлашнинг таъсири. ((a) легирлашдан олдин, (б) легирлашдан кейин)



18-расм. Кумуш билан легирланган газ сенсорлари икки хил газ – (2000 ppm) спирт ва аммиакдан ташкил топган аралашманинг сезувчанлиги

1Н коцентрацияли пуркаб легирланган моддадан ясалган газ сенсорларини ўрганилди.

Бунинг учун намуналар ўлчаш мосламасининг ёпиқ гумбазсимон идишга жойлаштирилган ва унга 2000 ppm концентрацияли спиртли ва аммиак каби

газлар буғлари киритилади. 18-расмда Ag киришмалари ва иш режимларининг текширилаётган намуна сезгирлигига таъсири натижалари келтирилган.

18-расмдаги экспериментал натижалар графигини уч қисмга ажратиш мумкин: I чап томон, II марказий/ўрта ва III ўнг томон. I қисм ташқи таъсирларсиз газ сенсори сезгирлиги (S) ни барқарор ҳолда бўлишини кўрсатади. Иккинчи қисм муҳитга икки хил заҳарли газлар киритилиши натижасида олинган боғланиш келтирилган. Ушбу соҳадаги гумбазсимон эгри чизик ҳолатидан сенсорли юпқа қатламнинг сезгирлиги энг юқори қийматга эга бўлишини кўриш мумкин (аммиакни сирт билан реакцияси туфайли). Сўнгра, III соҳада сенсорга берилган кучланишни 0,5 В÷5 В оралиғида, 0,5 В дан ўзгартириб борилди. Натижада сезгир элементни сиртини қизиши ва уни термостабилланиши кузатилди. 5 В кучланиш қийматидан бошлаб SnO₂ яримўтказгичли юпқа қатламларини спирт буғларига реакцияси туфайли ҳосил бўлган иккинчи чўққи пайдо бўлди. Газларни сезгир элемент сирти билан реакцияси вақт билан аниқланиши туфайли S(t) боғланиш олинади.

Тадқиқотлар натижасида микроэлектрон қурилмаларнинг SnO₂ сенсорли қатламлари учун маҳаллий легирлаш усули ишлаб чиқилди. Тажрибалар хона ҳароратида Ag билан легирланган SnO₂ сенсор қатламлари аммиак газларига сезгир эканлигини кўрсатди. Сенсорнинг сезувчанлиги 500÷5000 ppm оралиқдаги концентрацияли аммиак газига боғлиқли қонуниятлари аниқланди. Ҳавода 500 ppm аммиакни ташкил этган 1Н эритмаси билан легирланган SnO₂ юпқа қатламларининг сезгирлик чегаралари аниқланди. Бир вақтнинг ўзида иккита заҳарли газ аралашмаси буғига микроэлектрон сенсорнинг селектив реакцияси тажрибалар асосида тасдиқланган.

ХУЛОСА

Тадқиқотлар асосида олинган тажрибавий натижалар, адабиётларда келтирилган маълумотлар ва мавзу бўйича мавжуд назарий тасаввурларнинг таҳлиллари асосида МДЯ ва гетеротузилмаларнинг бўлиниш чегарасидаги квант нанообъектларни ҳосил бўлиши ва уларнинг монокристалл Si асосида олинандиган электрон қурилмалар хусусиятларига таъсирлари бўйича қуйидаги хулосаларга келинди.

1. Кремний асосида МДЯ тузилмаларни термик оксидлаш усулида олиш технологиялари такомиллаштирилди. Кремнийни Rh ва Ir билан легирланганда Si-SiO₂ бўлиниш чегарасидаги сиртий ҳолатлар зичлигининг ортиши ва N_{ss} энергия тақсимоотида Si кристалл панжарасидаги Rh ва Ir атомлари ионланиш энергиясига мос келувчи E_c-0,15±0,03 эВ, E_c-0,34±0,03 эВ, ва E_c-0,55±0,03 эВ энергетик чўққилар ҳосил бўлиши ҳамда улар эффектив генерацион марказлар эканлиги аниқланди.

2. Олинган намуналарни вольт-фарада характеристикаларини тадқиқ қилиш асосида бўлиниш чегарасидаги сиртий ҳолатлар зичлиги кремний тақиқланган соҳаси бўйича бир текис тақсимланганлиги, паст

температураларда ишлов берилганда ($E_c=0,11$ эВ, ва $E_c=0,16$ эВ,) сиртий ҳолатларнинг энергияси камайиши, оксид қатлами олишдан аввал сифатли ишлов бериш сиртий ҳолатлари камайишига сабаб эканлиги қайд этилди.

3. Термик, электрон ва γ -нурланишлар билан ишлов беришнинг шароитларини оптималлаштириш асосида яримўтказгич-диэлектрик ҳамда яримўтказгич-яримўтказгич бўлиниш чегарасида N_{ss} нинг қиймати ва тақсимотини, шунингдек, диэлектрик қатламдаги бириктирилган ва ҳаракатчан зарядларни табиатини бошқариш орқали МДЯ тузилмаларнинг ва улар асосидаги электрон маҳсулотларнинг хоссаларини яхшилаш имкониятлари кўрсатилди.

4. 80-270 К ҳароратда, 30-150 кГц частоталарда ва 10^6 рад дозада γ -нурлар билан нурлантирилган МДЯ-тузилмаларда $tg\delta$ ни ҳарорат билан боғланишлари ўрганилганда, Дебайнинг диэлектрик релаксацияси модели ёрдамида тушунтириш мумкин бўлган 0,11 ва 0,26 эВ фаолланиш энергияли чўққилар ҳосил бўлиши аниқланди.

5. Биринчи марта кристал панжарасининг қиймати $a = 5.4535$ Å бўлган сфалерит тузилишга эга, (111) кристаллографик ориентацияли, ZnSe (гумабазсион нанооролчалар) квант нуқталари $SiGe_{1-x}GaAs_x$ қаттиқ қоришмалари суюқ фазада эпитакия усули ёрдамида олинди.

6. $(SiGe)_{1-x-y}(GaAs)_x(ZnSe)_y$ эпитакия қатлам кимёвий таркибини $0 < x < 0.11$, $0 < y < 0.08$ оралиқларда ўзгариши ҳамда унинг сиртида ва ҳажмида 48 нм ўлчамли GaAs нанокристаллитлари ҳамда 65 нм ли ZnSe квант нуқталарининг ҳосил бўлиш механизмлари, шунингдек, квант нанообъектларнинг зичлиги, геометрик шакли ва ўлчамларини технологик меъёрлар (ўсиш температураси оралиғи, соғутиш тезлиги)га боғлиқлиги аниқланди;

7. $(SiGe)_{1-x-y}(GaAs)_x(ZnSe)_y$ қаттиқ қоришмаларининг тузилмавий, электрофизик ва фотоэлектрик хусусиятларини ўрганиш натижасида улар таркибида GaAs, Ge, ZnSe элементларининг мавжудлиги ва улардан ионизация энергиясига мос ҳолда ёруғликни спектри бўйича танлаш хусусиятига эга бўлган фотосезгир элементлар олиш мумкинлиги кўрсатилди.

8. $(SiGe)_{1-x-y}(GaAs)_x(ZnSe)_y$ қаттиқ қоришмалар асосида таёрланаётган гетеротузилмалардан инфрақизил ва кўзга кўринувчи (1300÷400 нм) нурлар соҳасида ишловчи фотоқабуллагичлар яратишда фойдаланилиш мумкинлиги аниқланди.

9. Кремний асосида олинган ZnO металлооксид юпқа пардалари кристалл панжараси қийматлари $a=0,3265$ нм ва $c=0,5212$ нм, гексоганал сингония ва вюрцит тузилишли, блоклари ўлчами 67 нм бўлган, сирти (001) кристаллографик ориентацияга эга бўлган монокристалл эканлиги, шунингдек, сиртида ёнбош геометрик ўлчами $L_{ZnO}=84$ нм бўлган ZnO нанокристаллитлари борлиги аниқланди.

10. ZnO металлооксидли қатламларини деформациялаш механик энергияни электр энергиясига, электр энергиясини ёруғликка ҳамда қуёш энергиясини электр энергиясига айлантирувчи қурилмалар учун қўллаш

имкониятлари аниқланди. Бундай материаллар экологик тоза, қулай ва арзон ҳисобланади.

11. SnO₂ сенсор қатламларини кумуш билан легирлаш намуналарнинг метрологик хусусиятларини яхшилашга ҳамда уларни зарарли ва портловчи газлар учун танлов индикаторларини тайёрлашда фойдаланиш мумкинлиги кўрсатилди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕЙ ПРИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ
ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ НАЦИОНАЛЬНОГО
УНИВЕРСИТЕТА УЗБЕКИСТАНА**

АНДИЖАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЙУЛЧИЕВ ШАХРИЁР ХУСАНОВИЧ

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МНОГОСЛОЙНЫХ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ
ЛЕГИРОВАННОГО КРЕМНИЯ**

01.04.10-Физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ ДОКТОРСКОЙ (DSc) ДИССЕРТАЦИИ
ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент-2020

Тема диссертации доктора наук (DSc) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2020.2. DSc/FM158

Диссертация выполнена в Андижанском государственном университете.

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

Научный руководитель: Далиев Хожакбар Султонович
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: Зикриллаев Нурулло Фатхуллаевич
доктор физико-математических наук, профессор

Рахматов Ахмад Зайниддинович
доктор технических наук, профессор

Отажонов Салимжон Мадрахимович
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: Каракалпакский государственный университет

Защита диссертации состоится «31» 10 2020 года в 16⁰⁰ часов на заседании Научного совета по присуждению ученых степеней DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 при Научно-исследовательском институте физики полупроводников и микроэлектроники Национального университета Узбекистана (Адрес: 100057, Узбекистан, г. Тошкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел.: (998 71) 248-76-94; Факс: (998 71) 248-79-92; e-mail: info@ispm.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Отделе внедрения информационных технологий института (зарегистрирована за № 18) по адресу: 100057, Узбекистан, г. Тошкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел.: (998 71) 248-79-59; e-mail: info@ispm.uz.

Автореферат диссертации разослан «30» 10 2020 года.
(реестр протокола рассылки № 18 от «20» 10 2020 г.).



 Ш.Б. Утамурадова
председатель Научного совета по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

 Ж.Ж.Хамдамов,
ученый секретарь Научного совета
по присуждению ученых степеней, PhD

 Х.К. Арипов,
председатель Научного семинара
при Научном совете по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация докторской (DSc) диссертации)

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время в мире научные исследования в области полупроводникового материаловедения и электронного приборостроения развиваются огромными темпами. Это связано с тем, что интенсивное применение полупроводниковых устройств в микро- и нанoeлектронике обуславливает повышение потребности в дальнейшем расширении их типов и функциональных возможностей. Структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП), тонкопленочные, многослойные полупроводниковые и металлооксидные слои гетерогенных конструкций на основе кремния, составляющие основу современной микроэлектроники остаются основными элементами в различных секторах экономики, от бытовой техники до военной техники, авиакосмической отрасли, систем связи и других. Основными физическими процессами, гарантирующими качество и надежность таких устройств, являются характер поверхностных состояний, присутствующих на границах слоев, на их поверхности, а также их изменения при различных внешних воздействиях. Одной из важных задач при исследовании процессов переноса заряда в МДП-структурах, в многослойных тонких полупроводниковых структурах в областях между основанием (Si) и составляющими их слоями в гетеропереходах кремний-металлооксид является исследование природы этих состояний. Известно, что основные свойства МДП-структур, помимо поверхностных состояний, во многом зависят и от свойств кремния и диэлектрических слоев. Исследования технологии формирования диэлектрических слоев SiO_2 показали, что объемные свойства кремниевой основы многих электронных изделий существенно влияют на принципы работы транзисторов, интегральных схем и других микроэлектронных устройств. Однако создание технологии для получения таких структур с заданными параметрами все еще остается проблемой.

Ведущие мировые исследовательские центры проводят множество исследований технологии и свойств гетероструктур, полученных путем выращивания двух и более тонких пленок сложных, многослойных полупроводников A^2B^6 , A^3B^5 , Ge, Si, GaAs и других монокристаллов. В дополнение к обычным условиям чистой точечной поверхности, квантовые нанострoвки, наноямы и другие еще не исследованные состояния были обнаружены на границах раздела таких многослойных структур. Однако условия, при которых возникают такие состояния, их природа, состав и влияние на поведение носителей заряда в этих структурах, пока не установлены. Тем не менее, имеется информация о возможности получения уникальных характеристик электронных и лазерных устройств, высокоэффективных солнечных элементов за счет оптимизации технологии получения компонентов таких многослойных структур, толщины и количества слоев. Еще одним важным направлением является совершенствование технологии получения таких металлооксидов, как ZnO, SnO_2 , что позволит

расширить спектр поглощения света до фиолетового и ультрафиолетового излучения, т.е. повысить эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую за счет изменения состава металлооксидов и добавления атомов примесных элементов, создать возможности повышения чувствительности к отдельным газам и использования этих свойств при производстве военной техники, медицинского, сельскохозяйственного и бытового оборудования.

В соответствии со Стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан является важным сокращение энерго- и ресурсоемкости экономики, широкое внедрение в производство энергосберегающих технологий, расширение использования возобновляемых источников энергии, повышение производительности труда в отраслях экономики за счет простоты методов получения металлооксидов с использованием золь-гель технологий, экономии материалов и энергии, расширение широты их применения.

Данная диссертационная работа в определенной степени служит решению задач, предусмотренных в Постановлениях Президента № ПП-4348 от 30 мая 2019 года «О дополнительных мерах по созданию благоприятных условий для дальнейшего развития электротехнической промышленности и повышению инвестиционного и экспортного потенциала отрасли», № ПП-3855 от 14 июля 2018 года «О дополнительных мерах по повышению эффективности коммерциализации результатов научной и научно-технической деятельности», № ПП-3012 от 26 мая 2017 года «О программе мер по дальнейшему развитию возобновляемой энергетики, повышению энергоэффективности в отраслях экономики и социальной сфере на 2017–2021 годы», а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Диссертация выполнена в рамках приоритетных направлений развития науки и технологий Республики Узбекистан III. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение, транспорт, машино- и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения» и IV. «Развитие методов использования возобновляемых источников энергии, создание технологий и устройств на основе нанотехнологий, фотоники и других передовых технологий».

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации¹
Получение многослойных гетероструктур с нанобъектами на основе кремния, образование нанокристаллитов (квантовых точек и ямок) на

¹Обзор международных научных исследований по теме диссертации проведен на основе: Masayuki Tachi et.al. Atomic configuration of boron pile-up at the Si/SiO₂ interface. IEICE Electronics Express. 2004 Vol.1. Issue 6. pp. 126-130.

границах раздела и их физические свойства изучаются во многих ведущих научных центрах и университетах мира.

В том числе: Институт полупроводниковых технологий (Германия), Физико-технический институт А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург, АН РФ), Институт физики твердого тела (АН РФ), Технологический институт (Массачусетс, США), Токийский технологический институт (Япония), Физика полупроводников (Киев, Украина) и Институт электронной технологии (Московская область, АН РФ), Калифорнийский университет (США).

Вопросами получения металлооксидов методом распылительного пиролиза, осаждения, поверхностного нанесения на основе золь-гель технологий для определения их структурных свойств, создание на их основе различных электронных изделий, занимаются Воронежский государственный технический университет (РФ), Токийский технологический институт (Япония), Институт исследования полупроводников (Испания) и другие научные сообщества.

Научные коллективы НПО «Электрон» (г. Санкт-Петербург), Белорусского государственного университета занимаются производством приборов на основе МДП-структур, разработкой методики исследования и изучения электрофизических свойств (Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН), внедрением их в новые многоэлементные интегральные схемы и применением их на практике.

В настоящее время в научных центрах мира занимаются созданием многомощных адаптивных лазеров на основе двух и более полупроводниковых тонкопленочных сложных гетероструктур, увеличением количества элементов на единичной поверхности, повышением уровня взаимосвязи элементов интегральных схем, расширением спектра поглощения света, исследованием и созданием электронных устройств, чувствительных к различным газам, температуре и давлению, а также новых полупроводниковых материалов и приборов с уникальными свойствами, широким спектром возможностей, проведением поиска технологических способов управления свойствами существующих материалов.

Степень изученности проблемы. Хотя общепризнано, что высокие достижения микроэлектроники в наши дни обусловлены электрофизическими процессами на границах перехода Si-SiO₂ структур металл-диэлектрик-полупроводник, по мнению Сах С.Т., Крове А.С. (США), Зи С.М. (США), эти возможности до сих пор до конца не изучены. Это связано с образованием термических дефектов в МДП-структурах, полученных термическим окислением, сложностью точного моделирования границы раздела, наличием неконтролируемых, фиксированных и подвижных зарядов в диэлектрическом слое SiO₂. Японские ученые М.Тачи, Н.Сугияма отметили проблемы в усовершенствовании технологических процессов, русские учёные Л.С.Берман, А.А. Лебедев и узбекские учёные С.З. Зайнабидинов, С.И. Власов, установили, что теоретическое определение параметров таких устройств не совершенно и имеется еще ряд проблем в решении этих вопросов.

В результате разработки технологий получения тонких полупроводниковых, диэлектрических и металлических пленок на основе кремния, изучения свойств формируемых двух- и многослойных гетероструктур и их применению на практике русские академики А.К. Валиев, Ж.И. Алфёров, Х. Росселя из Германии, узбекские учёные М.С. Саидов, Р.А. Муминов и другие на основе гетероструктур создали мощные лазеры, эффективные солнечные элементы и другие электронные и оптоэлектронные устройства. Научно-практические исследования показали, что развитие этого направления способно превратить XXI век в век гетероструктур, главным образом за счет совершенствования технологий получения новых структур, углубленного изучения их физических свойств (Ж.И. Алфёров).

Благодаря простоте и удобности технологий получения металлооксидные материалы представляют большой интерес для многих ученых, также как японские ученые Юши Шичи, Сатоши Танимато, вырастили TiO_2 , ZrO_2 и ZnO на кремнии и создали гетеропереходные устройства, чувствительные к внешней температуре и свету. Группа исследователей во главе с русскими учёными С.И. Рембеза разработала несколько методов производства металлооксидных гетеропереходов на основе кремния. Показана возможность создания высокочувствительных датчиков, регистраторов и солнечных элементов за счет оптимизация и их структурного состава и технологий. В то же время они отметили, что имеются возможности создания уникальных электронных устройств различного назначения за счет изменения состава металлооксидов и улучшения технологии их получения.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего учебного заведения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках проектов научных исследований Андижанского государственного университета в рамках научных проектов ОТ-Ф2-002: «Неравновесные процессы переноса носителей заряда, стимулированные внешними (термическими, оптическими и радиационными) воздействиями в поликристаллических, аморфных и нанокристаллических кремниевых структурах» (2008-2012 гг.); ОТМ-Ф2-68 «Механизмы образования примесно-дефектных микро – и нанообъединений в кристаллах и их роль в создании многослойных структур с широкими функциональными возможностями» (2017-2020 гг.)

Целью исследования является исследование структурных, электрофизических и фотоэлектрических свойств структур металл-диэлектрик-полупроводник, многокомпонентных тонких полупроводниковых и металлооксидных многослойных пленок на основе кремния, определение оптимальных условий их получения и определение возможностей их практического применения.

Задачи исследования:

изучить влияние легирования кремния примесными атомами на величину плотности поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO₂;

выявить влияние быстрых электронов и γ -облучения на диэлектрические слои, полученные методами влажного безхлорного и хлорного термического окисления;

определить условия улучшения характеристик электронных приборов, изготовленных на основе МДП-структур с помощью термообработки, облучения быстрыми электронами и γ -лучами;

определить возможность получения твердого раствора $(\text{SiGe})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ с квантовыми точками методом жидкофазной эпитаксии;

определить механизмы образования нанокристаллитов селенида цинка на поверхности твердого раствора $\text{SiGe}_{1-x}\text{GaAs}_x$ в форме nanoостровков и их химический состав;

изучить технологию получения многослойных гетероструктур и их структурные, электрофизические и фотоэлектрические свойства;

определить структурные параметры тонких пленок ZnO и SnO_2 , полученных на основе кремния, а также размеры и химический состав нанокристаллов ZnO , образующихся на их поверхности;

показать возможности использования в солнечной энергетике и оптоэлектронике тонких пленок ZnO и SnO_2 , выращенных на основе кремния, в качестве чувствительных элементов в инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой областях в гибких и прозрачных электронных приборах.

Объектом исследования являются МДП-структуры, многокомпонентные и многослойные полупроводниковые гетероструктуры на основе монокристаллов кремния, а также тонкие пленки металлооксидов типа ZnO и SnO_2 .

Предметом исследования является природа нестабильных заряженных состояний на границе раздела полупроводник-диэлектрик, эпитаксиальных и металлооксидных слоев на основе кремния, механизмы их образования, а также влияние света, температуры и радиации на их свойства.

Методы исследований. Исходя из поставленных задач, были использованы рентгеновский дифрактометрический метод для структурных исследований, атомно-силовой микроскоп для морфологических исследований, комплекс измерительных приборов для исследований вольтамперных характеристик, оптическая спектроскопия для выявления спектральных характеристик и четырехзондовый метод для изучения удельного сопротивления.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

выявлено, что легирование кремния примесными атомами Rh и Ir приводит к изменению значений плотности поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO_2 , а также закономерностей их энергетического распределения в соответствии с энергией ионизации атомов;

установлено, что под влиянием γ -облучения дозой 10^6 рад в диэлектрических слоях, полученных методами влажного безхлорного и хлорного термического окисления, при температурах 80-270 К и частотах 30-

150 кГц на спектре распределения $\text{tg}\delta$ появляются новые релаксационные пики с энергиями активации 0,11 эВ и 0,26 эВ;

показаны возможности улучшения характеристик электронных приборов, изготовленных на основе МДП-структур путем управления состояний подвижных зарядов в диэлектрике и плотности поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO₂ с помощью термообработки, электронного и γ -облучения, дающих возможность управления их величиной;

впервые получены нанокристаллиты (квантовые точки) селенида цинка на поверхности и границе раздела субкристаллитов (блоков) твердого раствора (SiGe)_{1-x-y}(GaAs)_x(ZnSe)_y методом жидкофазной эпитаксии;

обнаружено, что механизмы образования нанокристаллитов GaAs и квантовых точек ZnSe в объеме и на поверхности твердого раствора (SiGe)_{1-x-y}(GaAs)_x(ZnSe)_y, а также их плотность, форма и размеры квантовых нанобъектов зависят от технологических режимов (интервала температуры выращивания и скорости охлаждения);

определены режимы изготовления солнечных элементов на основе гетероструктур $n\text{-Si-p-(SiGe)}_{1-x-y}\text{(GaAs)}_x\text{(ZnSe)}_y$, обладающих избирательной фоточувствительностью, обусловленной компонентами GaAs, Ge, ZnSe, которые отличаются значениями энергии ионизации;

выявлено, что пленки ZnO, полученные на основе кремния, имеют гексагональную сингонию и вюрцитную структуру с параметрами $a = 0.3265$ нм и $c = 0.5212$ нм, с размерами блоков 67 нм, а также содержат нанокристаллиты, имеющие средний размер $L_{\text{ZnO}} \approx 84$ нм на поверхности пленки;

определены возможности применения металлооксидных слоев n-ZnO и SnO₂ в устройствах для преобразования механической энергии деформации в электрическую, электрической энергии в световую, а также солнечной энергии в электрическую;

установлено, что легирование металлооксидных слоев SnO₂ серебром приводит к повышению газовой чувствительности, улучшению метрологических характеристик образцов и дает возможность использования их в индикаторах токсичных и взрывоопасных газов на их основе.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

Условия, установленные для управления плотностью поверхностных состояний и дефектов на границе раздела диэлектрик-полупроводник рекомендуется использовать в производстве электронных приборов, интегральных схем на основе МДП структур.

Твердые растворы типа (SiGe)_{1-x-y}(GaAs)_x(ZnSe)_y, содержащие квантовые точки и ямы, могут быть использованы в качестве фотоактивного материала при производстве селективных фотоприёмников, работающих в области инфракрасного и видимого спектров света.

Разработаны рекомендации по созданию различных газовых сенсоров и их использованию в качестве прозрачных и гибких электронных устройств

путем оптимизации технологии получения тонких слоев металлооксидов, управления их составом и легирования примесными атомами.

Достоверность результатов исследования основана на использовании электрических и светочувствительных приборов, инфракрасных и рентгеновских спектрометров, атомно-силовой микроскопии, материалов, полученных на основе апробированных технологий, завоевавших доверие исследователей своей высокой точностью и применением в мировой практике, а также соответствием полученных данных с имеющимися в литературе сведениями.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов заключается в определении механизмов переноса заряда в многослойных гетероструктурах, электрофизических и фотоэлектрических процессов в этих устройствах, научное и теоретическое обоснование природы селективной чувствительности металлооксидов.

Практическое значение результатов исследования заключается в том, что использование электронных устройств, интегральных схем и многокомпонентных гетероструктур, созданных на основе МДП-структур приводит к ускорению производства фоточувствительных и высокоэффективных многофункциональных электронных изделий и солнечных элементов.

Внедрение результатов исследования.

Результаты, полученные при изучении изменения плотности поверхностных состояний и закономерности распределения их по энергиям в соответствии с энергией ионизации примесных атомов Rh и Ir на границе раздела Si-SiO₂ в МДП-структурах на основе легированного кремния, а также рекомендации по изготовлению прозрачных и гибких электронных изделий, чувствительных к газам, температуре и радиации из металлооксидных тонких пленок, использованы при выполнении проекта АЗ-ФА-Ф003 «Создание устройств на основе датчиков из компенсированного кремния для контроля температуры и влажности на продовольственных складах». Института ядерной физики АН РУз. (Справка Академии Наук Республики Узбекистан за № 2/1255-1768 от 27 августа 2020 г.). Применение результатов научных исследований позволило улучшить эксплуатационные параметры электронных изделий, чувствительных к газам и температуре.

Результаты, полученные по изготовлению гетероструктур SiGe/GaAs/ZnSe на основе кремния, управлению природой и распределением характерных нанокристаллитов GaAs и квантовых точек ZnSe, изучению спектров фоточувствительности гетероструктур типа SiGe/GaAs/ZnSe, рекомендации по изготовлению на их основе фотоэлементов, чувствительных в области инфракрасного и видимого спектрального диапазона, были использованы на АО «ФОТОН» при производстве полупроводниковых электронных устройств (Справка № 04-4/1561 Акционерной компании «Узэлтехсаноат» от 26 августа 2020 года). Использование научных результатов позволило создать новый класс оптоэлектронных изделий и

фотоэлементов для инфракрасной и видимой областей спектрального диапазона.

Предложенные научно-технические рекомендации по оптимальным технологическим режимам легирования кремния примесными атомами, полученные закономерности размещения примесных атомов в кристаллической решетке в виде одиночных атомов или в составе скоплений, механизмы их взаимодействия с дефектами кристалла и влияние их на электрофизические свойства кремния, закономерности влияния термических и радиационных воздействий на повышение стойкости и фоточувствительности были использованы при выполнении проекта Ф2-55 «Разработка научных основ получения нового класса наноматериалов с новыми функциональными возможностями на основе формирования нанокластеров в объеме структурированном кремнии» в Ташкентском государственном техническом университете (Справка Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан за № 89-03-2968 от 27 августа 2020 г). Применение результатов исследований позволило создать термо- и радиационно устойчивые образцы кремния, обладающие высокой фоточувствительностью.

Результаты по оптимизации технологии изготовления МДП-структур, усовершенствованию методов исследования их свойств, теоретическому анализу поведения носителей заряда в них были использованы в специальных учебных курсах «Электроника, схемотехника и микропроцессорные инструменты» и «Цифровая электроника» Наманганского инженерно-технологического института (Справка Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан за № 89-03-2744 от 7 августа 2020 г). Использование полученных научных результатов в учебном процессе позволило развить научные представления студентов о создании полупроводниковых электронных изделий с уникальными физическими свойствами и областях их применения.

Апробация результатов исследования. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 6 международных и 11 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследований. По материалам диссертации опубликовано 32 научных труда, из них 2 монографии, 1 учебное пособие, 11 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка опубликованных работ, содержит 59 рисунков, 7 таблиц, список использованной литературы из 150 наименований и изложена на 198 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность исследования, определены связь актуальности исследований с перспективными направлениями науки и технологий, анализированы результаты международных исследований по теме диссертации, описаны уровень исследований, цели и задачи, научная новизна, методы исследований, краткие сведения о внедрении и апробации результатов работы и структуре диссертации.

В первой главе «Состояние исследований и перспективы развития полупроводниковых многослойных гетероструктур на основе Si» представлено основы технологических процессов получения структуры типа Al-SiO₂-Si, показано, что материал металлического электрода вносит существенные изменения в структурные параметры, отмечено, что разнообразность поверхностных состояний, влияние внешней среды на структурные свойства МДП- структур еще не изучено глубоко. Кремний может образовать ряд непрерывных твердых растворов замещения с фосфидами (AlP, GaP, InP), некоторыми арсенидами (AlAs, GaAs), сульфидами (ZnS, CdS) и ZnSe, но не образует непрерывный твердый раствор замещения с антимонидами (за исключением BSb), селенидами (за исключением ZnSe) и соединениями теллурида. Изучены результаты теоретических и экспериментальных исследований наличия примесных уровней по ширине запрещенной зоны кремния или образования нанокристаллитов на границах раздела субкристаллитов (блоков) эпитаксиального слоя кремния. Metalлооксидные полупроводники с успехом применяются в устройствах для преобразования механической энергии деформации в электрическую, электрической энергии в световую, а также в преобразователях солнечной энергии в электрическую. Таким образом, синтез новых металлооксидных материалов, и разработка различных преобразователей энергии на их основе имеют высокую научную и практическую значимость.

Во второй главе «Технология получения и методы исследования многослойных полупроводниковых структур на основе легированного кремния» рассмотрены свойства многослойных устройств на основе монокристаллов Si. Для получения образцов с необходимыми параметрами они легировались примесными атомами путем высокотемпературной диффузии. Для получения структур типа метал-оксид-полупроводник и кремний-металлоксид использовались кремниевых пластины с $\rho \sim 1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, диаметром 150 мм и толщиной 150÷300 мкм. Окисные слои SiO₂ получены отжигом при температурах 900÷1000 °С в течение времени роста слоя с необходимой толщиной. Качество полученных структур определялись исследованиями электрических, фотоэлектрических и C-V характеристик с использованием стандартных, апробированных методик. Для определения объемных свойств Si были использованы Шоттки диоды на основе Si, удаленного с поверхности окисного слоя или же неокисленные кремниевые

пластины. Анализ результатов этих исследований показал высокие качества полученных структур и существенное влияние объемных дефектов и примесных атомов на их свойства.

Выращены эпитаксиальные слои $(\text{SiGe})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ на подложке кремния с помощью технологической установки жидкофазной эпитаксии с вертикальными реакторами из висмутного раствора-расплава с принудительным охлаждением. Установка с вертикальным реактором состоит из следующих блоков: 1 - тепловой блок, 2 - реактор, 3 - блок управления, 4 - блок очистки газа, 5 - центрифуга (рис. 1.). Тепловой блок состоит из трех частей, каждый из которых, может регулироваться автономно. Блок управления содержит высокоточный регулятор температуры ВРТ (Р-111, И-102), при помощи которого можно проводить процесс охлаждения раствора-расплава автоматически по заранее заданной программе. Для предотвращения попадания неконтролируемых примесей из атмосферы в реактор процесс выращивания эпитаксиальных слоев осуществляется в атмосфере водорода. Очистка водорода осуществляется на установке "Палладий-2". Нами были использованы стандартные измерительные приборы, высокоточных технологических изделий для исследования некоторых физических свойств изготовленных $n\text{-Si-p-}(\text{SiGe})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ гетероструктур.

Принципиальная схема установки спрей-пиролиза показана на рисунке 2. Для синтеза пленок стannата цинка в качестве прекурсоров были выбраны ацетат цинка $(\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ и хлорид олова $[\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$. Ацетат цинка $(\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ был использован в качестве источника оксида цинка, а хлорид олова $[\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$ в качестве источника оксида олова при синтезе соединения Zn_2SnO_2 .

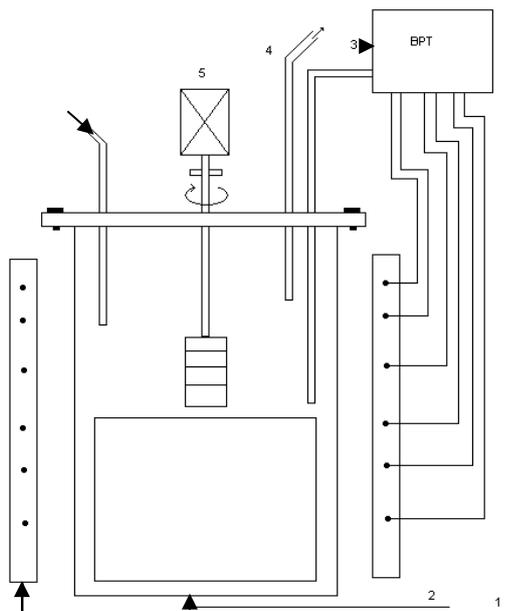


Рис. 1. Установка для жидкофазной эпитаксии типа ЭПОС

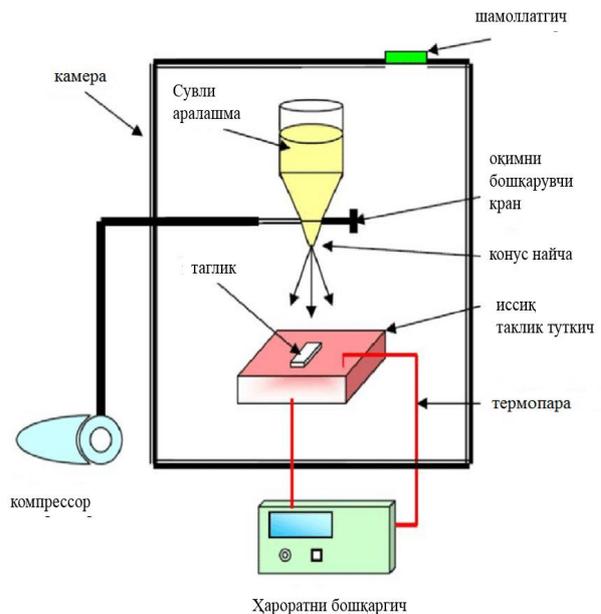


Рис. 2. Принципиальная схема установки спрей-пиролиза

Молярное соотношение ацетата цинка и хлорида олова в растворе подбиралось как 2:1. Рассчитанное количество хлорида олова и ацетата цинка растворялось в дистиллированной воде для формирования двух растворов. К раствору хлорида олова добавлялась соляная кислота HCl для предотвращения гидролиза соли. Режим нанесения многослойных пленок состоял из циклов 1,5 мин непрерывной подачи аэрозоля на поверхность разогретой подложки, паузы в 40 секунд до полного восстановления температуры поверхности подложки. Расстояние до подложки составляло 85 см. В итоге на поверхности подложки в один цикл формировался 1 слой, всего было сформировано 7 слоев пленок Zn_2SnO_4 .

В третьей главе, называемой «**Физические свойства МДП структур на основе легированного Si в зависимости от типа диэлектрического слоя и легирующий примеси**» обсуждаются результаты, измеренные на достаточно высоких частотах вольт-фарадные (C-V) зависимости МДП структур сравниваются с идеальными рассчитанными без учета поверхностных состояний C-V характеристиками. Наличие поверхностных состояний, а также заряда в окисле приводит к смещению C-V кривых МДП структур вдоль оси напряжений. Сравнивая две кривые, определяем зависимость смещения ΔV от V . Полный заряд на поверхностных состояниях Q_{ss} при заданном значении поверхностного потенциала ϕ определяется выражением

$$Q_{ss} = C_{ss}(\Delta V) \quad (1)$$

где, C_{ss} – емкость поверхностных состояний. Графически дифференцируя уравнение (1), получаем плотность поверхностных состояний на единицу энергетического интервала

$$N_{ss} = \frac{1}{q} \left(\frac{\partial Q_{ss}}{\partial \phi_{ss}} \right) \quad (2)$$

мы получили выражения, описывающие зависимость емкости МДП структур и падение напряжения на ней как функцию поверхностного потенциала. На рис. 3 приведена экспериментальная вольтфарадная характеристика (кривая 1) одной из МДП структур Al-SiO₂-Si, изготовленной методом термического окисления при температуре 900 °С в течение 60 минут исходной пластины кремния с удельным сопротивлением 15 Ом·см с кристаллографической ориентацией <100>. Емкость диэлектрика $C_0=1540$ пФ. Анализ показал, что экспериментальная C-V зависимость смещена по оси напряжений в сторону положительных значений напряжений на величину 1.9 В, что соответствует напряжению "плоских зон", C-V зависимости.

Таким образом, для определения плотности поверхностных состояний N_{ss} на границе раздела полупроводник-диэлектрик МДП структуры измеряем высокочастотную вольтфарадную характеристику исследуемой структуры и, сравнивая её с рассчитанными зависимостями, определяем ΔV . Плотность поверхностных состояний определяется из выражения

$$N_{ss} = \frac{C_0 \Delta V}{qS} \quad (3)$$

Такие процессы, как накопление статических зарядов в слое диэлектрика под действием ионизирующего излучения в МДП структурах, увеличение плотности поверхностной состояний N_{ss} и, как следствие, приводит к увеличению скоростей генерации и рекомбинации носителей заряда на границе диэлектрик-полупроводник. Основываясь на приведенных выше соображениях, распределение N_{ss} (рис. 4) по ширине запрещенной зоны кремния можно описать следующим образом.

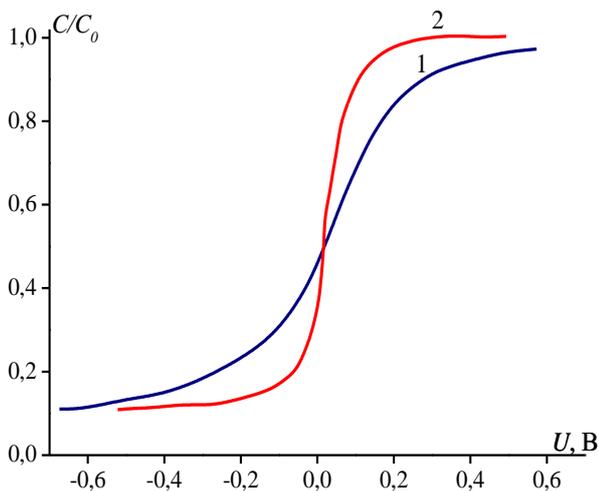


Рис. 3. Экспериментальная (1) и теоретические (2) рассчитанные вольтфарядные зависимости МДП - структур

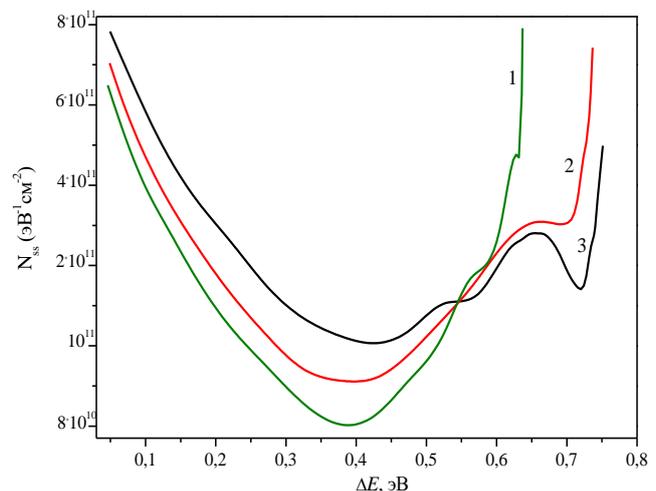


Рис. 4. Распределения N_{ss} по ширине запрещенной зоны кремния до (1) и после облучения Φ , n/cm^2 , $2 \cdot 10^{11}$ (2) и $1.2 \cdot 10^{12}$ (3).

Поверхностные состояния, соответствующие энергетическому зазору до $E = 0,1 eV$ ($E_c = 0$), находится в слое диэлектрика на расстоянии от границы раздела Si - SiO₂ и их плотность не изменяется под действием излучения. В диапазоне $E = (0,1 \div 0,5) eV$ значение N_{ss} соответствует случаям, когда частично затрудненные расщепления потенциала близки к пределу, а их плотность увеличивается с увеличением дозы облучения. Поверхностные состояния, соответствующие $E \geq 0,5 eV$, образованы заряженными центрами, расположенными в очень узком ($\sim 1 \mu m$) слое границы раздела в переходном слое Si-SiO₂.

Емкостная спектроскопия переходного слоя Si-SiO₂ в режиме непрерывной емкости, исследованная методом CC-DLTS показала, что распределение N_{ss} по ширине запрещенной зоны кремния после облучения электронами, зависит от распределения радиационных дефектов в переходном слое между Si и SiO₂.

Известно, что такое большое количество ($\sim 10^{19} cm^{-2}$) центров может перезаряжаться за счет изменения уровня квазиферми под воздействием температуры, которая существенно не меняет емкость слоя объемного заряда.

Таким образом, увеличение содержания C_3 указывает на увеличение поверхностного заряда и зарядов в SiO_2 (рис. 5). Наблюдаемое в эксперименте уменьшение R_3 указывает на то, что после облучения в слое SiO_2 появляются подвижные заряды, активизирующиеся при повышении температуры.

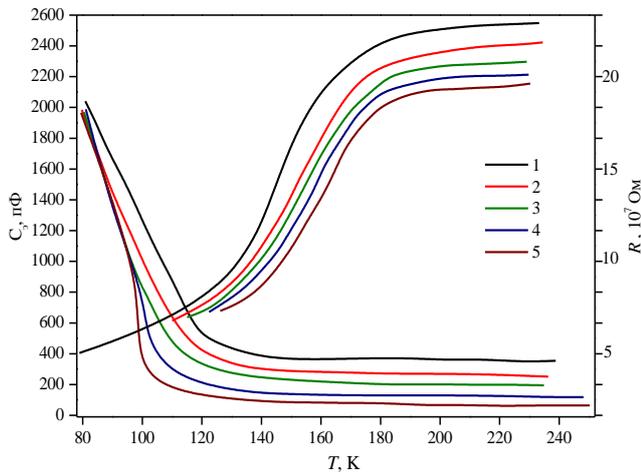


Рис. 5. Температурная зависимости C_3 и R_3 , полученные на разных частотах для одной из МДП структур 1 группы облученных дозой 10^6 рад (Si), 1-10 кГц; 2-30 кГц; 3-60 кГц; 4-90 кГц; 5-150 кГц

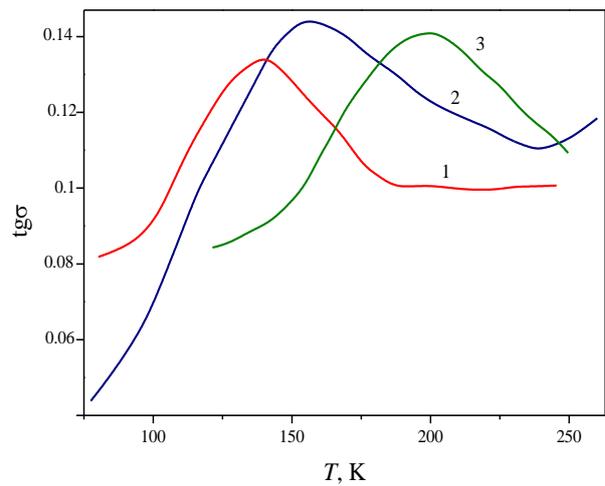


Рис. 6. Температурные зависимости $tg\delta$ при частотах 1-10 кГц; 2-90 кГц; 3-150 кГц

Примером наличия подвижных зарядов в слое SiO_2 облучаемых структур является возникновение гистерезиса при прямом и обратном измеренных зависимостей $C-V$ образцов. Если рассматривать МДП структур как RC-цепочка в режиме обогащения то при подаче на нее переменного сигнала диэлектрические потери мощности в ней рассеиваются по закону, определяемому тангенсом угла $tg\delta = (WRC)^{-1}$. Эксперименты показали, что наблюдается отчетливый максимум на релаксационном кривой в зависимости $tg\delta(T)$ (рис. 6). Исследование частотной зависимости N_{ss} в образцах первой группы показало, что $tg\delta(T_{max})$, (T_{max} - температура, при которой $tg\delta$ достигает максимального значения) имеет линейный характер. По этим линейным связям можно определить энергетическое состояние релаксационных максимумов с наибольшими диэлектрическими потерями структур МДП.

Четвертая глава «Исследование структурных особенностей и физических свойств многослойных полупроводниковых структур на основе кремния» посвящена результатам исследований структурных, морфологических и фотоэлектрических свойств гетероструктур $n\text{-GaAs-p-(SiGe)}_{1-x-y}\text{(GaAs)}_x\text{(ZnSe)}_y$. На рис. 7. представлена рентгенограмма подложки-монокристалла Si. Видно, что в дифракционной картине присутствуют несколько структурных рефлексов селективного характера с различной интенсивностью. Бета (β) составляющая структурной линии первого порядка $(111)_{\text{Si}}$ видна при угле рассеяния $2\theta = 25,7^\circ$, а третьего порядка при $2\theta = 83,3^\circ$. Большая интенсивность ($2 \cdot 10^5$ имп·сек $^{-1}$) основного рефлекса $(111)_{\text{Si}}$ и узкая

ширина ($\text{FWHM} = 3.49 \times 10^{-3}$ рад), свидетельствуют о достаточном совершенстве кристаллической решетки подложки.

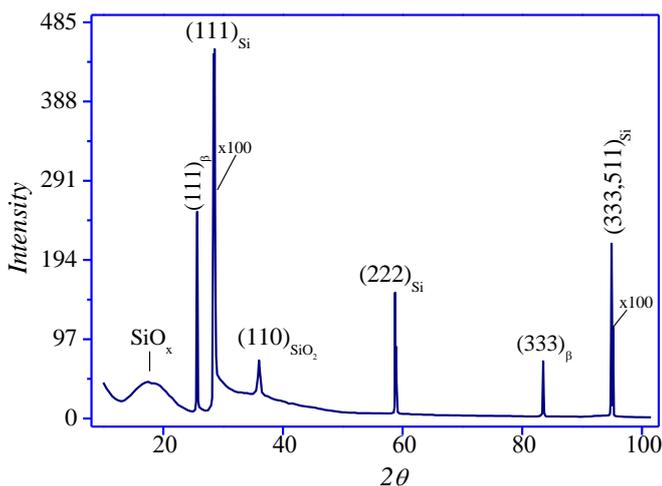


Рис. 7. Рентгенограмма подложки Si

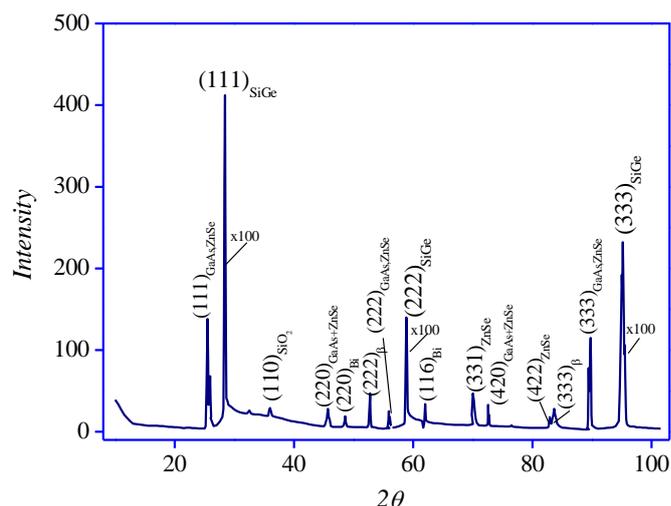


Рис. 8. Рентгенограмма структуры эпитаксиальной пленки $(\text{SiGe})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$

На рис. 8 представлена рентгенограмма выращенной эпитаксиальной пленки $(\text{SiGe})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ и она существенно отличается от рентгенограммы подложки. На рентгенограмме пленки диффузное отражение в малых углах рассеяния отсутствовало, интенсивность основного рефлекса (111) уменьшилась на $\sim 28\%$ по сравнению с интенсивностью этого рефлекса подложки, а интенсивность второго порядка (222) (запрещенное отражение) увеличилась в 110 раз, интенсивность третьего порядка (333) выросла на 59%. Интенсивность рефлекса (110) от примесной фазы кварца уменьшилась на 25%, уровень неупругого фона в малых углах рассеяния снизился на 37%, а в средних и дальних углах увеличился на 45%. Кроме того, появились новые селективные рефлексы с различными интенсивностями; $(111)_{\text{ZnSe+GaAs}}$ с $d/n = 3.440 \text{ \AA}$ ($2\theta = 25,9^\circ$), $(111)_{\text{SiGe}}$ с $d/n = 3.142 \text{ \AA}$ ($2\theta = 28,4^\circ$), $(220)_{\text{GaAs+ZnSe}}$ с $d/n = 2.001 \text{ \AA}$ ($2\theta = 45.19^\circ$), $(220)_{\text{Bi}}$ с $d/n = 1.868 \text{ \AA}$, $(222)_{\text{GaAs+ZnSe}}$ с $d/n = 1.631 \text{ \AA}$ $(116)_{\text{Bi}}$ с $d/n = 1.491 \text{ \AA}$ ($2\theta = 62.16^\circ$), $(331)_{\text{ZnSe}}$ с $d/n = 1.341 \text{ \AA}$ ($2\theta = 70,2^\circ$), $(422)_{\text{GaAs+ZnSe}}$ с $d/n = 1.158 \text{ \AA}$ ($2\theta = 83,7^\circ$), $(333)_{\text{GaAs+ZnSe}}$ с $d/n = 0.9422 \text{ \AA}$.

Узкая ширина ($\text{FWHM} = 2,620 \times 10^{-3}$ рад) и большая интенсивность ($2 \cdot 10^5 \text{ имп} \cdot \text{с}^{-1}$) основного рефлекса $(111)_{\text{Si+Ge}}$, свидетельствует о высокой степени совершенства кристаллической решетки твердого раствора, то есть выращенная пленка является монокристаллической с ориентацией (111). Размеры субкристаллитов (блоков) пленки, оцененные по ширине данного пика по методу Селякова–Шеррера², составили около 65 нм.

На рис. 9 показано трехмерное АСМ изображение эпитаксиальной пленки. Видно, что на поверхности образуются отдельные nanoостровки различного размера. Анализ показал, что диаметр основания островков

²Л.И. Гладких и др. Дифракционные методы анализа внутренних напряжений. Теория и эксперимент. Харьков: НТУ «ХПИ». 2006. С. 304.

варьируется в интервале от 50 до 90 нм, а высота от 3 до 12 нм. При эпитаксиальном наращивании различных полупроводниковых материалов, энергия деформации, вызванная несоответствием параметров кристаллической решетки контактирующих полупроводников, является основным фактором, для формирования самоорганизующихся трехмерных островков. Поскольку рассогласование постоянных решеток для систем $\text{SiGe}_{1-x}\text{GaAs}_x/\text{ZnSe}$ составляет (3,67%), то это является возможно причиной формирования квантовых точек типа ZnSe. Размеры наностроек (квантовых точек), определенные исследованиями АСМ на поверхности пленки (рис. 9) и нанокристаллитов, определенные из диффрактограммы (рис. 8) полученной эпитаксиальной пленки имеют близкие значения.

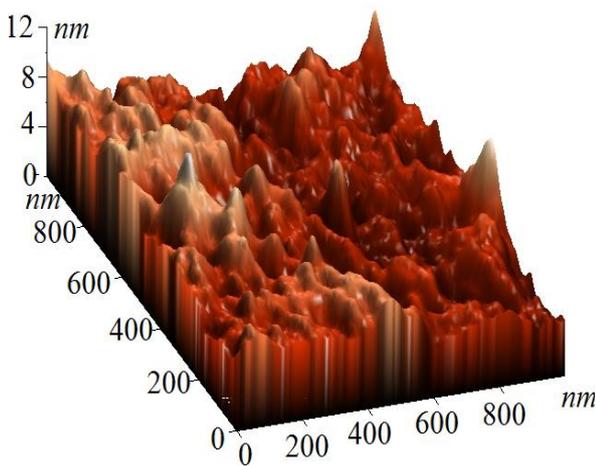


Рис. 9. АСМ изображение эпитаксиального слоя твердого раствора $\text{SiGe}_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$

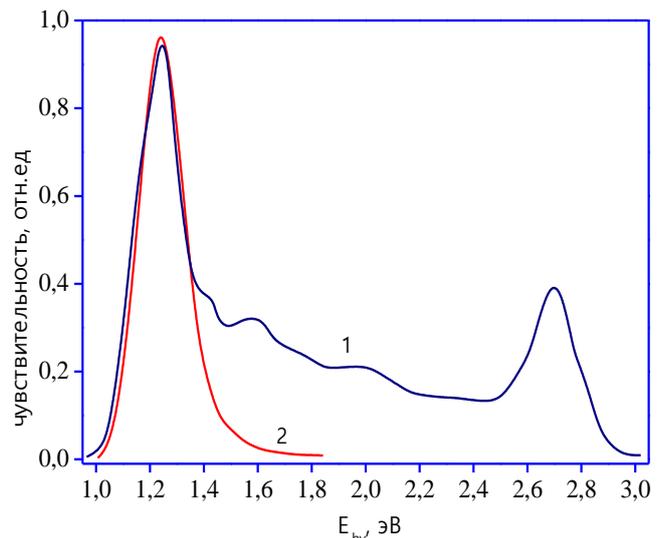


Рис. 10. Спектральная зависимость фоточувствительности структуры $n\text{-GaAs-p-SiGe}_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ (1) и $n\text{-Si-p-Si}$ (2), от толщины эпитаксиальных слоев 10 мкм

Спектральные зависимости чувствительностей, приведенные на рис.10, снимались при толщине эпитаксиального слоя ≈ 10 мкм для одной серии образцов твердого раствора с распределением компонентов на поверхности пленки $(\text{SiGe})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$. Для сравнения, на рисунке приведена спектральная зависимость чувствительности $n\text{Si} - p\text{Si}$ структуры (кривая 2, рис. 10) с эпитаксиальным слоем из $(\text{SiGe})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ толщиной 10 мкм. Видно, что молекулы GaAs обуславливают повышение чувствительности структуры в коротковолновой области спектра с энергией фотонов $E_{ph} \geq 1,45$ эВ. Наблюдается также небольшое расширение спектральной чувствительности в длинноволновую сторону, обусловленное присутствием в гетероструктурных атомов Ge.

Максимальная фоточувствительность наблюдается при энергии фотонов 1,23 эВ (рис. 10.), что, возможно, обусловлено шириной запрещенной зоны твердого раствора $(\text{SiGe})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$. На спектре фоточувствительности исследованной структуры в интервале энергии фотонов от 2,4 до 3 эВ явно

проявляется пик чувствительности при 2,68 эВ (рис. 10.), который возможно обусловлен широкозонной компонентой ZnSe. Известно, что ковалентная связь атомов молекул ZnSe в чистом полупроводниковом материале ZnSe равна $E_{g,ZnSe} = 2.70$ эВ, прочнее, чем связь Ga-As и Ge-Ge. Но, когда молекула ZnSe замещает молекулы GaAs или Ge₂ в тетраэдрической решетке твердого раствора, связь Zn-Se ослабевает под влиянием окружающих ее атомов Ga, As и Ge.

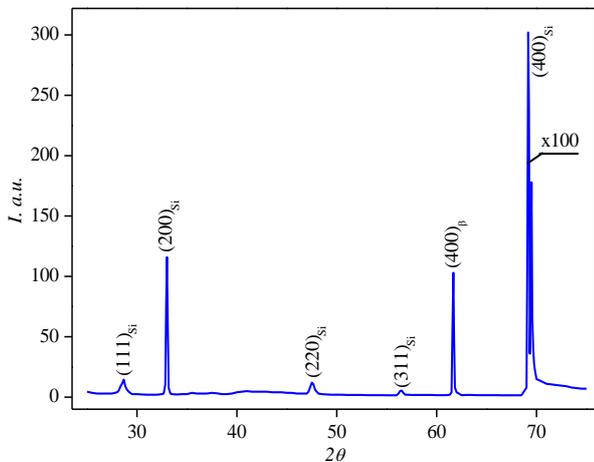


Рис. 11. Рентгенограмма подложки *p* – Si

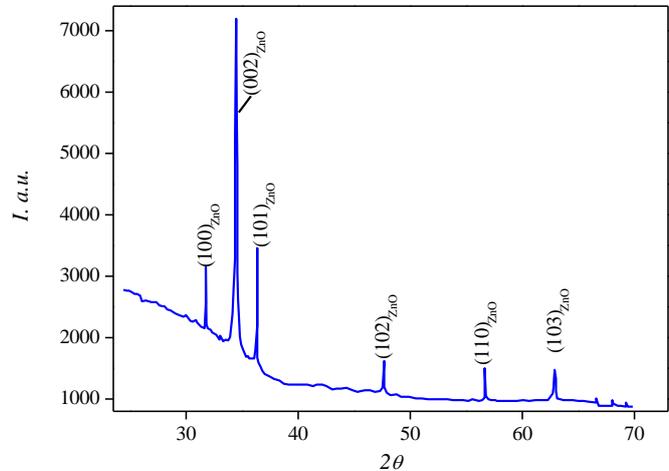


Рис. 12. Рентгенограмма полученной пленки ZnO

В пятой главе «Структурные особенности и физические свойства металлооксидов» представлены результаты исследований структурных особенностей, поверхностные и фотоэлектрические характеристики металлооксидов, и измерение их фото-, термо- и газочувствительных свойств. На рис. 11 представлена рентгенограмма подложки *p* - Si. Видно, что в дифракционной картине присутствуют несколько структурных рефлексов селективного характера с различной интенсивностью. Большая интенсивность ($2 \cdot 10^5$ имп·сек⁻¹) и узкая ширина ($FWHM = 3,29 \cdot 10^{-3}$ рад) дифракционного отражения (400) свидетельствуют о совершенстве кристаллической решетки подложки. Кроме того, только рефлекс (400) наиболее подходит для определения параметра решетки подложки, так как он самый интенсивный и узкий. Экспериментальное значение параметра решетки подложки составляло $a_s = 0,54292$ нм.

На рис. 12 представлена рентгенограмма полученной пленки ZnO и она существенно отличается от рентгенограммы подложки *p*-Si. На рентгенограмме пленки в малых углах рассеяния появилось широкое диффузное отражение селективными рефлексами от плоскости (111) с $d/n = 0,2774$ нм ($2\theta = 31,7^\circ$), (002) с $d/n = 0,2723$ нм ($2\theta = 32,97^\circ$) и (101) с $d/n = 0,249$ нм ($2\theta = 36,34^\circ$). Видно что, структурная линия (002) с $d/n = 0,2723$ нм ($2\theta = 32,97^\circ$) является с самой сильной интенсивностью ($\sim 10^5$ имп·с⁻¹) и узкой шириной ($FWHM = 2.62 \cdot 10^{-3}$ рад). Это свидетельствует о высокой степени

совершенства кристаллической решетки³. Анализ экспериментальных данных этого пика показал, что структура относится к пространственной группе $C6/mmc$ и кристаллическая решетка имеет гексагональную сингонию со структурой вюрцита (причем связь между атомами подрешетки цинка осуществляется через атомы кислорода) с параметрами $a = 0.3265$ нм и $c = 0.5212$ нм при комнатной температуре. Размеры субкристаллитов, оцененных по ширине данного пика, составили $L_{ZnO} \approx 67$ нм.

На рис. 13 приведены изображения микрорельефа и профиль распределения неоднородностей поверхности тонкопленочного гетероперехода $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$. На исследованной площади перепад высот рельефа составляет порядка 14 нм. По профилю распределения высот неоднородностей можно визуальнo оценить размер поверхностных агломератов, находящихся на поверхности образца, который составляет от 10 до 18 нм. При анализе образцов $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$, было выяснено, что при увеличении доли оксида цинка в образцах шероховатость поверхности пленки снижается.

На рис. 14 показано один из типичных форм фотолюминесцентной спектроскопии гетероструктуры ZnO/Si при комнатной температуре. В спектрах фотолюминесценции наблюдаются только сильный, ближний краевой пик излучения при 377 нм, обусловленный переходами пары донор-акцептор. Однако отсутствие каких-либо других эмиссионных пиков различных типов дефектов (например, эмиссия зеленой полосы из-за кислородной вакансии в пленке ZnO при ~ 550 нм) в характеристике фотолюминесцентных гетероструктур указывает на то, что выращенная пленка ZnO практически свободна от дефектов и является гетероструктурой с повышенным свойством УФ-детекции при ~ 377 нм.

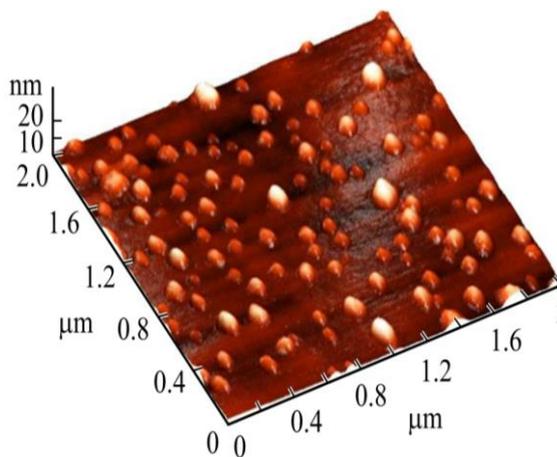


Рис. 13. АСМ изображение тонкопленочного гетероперехода $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$

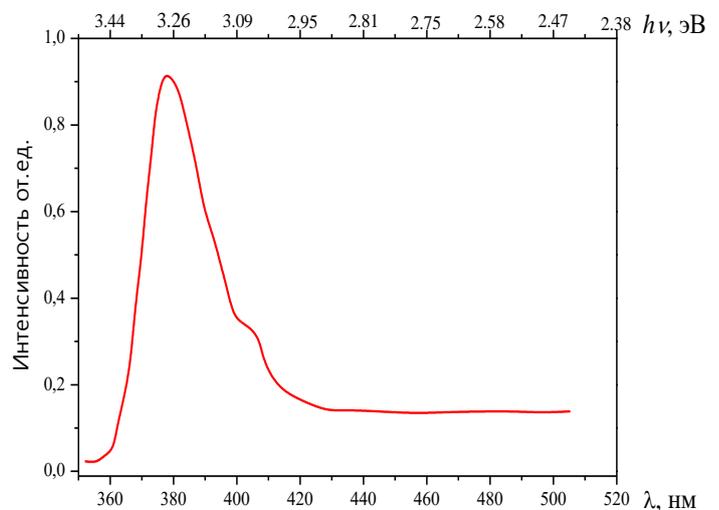


Рис. 14. Спектр фотолюминесценции пленки ZnO

³И.Л.Шулпина и др. Журнал технической физика, 2010. Т. 80. № 4. С. 105.

Таким образом, спектры фотолюминесценции показывают, что приведенные условия являются оптимальными для выращивания высококачественного слоя ZnO на Si практически без дефектов в видимой области. Такие параметры предлагаемых гетераструктур представляются перспективными для применений в высокопроизводительных и недорогих коммерческих УФ-детекторов.

На рис. 15 представлены зависимости $R(V)$, датчиков полученные до отжига. Нужно отметить, что сопротивления как при нагрева, так и при охлаждении не возвращаются к исходным значениям. Разница в значениях сопротивления (чувствительный элемент) ЧЭ составляет 115 % (52 кОм). Затем проводился изотермический отжиг при $T_{\text{const}} = 370^\circ\text{C}$. в течение 4 ч. Время отжига датчика после хранения может колебаться от получаса до нескольких часов непрерывного воздействия высокой температуры.

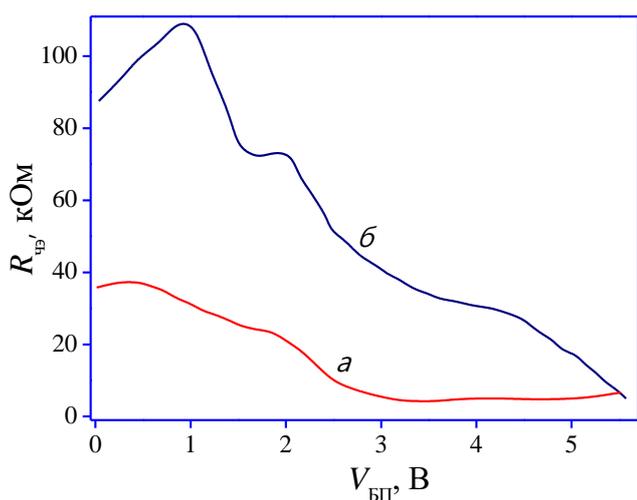


Рис. 15. Зависимость $R_{\text{чЭ}}$ от напряжения на нагревателе V_{BP} при нагреве (а) и охлаждении (б), проведенных до отжига датчика

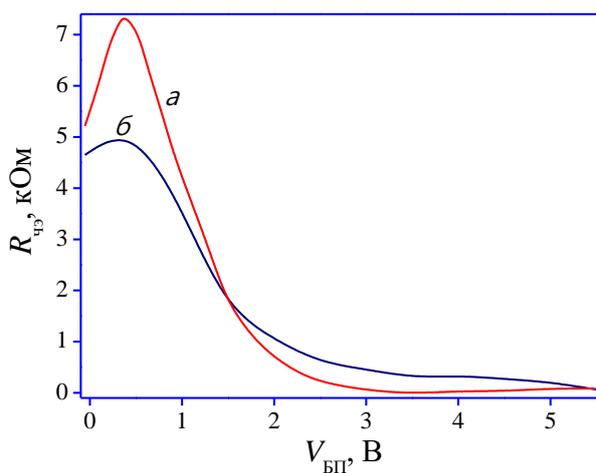


Рис. 16. Зависимость $R_{\text{чЭ}}$ от напряжения на нагревателе V_{BP} при нагреве (а) и охлаждении (б), проведенных после отжига датчика.

Также была исследована зависимость значений $R_{\text{чЭ}}$ от V_{BP} после изотермического отжига (рис. 16). Установлено, что в результате отжига сопротивление чувствительного элемента после нагрева и охлаждения возвращается к исходному. Однако по сравнению со значениями, полученными до отжига, сопротивления возрастает более чем на три порядка.

Исследовался датчик газов с нанесением легирующего вещества с концентрацией 1Н. Результаты влияния примеси AgNO_3 и режимов работы на чувствительность испытуемого образца приведены на рис. 18. Кривую приведенную на рис. 18. можно разделить на 3 части: I - крайняя левая, II - центральная/средняя, III - крайняя правая. В 1й части продемонстрировано стационарное состояние датчика газов без каких-либо внешних воздействий. Во второй части графика производился ввод двух токсичных газов. Из поведения кривой на этом участке видно, что сенсорная пленка имеет пик чувствительности при комнатной температуре (реакция на аммиак). Затем, на

участке 3, осуществлялась подача напряжения в интервале от 0,5 В до 5 В с шагом в 0,5 В. Из поведения кривой видно, что происходит отжиг поверхности

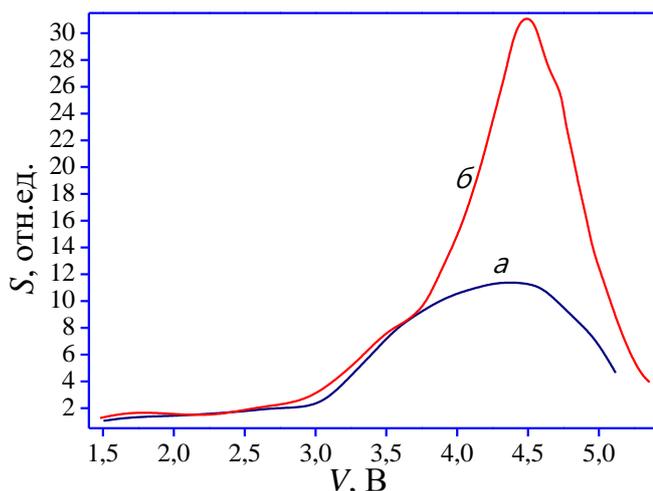


Рис. 17. Влияние легирования (1Н раствор) на чувствительности к парам спирта $C_s=3000$ ppm от напряжения на датчике газов. ((б) до, после (а) легирования)

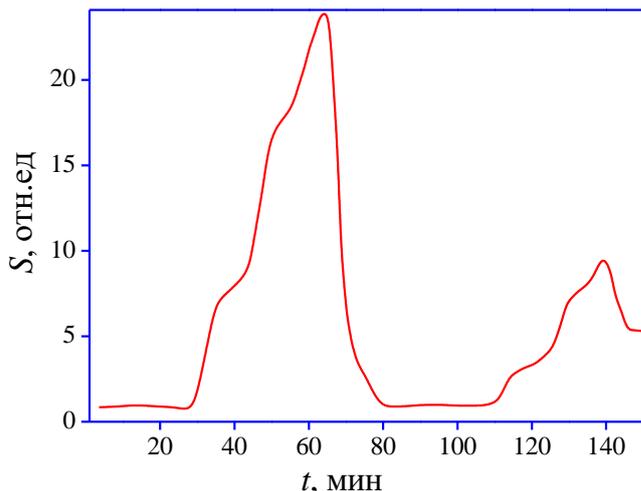


Рис. 18. Чувствительность датчика газов легированного серебром к смеси двух типов газов - спирт (2000ppm) и аммиак (2000 ppm).

чувствительного элемента и его термостабилизация. А при значении напряжения $V=5$ В проявляется второй пик, отвечающий за реакцию полупроводниковой пленки SnO_2 на пары спирта.

В результате исследований была отработана методика локального легирования сенсорных слоев SnO_2 , в микроэлектронном датчике. Показано, что сенсорные слои SnO_2 , легированные AgNO_3 чувствительны к парам аммиака при комнатной температуре. Определен вид зависимости газовой чувствительности от концентрации аммиака в интервале $500 \div 5000$ ppm. Выявлены пороги чувствительности пленок SnO_2 , легированных 1Н-раствором которые составили 500 ppm аммиака в воздухе. Опытным путем, доказана селективная реакция микроэлектронного датчика на пары двух токсичных газов одновременно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных экспериментальных исследований и анализа литературных данных, а также сравнивая их с существующими теоретическими представлениями физических основ образования квантовых нанобъектов на граница раздела МДП-структуры и многослойные и металлооксидные гетероструктуры, их влияния на свойства гетероструктуры на основе монокристаллического кремния можно сделать следующие выводы:

1. Оптимизирована технология создания МДП структур на основе Si методом термического окисления. Определено, что легировано Si примесями

Rh и Ir увеличивает плотность поверхностных состояний и на энергетическом распределении N_{ss} образованию энергетических пиков при $E_c-0,15\pm 0,03$ эВ, $E_c-0,34\pm 0,03$ эВ, и $E_c-0,55\pm 0,03$ эВ соответствующих энергиям ионизации атомов Rh и Ir в кристаллической решетке Si и что они являются эффективными генерационными центрами поверхностных состояний.

2. Анализ вольт-фарадных характеристик исследуемых образцов показал, что плотность поверхностных состояний распределены равномерно по ширине запрещенной зоны Si термическая обработка при низких температурах (200-400°C) уменьшают пики при состояниях $E_c-0,11$ эВ, ва $E_c-0,16$ эВ. Качественная обработка поверхности Si перед окислением уменьшает величину N_{ss} .

3. Показано возможность улучшения параметров МДП структур и электронных изделий на их основе путем оптимизации условий термообработок, электронного и γ -облучения, обуславливающих управления величиной и распределением N_{ss} на граница раздела полупроводник-диэлектрик, полупроводник-полупроводник, а также поведением фиксированных и подвижных зарядов в диэлектриках.

4. При γ -облучении дозой 10^6 рад при температурах в области 80-270 К и частотах 30-150 кГц и при измерениях температурной зависимости $tg\delta$ в облученных МДП структурах определены присутствии пиков с энергиями активации 0,11 эВ и 0,26 эВ, которые могут быть объяснены с помощью модели диэлектрической релаксации Дебая.

5. впервые получены квантовые точки (куполообразные нанострочки) селенида цинка, которые имеют сфалеритную структуру с параметрами $a = 5.4535$ Å и являются монокристаллическими с ориентацией (111) на поверхности и на границе раздела субкристаллитов (блоков) твердого раствора $(SiGe)_{1-x-y}(GaAs)_x(ZnSe)_y$ методом жидкофазной эпитаксии.

6. обнаружено, что химический состав, изменяющие в пределах $0 < y < 0.08$, механизмы образования нанокристаллитов GaAs размерами 48 нм и ZnSe квантовых точек размерами 65 нм в объеме и на поверхности твердого раствора $(SiGe)_{1-x-y}(GaAs)_x(ZnSe)_y$, а также их плотность, геометрическая форма и размеры квантовых нанообъектов зависят от технологических режимов (интервала температуры выращивания и скорости охлаждения).

7. Проведенные исследования структуры, электрофизических характеристик и спектров fotocувствительности $n-Si-p-(SiGe)_{1-x-y}(GaAs)_x(ZnSe)_y$ гетероструктур показывают, что полученные пленки обладают избирательной fotocувствительностью, обусловленной компонентами GaAs, Ge, ZnSe в Si с отличающимися значениями энергий ионизации соответствующих молекул.

8. Определены, что гетероструктуры на основе твердые растворы $(SiGe)_{1-x-y}(GaAs)_x(ZnSe)_y$ имеют возможность создание селективного фотоприемника, работающего в ближней ИК и видимой (1300÷400 нм) частях спектра излучения.

9. Полученные пленки ZnO на кремнии имеют гексагональную сингонию и вюрцитную структуру и являются монокристаллическими с кристаллографической ориентацией (100) и параметрами $a = 0.3265$ нм и $c = 0.5212$ нм, с размерами блоков 67 нм и нанокристаллы ZnO с кристаллографической ориентацией (100) на поверхности пленки имеют средний характерный размер $L_{\text{ZnO}} \approx 84$ нм.

10. Определены возможности металлооксидных слоев n-ZnO, для применения в устройствах для преобразования механической энергии деформации в электрическую, электрической энергии в световую, а также в преобразователях солнечной энергии в электрическую. Эти материалы обладают экологически чистотой, доступностью и невысокой ценой.

11. Легирование сенсорных слоев SnO₂ серебром позволяет улучшить метрологические характеристики образцов и делает возможным их использования для создания селективных индикаторов токсичных и взрывоопасных газов.

**SCIENTIFIC COUNCIL FOR AWARDING SCIENTIFIC DEGREES
DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 UNDER SCIENTIFIC RESEARCH
INSTITUTE OF SEMICONDUCTORS PHYSICS AND
MICROELECTRONICS OF THE NATIONAL UNIVERSITY OF
UZBEKISTAN**

ANDIJAN STATE UNIVERSITY

YULCHIEV SHAKHIYOR KHUSANOVICH

**PROCESSES IN THE MULTILAYER SEMICONDUCTOR STRUCTURES
BASED ON DOPED SILICON**

01.04.10 - Physics of semiconductors

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF OF SCIENCE (DSc)
ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

Tashkent - 2020

INTRODUCTION (abstract of a doctoral (DSc) dissertation)

The actuality and demand of the theme of dissertation. Currently, scientific research in the field of semiconductor materials science and electronic instrumentation is developing at an enormous pace. This is due to the intensive use of semiconductor devices in micro-and nanoelectronics, increasing the need for further expansion of their types and functionality. Metal-dielectric-silicon-based semiconductor structures, thin-film, multi-layer semiconductor and metal oxide layers of heterogeneous structures that form the basis of modern microelectronics remain the main elements in various sectors of the economy, from household appliances to military equipment, aerospace, communication systems, and others. The main physical processes that guarantee the quality and reliability of such devices are the nature of surface states present at the boundaries of layers, on their surface, as well as their changes under various external influences. One of the important tasks in the study of charge transfer processes in MDS structures, in multilayer semiconductor-dielectric, thin semiconductor structures in the regions between the base (Si) and their constituent layers in silicon-metal oxide heterojunctions is to study the nature of these States. It is known that the main properties of MDS structures, in addition to the surface States, largely depend on the properties of Si and dielectric layers. Studies of the technology for forming SiO₂ dielectric layers have shown that the bulk properties of silicon-based many electronic products significantly affect the principles of operation of transistors, integrated circuits and other microelectronic devices. However, the creation of technologies for obtaining of such structures with the given parameters is still a problem.

The world's leading research centers conduct extensive research on the technology and properties of heterostructures obtained by growing two or more thin films of complex, multi-layer semiconductors A²B⁶, A³B⁵, Ge, Si, GaAs and other single crystals. In addition to the usual conditions of a pure point surface, quantum nanostructures, nanoyams, and other still unexplored states have been found at the interface of such multi-layer structures. However, the conditions under which such States occur, their nature, composition, and influence on the behavior of charge carriers in these structures have not yet been established. However, there is information about the possibility of obtaining unique characteristics of electronic devices, high-performance solar cells and laser devices by optimizing the technology for obtaining components of such multi-layer structures, thickness and number of layers. Another important direction is to improve the technology for producing metal oxides such as ZnO, SnO₂, there by expanding the spectrum of light absorption to violet and ultraviolet radiation. To increase the efficiency of converting solar energy into electrical energy by changing the composition of metal oxides and adding atoms of impurity elements, to create opportunities to increase sensitivity to individual gases and use these properties in the production of military equipment, medical, agricultural and household equipment.

The degree of knowledge of the problem. Although it is generally recognized that the high achievements of microelectronics today are due to electrophysical processes at the boundaries of the Si-SiO₂ transition of metal-dielectric-

semiconductor structures, according to Sah S. T., Crove A.S. and Size S. M (USA). However, these possibilities are still not fully explored. This is due to the formation of thermal defects in the MDS structures obtained by thermal oxidation, the complexity of accurate modeling of the interface, the presence of uncontrolled, fixed and mobile charges in the SiO₂ dielectric layer. Y. Tachi, N. Sugiyama, and others, Russian scientists A. S. Berman, A. Lebedov, and Uzbek scientists S. I. Vlasov, I. Karimov argued that the determination of parameters of such devices is not theoretically solved, and that there are still a number of unresolved issues in the technology of obtaining these structures.

Russian scientists A. K. Valiev, Zh.I. Alferov, H. Rossel from Germany, Uzbek scientists M.S. Saidov, R.A. Muminov and others based on heterostructures have created powerful lasers, effectual solar cells and other electronic and optoelectronic devices to study technologies for producing thin semiconductor, dielectric and metal films based on silicon, properties of formed two - and multi-layer heterostructures and their application in practice. Scientific and practical research has shown that the development of this direction can turn the XXI century into a century of heterostructures, mainly due to the improvement of technologies for obtaining new structures, in-depth study of their physical properties (Zh. I. Alferov).

Due to the simplicity and convenience of production technologies, metal oxide materials are of great interest to many scientists, for example, Japanese scientists Yushi Shichi, Satoshi Tanimato, grew TiO₂, ZrO₂ and ZnO on silicon and created heterojunction devices that are sensitive to external temperature and light. A group of researchers headed by Russian scientists S.I. Rembeza have developed several methods for the production of metal-oxide heterojunctions based on silicon. The possibility of creating highly sensitive sensors, recorders and solar cells by optimizing their structural composition and technologies is shown. At the same time, they noted that there are opportunities to create unique electronic devices for various purposes by changing the composition of metal oxide and improving the extraction technology.

The aim of the research is to develop technologies for producing metal-dielectric-semiconductor, multicomponent and metal-oxide multilayer thin semiconductor films based on silicon, study their structural, electrophysical and photoelectric properties and determine their practical application.

The scientific novelty of the research work is:

it was found that the doping of Rh and Ir atoms leads to an increase in the surface state density values at the Si-SiO₂ interface of these structures and the coincidence of the energy positions of peaks on the surface state density spectrum with the ionization energies of deep centers;

effects of gamma irradiation with a dose of 10⁶ rad on the dielectric behavior of wet chlorine-free and chlorine-free thermal oxide at temperatures in the range of 80-270 K and frequencies of 30-150 kHz. After irradiation with gamma-quanta, new relaxation peaks with activation energies of 0.11 eV and 0.26 eV appear on the tgδ distribution spectrum;

it is shown that the processing of heat waves, electron and gamma quanta opens up opportunities to improve the characteristics of MDS structures and electronic devices based on them by controlling the state of the Si-SiO₂ interface by the energy of surface States, their distribution by density, and the nature of fixed and mobile charges in the dielectric layer;

for the first time, nanocrystallites (quantum dots) of zinc selenium on the surface and the interface of subcrystallites (blocks) of solid solution (SiGe)_{1-x-y}(GaAs)_x(ZnSe)_y by liquid phase epitaxy;

it was found that the chemical composition and mechanisms of formation of GaAs and ZnSe nanocrystallites of quantum dots in the volume and volume of a solid solution (SiGe)_{1-x-y}(GaAs)_x(ZnSe)_y, as well as their density, shape and size of quantum nanoobjects depend on the technological mode (the range of growing temperature and cooling rate);

the structure, electrophysical characteristics and photosensitivity spectra of n-Si-p(SiGe)_{1-x-y}(GaAs)_x(ZnSe)_y heterostructures showed that the obtained films have selective photosensitivity due to the components GaAs, Ge, ZnSe in Si with different values of the ionization energy of the corresponding molecules;

the resulting ZnO films on silicon have a hexagonal syngony and wurzite structure with parameters $a = 0.3265$ nm and $c = 0.5212$ nm, with block sizes of 67 nm, and ZnO nanocrystals on the film surface have an average characteristic size of $L_{\text{ZnO}} \approx 84$ nm;

determination of the possibility of using n-ZnO metal oxide layers in devices for converting mechanical deformation energy into electrical energy, electrical energy into light energy, as well as in solar energy to electrical energy converters;

the doping of SnO₂ sensor layers with silver in gas sensors improves the metrological characteristics of samples and determines whether they can be used to create selective indicators of toxic and explosive gases.

Scientific and practical significance of the research results. The scientific significance of the results is to determine the mechanisms of charge transfer in multilayer heterostructures, electrophysical and photoelectric processes in these devices, scientific and theoretical justification of the nature of selective sensitivity of metal oxides.

The practical significance of the research results is the specific technological conditions for the production of electronic devices and integrated circuits based on electronic structures, photodetectors, gas sensors of high-performance multifunctional electronic products, solar cells based on multilayer heterostructures.

Application of the research results. The main results of the work were reported and discussed at 6 international and 11 national scientific and practical conferences.

The structure and volume of dissertation. The dissertation consists of an introduction, five chapters, 59 figures, 7 tables, conclusion, and 150 references. The volume of the dissertation is 198 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть, part I)

1. Ш.Х. Йўлчиев. Синтез и свойства многослойных полупроводниковых гетероструктур. Ташкент: Изд. «Фан» 2020. 136 с.
2. С.З.Зайнабидинов, Ш.Х.Йўлчиев. Кремний асосидаги металл–диэлектрик–яримўтказгич тузилмалар физикаси. Тошкент: «Фан» 2019. 146 Б.
3. Sh.Kh. Yulchiev. Current transfer mechanism in heterostructures n-Si-p-(SiGe)_{1-x-y}(GaAs)_x(ZnSe)_y. // Journal of Scientific and Engineering research. 2020. - Vol. 7(7). -P.122-126. (№ 5 GIF, IF: 0.543).
4. S. Zainabidinov, S.I. Rembeza, E.S. Rembeza and Sh.Kh. Yulchiev. Prospects for the Use of Metal-Oxide Semiconductors in Energy Converters. // Applied Solar Energy. 2019. -Vol. 55, No. 1, -P. 5–7. (01.00.00 №9. IF: 0.47)
5. П.Б.Парчинский, Л.Г.Лигай, Х.Ж.Мансуров, Ш.Х.Йулчиев. Исследование влияния γ -облучения на температурную зависимость скорости поверхностной генерации неосновных носителей заряда на границе раздела кремний-диоксид кремния. // Письма в ЖТФ. –Ленинград, 2005. -Том 31, - Вып.7. -С. 40-44. (№ 2 JIF, IF: 0.771).
6. В.Е. Полковников Д.С. Пермяков, М.А. Белых, Ш.Х. Йулчиев, С.И. Рембеца. Использование пиролитических металлооксидных пленок для изготовления фотоэлектрических преобразователей энергии. // Вестник Воронежского государственного технического университета. - Воронеж, 2019. -Т.15. - № 5. -С. 72-77. (РИНЦ, IF: 0.421)
7. Х.С. Далиев, Ш.Х. Йулчиев. Состояние исследований и перспективы развития полупроводниковых многослойных гетероструктур на основе Si. // Физика полупроводников и микроэлектроники. – Ташкент, 2019. -№ 6. -С. 10-15. (01.00.00 № 19)
8. A.S. Saidov, S.Z. Zainabidinov, Sh.Kh. Yulchiev, A.Y. Boboev, D.P. Abdurakhimov. Growth and investigation of the (GaAs)_{1-x-y}(Ge₂)_x(ZnSe)_y semiconductor alloy. // Scientific Bulletin Physical and Mathematical Research. – Andijan, 2020. - № 1. - P 5-11. (01.00.00 № 13).
9. С.З. Зайнабидинов, Х.С. Далиев, Ш.Х. Йулчиев, А.Й. Бобоев, Н.Ю. Юнусалиев. Структурные особенности металлооксидных пленок ZnO на основе кремния. Доклады Академии Наук. - Тошкент, 2020. - № 3. - С. 21-24 (01.00.00 № 7).
10. Х.С. Далиев, Ш.Х. Йулчиев, Х.Ж. Мансуров. Влияние примесных атомов родия и иридия на ёмкостные характеристики Si-SiO₂ структур. //Физика полупроводников и микроэлектроники. – Ташкент, 2019. - № 2. -С. 10-15. (01.00.00 № 19)
11. Ш.Х. Йулчиев. Морфологические исследования n-Si-p-(SiGe)_{1-x-y}(GaAs)_x(ZnSe)_y гетероструктур. // Научный вестник НамГУ.- Наманган, 2020. - №3. - С. 19-23 (01.00.00 № 17).

12. Ш.Х. Йўлчиев, В.А. Абдуазимов, А.Й. Бобоев. Роль компонентов МОП-структур в формировании их физико-химических свойств. // Научный вестник АндГУ. - Андижон, 2018. - № 3. - С. 23-25. (01.00.00 № 13).

13. С.З. Зайнабидинов, А.Й. Бобоев, Ш.Х. Йўлчиев. Исследования структурных состояний твердого раствора $(\text{GaAs})_{0,69}(\text{Ge}_2)_{0,17}(\text{ZnSe})_{0,14}$. // Доклады Академии Наук. - Тошкент, 2019. - № 1. - С. 21-24 (01.00.00 № 7).

II бўлим (II часть; part II)

14. С.З.Зайнабидинов, Ш.Х.Йўлчиев, Д.Назирова, М.Носирова. Яримўтказгичларда атомлар диффузияси. Тошкент: “Ўзбекистон файласуфлари миллий жамияти” нашриёти, 2012. 174 Б.

15. С. Зайнабидинов, И. Каримов, М.Носирова, Ш. Йўлчиев. Конденсирланган ҳолатлар физикасидан изоҳли луғат. “Ўзбекистон файласуфлари миллий жамияти” нашриёти, Тошкент- 2019 йил. 263 бет.

16. С.Зайнабидинов, Ш.Х.Йўлчиев, Д.Қодиров, Б.Мусаев. Кремнийда атомлар диффузиясининг айрим хусусиятлари. // АДУ Илмий Хабарнома. – Андижон, 2012. - № 2. 13-16 Б.

17. Зайнабидинов С.З., Йўлчиев Ш.Х., Бобоев А.Й., Усмонов Ж.Н., Маҳмудов Х.А. Structural characteristics of $n\text{-GaAs-p}(\text{GaAs})_{0,69}(\text{Ge}_2)_{0,17}(\text{ZnSe})_{0,14}$ heterostructures.«Инновационные идеи, разработки и современные проблемы их применения в производстве а также в обучении». // Матер.международ.науч.- практ.конф. - Андижан, 2019. -С. 252-253.

18. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Йўлчиев Ш.Х. Температурные зависимости электрических свойств $n\text{GaAs-p}(\text{GaAs})_{0,3}(\text{ZnSe})_{0,47}(\text{Ge}_2)_{0,23}$ ($0 \leq x \leq 0,47, 0 \leq y \leq 0,23$) гетероструктур. // Труды 1-Международного конгресса тюркского мира по естественным наукам и медицине.-Ош, 2019. -С. 86-87

19. С.Зайнабидинов, Ш.Х.Йўлчиев Х.Ж.Мансуров, А.Й. Бобоев. Особенности выращивания эпитаксиального слоя твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ // “Возобновляемые источники энергии и устойчивая окружающая среда” Труды Российско-узбекского международного научно-методического семинара. - Воронеж, 2019. - С. 85-89.

20. Ш.Х.Йўлчиев, Ж.Н.Усмонов, П.Абдурахимов, М.И. Уринбоев. Структурные особенности твердого раствора $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$. // “Возобновляемые источники энергии и устойчивая окружающая среда” Труды Российско-узбекского международного научно-методического семинара. - Воронеж, 2019. - С. 100-103

21. С.И. Рембеза, Е.С.Рембеза, Ш.Х. Йўлчиев. Перспективы применения металлооксидных полупроводников в преобразователях энергии. // RENES: “Қайта тикланувчи энергия манбалари ва барқарор атроф-муҳит соҳасида Магистерлик дастурини ишлаб чиқиш” лойиҳаси доирасидаги халқаро илмий-амалий семинар мақолалари тўплами. - Гулистон 2019. 26-31 Б.

22. Ш.Х.Йўлчиев, А.Икромов, А.Акбаров, Ш. Акбаров. Никель киришмаларини МДЯ тузилмалар хусусиятларига таъсири. //“Яримўтказгичлар физикаси ва қайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантиришнинг замонавий муаммолари”. –Андижон, 2018. 93 Б.

23. Ш.Х.Йўлчиев, А.Й.Бобоев, Ж.Н.Усмонов. Применение металлооксидных полупроводников в преобразователях солнечной энергии. // Яримўтказгичлар физикасининг ҳозирги замон муаммолари. Республика илмий анжумани материаллари.-Тошкент, 2018. 191-192 Б.

24. В.А.Абдуазимов Ш.Х.Йўлчиев, И.Х.Хомиджонов. МДЯ тузилмалари диэлектрик қатламидаги ҳаракатчан зарядларнинг табиати. // Микроэлектроника, нанозарралар физикаси ва технологиялари. Республика илмий – амалий анжумани материаллари. - Андижон, 2015. 49-50 Б.

25. С.Зайнобидинов, К.Мусаев, Ш.Йўлчиев, А.Абдуллаев. К механизму изменения постоянной решетки наночастицы в кристаллах. // Профессор А.Тешабоевнинг 90 йиллигига бағишланган «Яримўтказгичлар физикасининг долзарб муаммолари», Республика илмий-амалий семинари. – Тошкент, 2014. 25-27 Б.

26. С.Зайнобидинов, Ш.Х.Йўлчиев, Х.Мансуров, А.Бобоев, Ж.Усмонов. Кремний-диоксид кремний туридаги тузилмалар ажралиш чегараларига электрон нурланишларни таъсирлари. // Замонавий физиканинг долзарб муаммолари республика илмий-амалий анжумани. – Термез, 2013. 152-154 Б.

27. А.Тешабоев, Ш.Х.Йўлчиев, Х.Мансуров, А.Бобоев, Ж.Усмонов, Х.Исмоилов. Кремний-диоксид кремний туридаги тузилмаларга электрон нурланишларни таъсирлари. // Электротехника, электромеханика ва электротехнологиялар соҳасида автоматлаштирилган ва компютерлаштирилган тизимлар»: Тезисы докладов республиканской научно-практической конференции 24-26 ноября 2012г. – Фергана. С. 118-119

28. С.З.Зайнобидинов, Х.Ж.Мансуров, Ш.Х.Йўлчиев, А.Й.Бобоев, Ж.Усмонов. Зарядлар генерация жараёнларини диэлектрик қатлам қалинлигига боғлиқлиги. // Қуёш энергиясини ўзгартиришнинг фотоэлектрик ва иссиқлик - физикавий асослари. Фарғона. 2011 йил. 59-60 бб.

29. П.Б.Парчинский, А.А.Насиров, Х.Ж.Мансуров, Ш.Х.Йўлчиев, О.К.Капитанова. Исследование влияния электронного облучения на параметры границы раздела Si-SiO₂// Труды международной конференции "Фундаментальные и прикладные вопросы физики". -Ташкент, 2004. – С. 324-325.

30. И.Каримов, Х.Ж.Мансуров, Ш.Х.Йўлчиев. Влияние химической обработки поверхности кремния на свойства туннельных систем Si-SiO₂. “Қаттиқ жисмлар физикасининг долзарб муаммолари”. // Республика илмий-амалий анжумани. – Андижон, 2009. 40 Б.

31. Ш.Х.Йўлчиев. Si-SiO₂ чегара қатлам характеристикаларига электронлар оқимининг таъсири. // «ФАН ВА АМАЛИЁТ», Олий ва ўрта махсус таълим муассасаларининг ёш олимлари ва иқтидорли талабалари анжумани материаллари 1-қисм. - Андижон, 2004. 63 Б.

32. С.З. Зайнобидинов, Ш.Х. Йўлчиев. Si-SiO₂ чегара қатлам характеристикаларига γ -нурланишнинг таъсири. // Материалы научного семинара, посвященного 60-летию со дня основания АН Руз. - Ташкент, 2003. - С.29-30.

Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали тахририятида тахрирдан ўтказилди ва ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнларини мослиги текширилди.

Бичим 60x841/16.Рақамли босма усули. Times гарнитураси.
Шартли босма табағи: 3,7. Адади 20. Буюртма № 15.

Гувоҳнома reestr № 10-4434
Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти
босмаҳонасида чоп этилган.

Босмаҳона манзили: 100057, Тошкент ш., Янги Олмазор кўчаси, 20-уй.