

**ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ
ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.30.12.2019.FM.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ АСОСИДАГИ
БИР МАРТАЛИК ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ХУЗУРИДАГИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ**

ДАЛИЕВ ШАХРУХ ХОЖАКБАРОВИЧ

**ҚИЙИН ЭРУВЧИ ЭЛЕМЕНТЛАР БИЛАН ЛЕГИРЛАНГАН КРЕМНИЙ
ВА КРЕМНИЙЛИ СТРУКТУРАЛАРДА НУҚСОНЛАР ҲОСИЛ
БЎЛИШ ЖАРАЁНЛАРИ**

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 of Doctoral (DSc) Dissertation Abstract

Далиев Шахрух Хожакбарович

Қийин эрувчи элементлар билан легирланган кремний ва кремнийли структураларда нуқсонлар ҳосил бўлиш жараёнлари 3

Далиев Шахрух Хожакбарович

Процессы дефектообразования в кремнии и кремниевых структурах, легированных тугоплавкими элементами 23

Daliev Shakhrukh Khojakbarovich

Processes of defect formation in silicon and silicon structures doped with refractory elements 43

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 51

**ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ
ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.30.12.2019.FM.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ АСОСИДАГИ
БИР МАРТАЛИК ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ХУЗУРИДАГИ
ЯРИМУЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ**

ДАЛИЕВ ШАХРУХ ХОЖАКБАРОВИЧ

**ҚИЙИН ЭРУВЧИ ЭЛЕМЕНТЛАР БИЛАН ЛЕГИРЛАНГАН КРЕМНИЙ
ВА КРЕМНИЙЛИ СТРУКТУРАЛАРДА НУҚСОНЛАР ҲОСИЛ
БЎЛИШ ЖАРАЁНЛАРИ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2020

Докторлик диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2019.4.DSc/FM.147 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ўзбекистон Миллий университети ҳузуридаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институтида бажарилган.

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

Илмий маслаҳатчи:	Мамадалимов Абдугафур Тишабаевич физика-математика фанлари доктори, академик
Расмий оппонентлар:	Арипов Хайрулла Кабилович физика-математика фанлари доктори, профессор Исмаилов Қанатбай Абдреймович физика-математика фанлари доктори, профессор Онаркулов Каримберди Эгамбердиевич физика-математика фанлари доктори, профессор
Етакчи ташкилот:	Наманган давлат университети

Диссертация ҳимояси Ион-плазма ва лазер технологиялари институти ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.30.12.2019.FM.65.01 рақамли Илмий кенгаш асосидаги бир марталик Илмий кенгашнинг 2020 йил «_____» _____ соат _____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100125, Тошкент шаҳар, Дўрмон йўли кўчаси, 33-уй. Тел./факс: (+99871) 262-32-54, e-mail:info@iplt.uz, Ион-плазма ва лазер технологиялари институти мажлислар зали).

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

Диссертация автореферати 2020 йил «_____» _____ куни тарқатилди.

(2020 йил «_____» _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси)

Х.Б. Ашуров

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

И.Д. Ядгаров

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш илмий котиби ф.-м.ф.д., катта илмий ходим

М.Ш. Курбанов

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси т.ф.д., профессор

КИРИШ (фан доктори (DSc) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг зарурати ва долзарблиги. Ҳозирги кунда жаҳонда фан ва техниканинг деярли барча соҳаларида қаттиқ жисмлар электроникаси қурилмаларидан фойдаланилмоқда. Қаттиқ жисмли асбобларнинг ишлатилиш соҳаси доимо кенгайиб бормоқда, саноатда янги йўналишларнинг ривожланишига йўл очиб берувчи бутунлай янги типдаги асбоблар яратилмоқда, бу эса ҳозирги замон яримўтказгичли қаттиқ жисмлар электроникасининг асосий материали бўлган Si структурасини такомиллаштиришни талаб этмоқда.

Шу муносабат билан Si да нуқсонларнинг ҳосил бўлиш жараёнларини турли киришмалар билан легирлаш орқали ўрганиш ва яримўтказгичли асбоблар параметрларини – барқарорлаштиришнинг бошқариладиган усуллари яратиш муҳим муаммолардан бири ҳисобланади.

Бугунги кунда бутун дунёда микроэлектрониканинг ривожланиш тенденциялари таҳлили шуни кўрсатадики, келажакда ишлаб чиқариладиган микросхемаларнинг аксариятини асосий элементи МДЯ (металл-диэлектрик-яримўтказгич) структуралар бўлган рақамли логик интеграл микросхемалар ташкил қилади. Рақамли ва аналогли сигналларни қайта ишлаш қурилмаларида заряд боғловчи асбоблар (ЗБА) ҳозиргача ишлатилмоқда, қаттиқ жисмли фотоқабулқилувчи қурилмалар сифатида-фотосезгирли ЗБА қурилмаларининг ишлаши ҳам МДЯ–структураларга асосланган.

Лекин микросхемаларнинг интеграция даражаси ортиши билан катта ва ўта катта интеграл схемаларни яратишда кўп қатламли кремний структураларидаги сирт ва ҳажмий нуқсонлар асбобларнинг ишлашига катта таъсир кўрсатмоқда. Бу эса яримўтказгич-диэлектрик чегараси яқинида ва яримўтказгич ҳажмидаги нуқсонларни янада чуқурроқ ўрганиш заруратини ва ишлаб чиқарилган асбоблар параметрларини ўзгартиришга қанча ҳисса қўшганлигини аниқлашни талаб қилади. Киришма зарралари ва яримўтказгич структураси нуқсонлари орасидаги ўзаро таъсирни ўрганиш, МДЯ-структуралар тузилишининг гетерогенлигининг киришмаларнинг қайта тақсимланишига таъсири МДЯ-структуралар асосидаги микросхемаларнинг ишлаш параметрлари барқарорлигини ошириш имкониятини очади.

Дунёда бугунги кунда монокристалли кремнийда нуқсон ҳосил бўлиш жараёнларини ўрганиш, хусусан, қуйидаги соҳаларда илмий-тадқиқотларни амалга ошириш муҳим вазифа ҳисобланади: қийин эрувчи элементлар (ҚЭЭ) киришмалари билан легирланган кремнийга турли омиллар таъсирида нуқсонлар маркази шаклланишини тадқиқ қилиш; технологик киришмаларнинг қийин эрувчи киришмалари кремнийда чуқур марказлар ҳосил бўлиш механизмларига таъсирини ўрганиш; қийин эрувчи киришмалар ҳосил қиладиган чуқур энергетик сатҳлар спектрининг пайдо бўлиш қонуниятларини ўрнатиш; қийин эрувчи элементларнинг бошқа киришмалар ҳамда панжарадаги структуравий нуқсонлар билан таъсири ва қийин эрувчи элементлар киришмалари кремнийда структуравий нуқсонларнинг ҳосил бўлишида термик ва радиацион нуқсонларнинг таъсирини ўрганиш. Ушбу

йўналишларда олиб борилаётган илмий-тадқиқот ишлари мазкур диссертация мавзусининг долзарблигини кўрсатади.

Мустақиллик йилларида Ўзбекистон олимлари томонидан яримўтказгичли материаллар ва кўп қатламли структураларни чуқур сатҳли киришмалар (ЧСК) билан легирлаш жараёнларини ўрганишга катта эътибор берилмоқда. Ўтувчи ва нодир ер элементларини кремнийга киритиш орқали кремнийли структураларнинг фотосезгирлигини оширишда юқори ютуқларга эришилган. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантиришнинг Ҳаракат стратегиясига мувофиқ, инновацион технологияларни жорий этиш орқали яримўтказгичлар физикаси соҳасидаги назарий ва амалий тадқиқотлар асосида микроэлектроника саноатининг самарадорлигини ошириш муҳим аҳамият касб этади.

Ушбу диссертация тадқиқоти Ўзбекистон Республикаси Президентининг «2011-2015 йилларда Ўзбекистон Республикаси саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида» (2010 йил 15 декабрдаги ПҚ–1442-сон қарори, 2017 йил 7 февралдаги ПФ–4947-сон Фармони билан тасдиқланган «2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича Ҳаракатлар стратегияси», «Фанлар академияси фаолияти, илмий-тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида» 2017 йил 17 февралдаги ПҚ–2789-сон қарори ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа норматив-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотларнинг республика фан ва технологияларини ривожлантиришнинг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг Ф.2.»Физика, астрономия, энергетика ва машинасозлик» III. Энергетика, энергоресурс тежамкорлиги, асбобсозлик, замонавий электроника, микроэлектроника, электрон асбобсозликнинг ривожлантиришни устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Диссертация мавзуси бўйича халқаро тадқиқотларнинг шарҳи¹.

Яримўтказгичлар физикаси ва яримўтказгичлар материалшунослиги соҳасидаги тадқиқотлар илғор давлатларнинг илмий марказлари, институтлари ва университетлари: жумладан, Цинциннати ва Калифорния (АҚШ) университетлари, Philips Semiconductors, SGS-Thomson фирмалари, Intel фирмаси, Yale University (США) ва Токио (Япония) ва Берлин техника университетида (Германия) эса турли киришмалар билан легирланган кремний асосида оптоэлектрон асбоблар яратиш бўйича тадқиқотлар олиб борилмоқда. Цюрих тадқиқот маркази (Швейцария) ва Фонтис амалий фанлар университетида (Нидерландия) янги яримўтказгичли материаллар ишлаб чиқариш бўйича тадқиқотлар олиб борилмоқда, наноструктура физикаси Санкт-Петербург (Россия) Физика-техника институтида, микро- ва наноэлектроника структураларини олиш технологияси билан ИИК «Полнос»

¹ Обзор международных научных исследований по теме диссертации проведен на основе: De Luca, A., Texier, M., Burle, N., Oison, V., Pichaud, B., Portavoce, A., Tungsten diffusion in silicon. J. Applied Physics, Volume: 115; Issue: 1; United States: N. p., 2014. Web. doi:10.1063/1.4859455.

(Россия) шуғулланмоқда. Дунёда олиб борилаётган илмий ишларнинг натижасига кўра, турли элементлар билан легирланган материалларни олиш ва улар асосидаги структураларни ўрганиш бўйича кўпгина қизиқарли илмий натижалар мавжуд, хусусан, қуйидаги: Yale University (АҚШ)да илк бор нодир ер элементлари эрбий (Er) ионига эга бўлган ёруғлик сочувчи кремнийли структура намунаси олинган; кристалл панжарасида нодир ер элементи мавжуд бўлган структура Лунд (Швеция) ва Женева университетлари (Швейцария) томонидан ишлаб чиқилган; эрбий марказли структуралари (Nation institute for materials science Yokohama)да ўрганилган; экологик кузатишлар тизимлари учун асбоблар (Japan atomic energy research institute) яратилган; юқори магнит қаршилигига эга бўлган наноструктурали термик датчиклари технологияси яратилди (Тошкент давлат техника университети), кичик ўлчамли ўта ўтказувчанлик назарияси ривожлантирилди (Ядро физикаси институти).

Ҳозирги пайтда тадқиқотлар қуйидаги истиқболли йўналишларда олиб борилмоқда, жумладан: Ni ва Mn нанокластерга эга бўлган яримўтказгичли материаллар асосида температура датчикларини яратиш ва уларнинг бошқа функционал параметрларни яхшилаш бўйича; легирланган Si асосида температура ва намлик датчикларини ишлаб чиқиш; каналда манфий градиентга эга бўлган киришмалар асосида ёруғликка сезгир майдон тразисторларини ва яримўтказгичли материаллар асосида функционал тавсифлари оширилган бошқа асбобларни тайёрлаш; ўтувчи элементлари мавжуд киришмали кремнийда термик ва радиацион нуқсонларнинг ҳосил бўлиш жараёнларини ўрганиш; икки ўлчамли қатламлар фазалар чегарасида юзага келадиган наноўлчамли ва квант эффектларни ўрганиш.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Ҳозирги вақтга қадар олимлар ва ишлаб чиқарувчиларнинг эътибори кремнийда ва кремний структураларида кечувчи физик жараёнлар, шунингдек уларнинг параметрлари барқарорлигини муқобиллаштириш усулларини ишлаб чиқишга қаратилган, АҚШ ва Япония олимлари A.Milnes, D.J.Struthers, E.R.Weber, Y.Tokumari томонидан фотосезгирликни ошириш учун кремнийнинг чегаравий қатламларида ноанъанавий аралашмалар (Ti, Ni, Gd, Sm ва бошқалар) билан кичик концентрацияларда, кейинчалик уни термик оксидлаш ва (Al, Cu ва W) металл электродларини жойлаштириш билан легирлаш жараёни ишлатилган. Россиялик олимлар А.А.Лебедев, Л.С.Берман, В.И.Фистуль томонидан кремнийда ҳар хил чуқур сатҳли киришмаларнинг ҳолати ўрганилган ва ушбу сатҳларнинг энергетик спектрлари аниқланган.

Академиклар М.С.Саидов, Р.А.Муминов, А.Т.Мамадалимов ва бошқа Ўзбекистонлик олимлар ҳам яримўтказгичлар ва яримўтказгичли структуралардаги локал марказлар физикасини ривожлантиришга қаратилган илмий изланишларда ўзларининг муносиб ҳиссаларини кўшганлар. Компенса-цияловчи киришмалар билан легирланган яримўтказгичларнинг хоссалари академиклар М.К.Баҳадирханов ва С.З.Зайнабидинов томонидан ўрганилган, улар чуқур сатҳли киришмалар билан компенсирланган кремнийда ҳароратли сўниш ва ИҚ-сўниш эффектларини аниқлаганлар.

К.П.Абдурахманов бошқалар томонидан ҳар хил киришмалар билан легирланган кремнийда нуқсон ҳосил бўлиши ва бир қанча киришмаларнинг энергетик спектрлари аниқланган. Профессорлар С.И.Власов, Арипов Х.К., Исмаилов К.А. томонидан кремний асосидаги диод ва транзисторли структураларининг фазалараро чегараларида юз берувчи физик жараёнлар ўрганилиб, бўлинишнинг яширин чегараси хоссаларини яримўтказгич ва диэлектрикнинг ҳажмий хоссаларидан фарқловчи асосий фактор, яримўтказгичнинг таъқиқланган соҳасидаги энергетик сатҳларни ҳосил қилувчи сиртий электрон ҳолатларнинг борлиги исботлаб берилган.

Яримўтказгичлар ва яримўтказгичли структураларнинг хоссаларини ўрганиш бўйича экспериментал маълумотларнинг кўплигига қарамасдан, турли ташқи омиллар: босим, нурланиш ва қуёш нури таъсирида унга асосланган кремний ва кўп қатламли структураларнинг ҳаракатини олдиндан айтиб беришга имкон берувчи маълумотлар мавжуд эмас.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Ўзбекистон Миллий университети ҳузуридаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институтининг илмий-тадқиқот лойиҳалари, Ўзбекистон Республикаси фан ва технология агентлиги томонидан ажратилган грантларнинг тематик режаларига мувофиқ амалга оширилган: ФМ-2-038 рақамли «Қийин эрувчи элементлар билан легирланган, кремний асосидаги, металл-диэлектрик-яримўтказгич типидagi кўпқатламли структураларнинг бўлиниш чегарасидаги ва ҳажмидаги физик жараёнларни тадқиқ қилиш» (2007-2008 йй.); ОТ-Ф2-081 рақамли «Кремнийнинг киришмали-нуқсонли ассоциатли монокристалларида нуқсон ҳосил бўлиши қонуниятларини ва яримўтказгич-диэлектрик бўлиниш чегараларида яширин чегаралар пайдо бўлишининг динамик жараёнларини ўрганиш» (2007-2011 йй.); ЁФ-2-08 рақамли «Нодир ер элементлар киришмалари билан легирланган кремний ва кремнийли кўп қатламли структуралардаги нуқсон ҳосил бўлишига ва термик ишловига радиациянинг таъсирини ўрганиш» (2010-2011 йй.), ЁФ-2-13 рақамли «Кремний структураларининг электрофизик хоссаларига титан кичик гуруҳи кириндиларининг таъсирини ўрганиш» (2016-2017 йй.) ва МУ-ФЗ-20171025461 рақамли «Диэлектрик сифатида лантан, гадолиний ва европий оксидлари ишлатилган кремнийли МДЯ-структураларнинг электрофизик хусусиятлари» (2018-2019 йй.) мавзусидаги лойиҳалар доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади: қийин эрувчи элементлар киришмалари билан легирланган кремний ва кремнийли структураларда нуқсонлар ҳосил бўлиш жараёнларини, шунингдек, мазкур жараёнларга баъзи нодир ер элементларининг таъсирини сиғимли спектроскопия, ёруғлик сиғими ва инфрақизил спектроскопия усуллари ёрдамида комплекс ўрганишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

кремнийни қийин эрувчи элементлари киришмалари билан легирлаш технологияси ва физико-кимёвий аспектиларини ишлаб чиқиш;

қийин эрувчи элементлар билан легирланган Si намуналарининг электрофизик хоссаларини диффузия ва ўстириш жараёни орқали тадқиқ этиш;

қийин эрувчи элементлар киришмалари кремнийдаги чуқур марказларнинг энергетик спектрларини аниқлаш ва уларни идентификация қилиш;

технологик омилларнинг қийин эрувчи элементлар киришмалари кремнийда чуқур марказларни ҳосил қилиш самарадорлигига таъсирини ўрганиш;

кремний ва кремнийли кўп қатламли структуралар қийин эрувчи элементлар киришмалари билан легирлангандаги ташқи омиллар (нурланиш, ҳарорат ва б.) таъсирини тадқиқ этиш;

кремнийдаги қийин эрувчи элементлар атомларининг ўстириш пайтида ҳосил бўлган киришмалари ва баъзи нодир ер элементларининг киришмалари билан ўзаро таъсирини ўрганиш;

металл-диэлектрик-яримўтказгич типдаги кремнийли структураларнинг параметрларига қийин эрувчи ва нодир ер элементлари атомларининг таъсирини ўрганиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида қийин эрувчи ва нодир ер элементларининг киришмалари билан легирланган Чохраль ва тигелсиз зонада эритиш усули билан ўстирилган монокристалли кремний ва улар асосидаги МДЯ-структуралар олинган.

Тадқиқотнинг предмети қийин эрувчи ва нодир ер элементлар билан легирланган кремний ва кремний структураларида нуқсонларнинг ҳосил бўлиш жараёнларидан иборат.

Тадқиқот усуллари. Қуйилган вазифаларни ҳал қилишда чуқур сатҳлар ностационар сиғимли спектроскопия (ЧСНСС), ёруғлик сиғими (ЁС), ёруғлик ўтказувчанлик (ЁЎ), инфрақизил спектроскопия (ИҚС) усулларидан фойдаланилган.

Тадқиқотининг илмий янгиллиги қуйидагилардан иборат:

илк бор сиғимли спектроскопия усуллари (DLTS ва ЁС) ёрдамида кремнийда қийин эрувчи элементлар киришмалари (Mo, W, Ti, Zr ва Hf) ҳосил қилувчи чуқур сатҳларининг энергетик спектрлари идентификация қилинган;

қийин эрувчи элементлар (ҚЭЭ) киришмалари билан кремнийни легирлашнинг физик-кимёвий жиҳатлари ва технологияси ишлаб чиқилган;

ўстириш вақтида кремнийга ҚЭЭ киришмаларини киритишда уларнинг кўпчилиги электр фаол бўлмаслиги ва уларга узоқ муддатли юқори ҳароратли ишловлар берилганда фаоллашиши мумкинлиги аниқланган;

илк бор ҚЭЭ киришмалари билан легирланган кремнийда нуқсонлар ҳосил бўлиш жараёнларининг самарадорлиги кремнийни легирлаш усуллари, бошланғич кремний структурасидаги нуқсонлар мукамаллиги, дастлабки термик ишлови берилиши ва легирлаш технологик режимларига боғлиқлиги аниқланган;

кремнийда ҚЭЭ киришмалари мавжудлиги радиацион нуқсонлар ҳосил бўлиш жараёнлари самарадорлиги пасайишига олиб келиши, назорат намуналарига нисбатан А-марказларнинг ҳосил бўлиш тезлигини 5-6 мартабага камайтириши ва Е-марказлар ҳосил бўлишига тўсқинлик қилиши аниқланган;

ҚЭЭ киришмалари билан легирланган кремний асосида 3-5 мкм тўлқин узунлиги оралиғида фотосезгирликка, бир текис фотогенерацияга эга бўлган, термикка барқарор ва фотоэлектрик параметрлари такрорланувчи фотоўзгартиргичлар яратиш имконияти аниқланган;

илк бор кремний панжарасида нодир ер элементлари киришмаларининг мавжудлиги ҚЭЭ киришмаларининг эрувчанлигини кескин ошириши ва бир вақтнинг ўзида иссиқлик нуқсонлар ҳосил бўлиш самарадорлигини камайиши кузатилган;

ҚЭЭ мавжуд кремнийга нодир ер элементларини киритиш орқали турли бошқариб бўлмайдиган технологик киришмалар учун ички геттер сифатида намоён бўлиши кўрсатилган;

кремнийли МДЯ–структуралар тағлигида ҚЭЭ киришмаларининг мавжудлиги МДЯ–структура сирт ҳолатларининг зичлиги ошишига ва Si-SiO₂ ажралиш чегарасида мусбат заряд ҳосил бўлишига ва сиртий ҳолатлар тақсимотининг (N_{ss}) тақиқланган зона кенглиги (E_g) бўйича ўзгаришига олиб келиши аниқланган;

ҚЭЭ киришмаларининг заряд боғловчи асбоблар (ЗБА) тағлигида мавжудлиги сиртий ҳолатлар зичлиги 1 тартибга ва сиртий рекомбинация тезлиги эса оддий заряд боғловчи асбобларга нисбатан 2 мартабага камайиши аниқланган;

диссертация тадқиқотида ривожлантирилган ва асосланган илмий натижалар «Қийин эрувчи элементлар билан легирланган кремний ва кремнийли кўп қатламли структураларда ҳосил бўладиган жараёнларнинг физик асослари» номли янги илмий йўналишни яратиш имконини берган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

қийин эрувчи элементлар билан легирланган кремний асосида фотоэлектрик параметрлари такрорланувчи, бир хил фотогенерацияга, термикка барқарор ва 3-5 мкм спектрал оралиғида фотосезгирликка эга бўлган фотоўзгартиргичлар яратиш имконияти ишлаб чиқилган;

қийин эрувчи элементларни кремнийга диффузия қилишдан аввал нодир ер элементлари киритилган кремнийда нодир ер элементлари бошқариб бўлмайдиган киришмаларга геттер вазифасини бажариши яримўтказгичли p⁺-n-n⁺- структурали диодларни ишлаб чиқаришда қўллаш имконияти тавсия этилган.

қийин эрувчи элементларни кремнийга киритиш орқали термикка барқарорлигини ошириш ва радиацияга чидамли структураларни ишлаб чиқиш усуллари кўрсатилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги чуқур сатҳларнинг ностационар сиғимли спектроскопия, ёруғлик сиғими, ёруғлик ўтказувчанлик ва инфрақизил спектроскопия усуллариининг концентрация бўйича юқори

сезгирликка ва энергия бўйича юқори ажратиш қобилиятига, ҳар бир сатх параметрларини ажратиш имкониятига эга бўлган тажрибавий услубларнинг қўлланилганлиги билан исботини топган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти қийин эрувчи элементлар киришмалари билан легирланган монокристалл кремний ва кремний структураларида содир бўладиган физик жараёнлар тушунчасини кенгайтиришдан иборат.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундан иборатки, қийин эрувчи элементлар киришмалари билан кремнийни легирлашнинг физик-кимёвий жиҳатлари ва технологиясини ишлаб чиқиш ва кремнийда ҚЭЭ мавжудлигида унга нодир ер элементларини киритиш, ички геттер йўлини ишлаб чиқиш орқали турли технологик бошқариб бўлмайдиган киришмалар (темир ва кислород) ва кремний параметрларининг термикка барқарорлиги ва радиацияга чидамлилигини ошириш учун қийин эрувчи элементларни киритиш орқали турли яримўтказгичли асбобларни ишлаб чиқаришдан иборатдир.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Қийин эрувчи элементлар ва нодир ер элементлари билан легирланган монокристалл кремний ва кремний структураларида нуқсонлар ҳосил бўлиш жараёнларини ўрганиш натижасида олинган илмий натижалар асосида:

кремний кристаллини ҚЭЭ киришмалари билан легирлаш технологияси ва ҚЭЭ киришмалари ҳамда нодир ер элементларини киритиш орқали бошқариб бўлмайдиган технологик киришмаларни ички геттерлаш усули «FOTON» акционерлик жамиятида электрон техника маҳсулотлари учун тажриба намуналарини ишлаб чиқишда фойдаланилган («Ўзэлтехсаноат» акциядорлик компаниясининг 2019 йил 24 декабрдаги 04-1/60-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш электрон техника маҳсулотлари тажриба намуналарининг электрофизик параметрларини яхшилаш ва ишончлилигини ошириш имконини берган;

анъанавий бор ва фосфор киришмалари диффузияси жараёнида нодир ер элементларини киритиш ва кремнийда бошқариб бўлмайдиган киришмалар учун нодир ер элементлари геттер хусусиятларини намоён қилиши p^+-n-n^+ структурали яримўтказгич диодлар ишлаб чиқариш ОАЖ «Новосибирск яримўтказгичли асбоблар заводи КББ»га жорий этилган («Новосибирск яримўтказгичли асбоблар заводи КББ» акционерлик жамиятининг 2019 йил 6 декабрдаги 04/401-543-сон маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланиши диодларнинг ишдан чиқиш тоқларини бир тартибга камайтириш ва қувватни циклик синовларда ҳам ушлаб туриш имконини берган;

кремнийда ҚЭЭ киришмаларининг эрувчанлиги сезиларли даражада ошишининг аниқланиши ва кремний панжарасида нодир ер элементлари киришмалари иштирокида термик нуқсонлар ҳосил бўлиш самарадорлигининг бир вақтда пасайиши Ф2-ФА-Ф118 рақамли «Ионлаштирувчи нурланиш детектори сифатида ишлатиладиган оксид ва фторли қаттиқ жисмли материалларида радиациявий рағбатлантирувчи ходисалар

қонуниятлари» фундаментал лойиҳада ВаFІ кристалларида радиацион нуқсонлар ҳосил бўлиш жараёнида W киришмалар таъсири натижаларини таҳлил қилишда фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Фанлар академиясининг 2019 йил 5 декабрдаги 2/1255-3184-сон маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши радиацион нуқсонлар ҳосил бўлишида W киришмасининг тўсқинлик қилишини аниқлаш имконини берган;

ҚЭЭ билан легирланган кремний асосидаги структураларнинг 3-5 мкм спектр соҳасида фотосезувчанлик хусусиятига эгаллиги, юқори термик барқарорлиги, фотогенерация жараёнининг ва фотоэлектрик параметрларнинг барқарорлиги асосида мазкур методикадан фойдаланиб, юқори самарадорликка эга фотоўзгартгичлар яратиш бўйича илмий-техника натижалар А-4-12 рақамли «Наноплазмониканинг эффекти ва улар ёрдамида кремнийли р-п-структураларда фотоэлектрик энергия олиш самарадорлигини ошириш» фундаментал лойиҳасида кремнийли фотоэлектрик р-п-структураларини ишлаб чиқишда фойдаланилган (Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2019 йил 30 ноябрдаги 87-03-4624-сон маълумотномаси). Илмий натижанинг қўлланилиши ҚЭЭ билан легирланган кремний асосидаги р-п-структураларда фотоэлектрик энергия олиш самарадорлигини ошириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишининг асосий натижалари 10 та халқаро ва 8 та республика илмий-амалий конференцияларида муҳокама қилинган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича 44 та илмий иш, шу жумладан 2 та монография, Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш учун тавсия этилган илмий журналларда 22 та мақола нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, олти боб, хулоса, адабиётлар рўйхати 155 та номдан иборат бўлиб, 64 та расм, 3 та жадвални ўз ичига олган ҳолда 208 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯ ИШИНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурияти асосланган, диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, объект ва предметлари тавсифланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

«Кремний ва кремнийли структураларда нуқсон ҳосил бўлиш жараёнларининг ўзига хос хусусиятлари» деб номланган биринчи бобда қийин эрувчи ва нодир ер элементлари киришмалари билан легирланган кремнийнинг электрофизик хусусиятларини тадқиқ этиш бўйича ишларнинг натижалари келтирилган. Қийин эрувчи элементлар билан ўстириш жараёнида ҳам, диффузион услубда ҳам легирланган кремнийни хусусиятларининг таҳлили келтирилган. Қийин эрувчи элементлар билан легирланган кремнийнинг хусусиятларига технологик киришмаларнинг (кислород ва углерод) таъсири кўриб чиқилган. ҚЭЭ ва нодир ер элементлари киришмалари билан легирланган кремнийнинг электрофизик хусусиятларига термик ишлов бериш ва нурлантиришни таъсир кўрсатиши, шунингдек турли миқдордаги кислородга эга бўлган кремнийда структуравий нуқсонларни тадқиқ этиш бўйича маълумотлар таҳлил этилди.

Кремний ва кремнийли структураларда турли нуқсонларнинг ўзини тутиш хусусияти тадқиқ этилишининг ҳозирги замондаги ҳолати, шунингдек турли ташқи факторларнинг легирланган кремнийнинг хоссаларига таъсирининг таҳлили келтирилган.

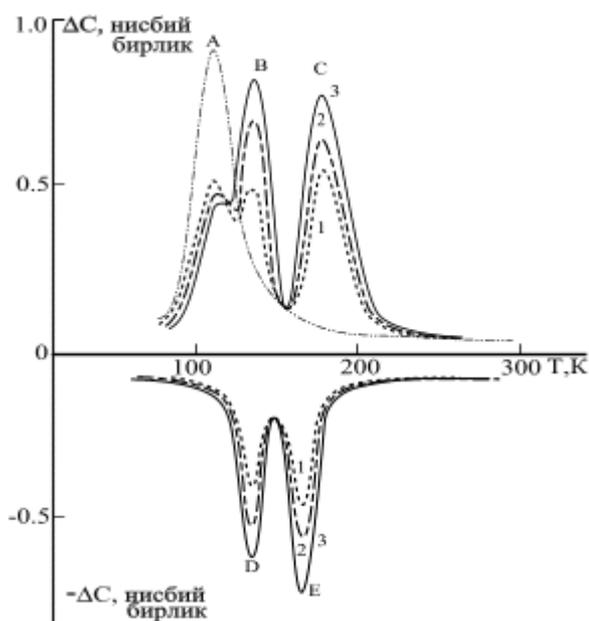
Яримўтказгичлар ва яримўтказгичли структураларда чуқур сатҳлар сиғимли спектроскопиянинг асосий қонуниятлари тасвирланган. t_1 ва t_2 вақт моментларида релаксацион сигнал фарқини ўлчашга асосланган DLTS классик услубнинг моҳияти баён қилинган. DLTS спектрларини турли режимларда ва бир карралик ва кўпкарралик сканерлаш йўли билан олинган DLTS спектрларини ҳисоблаш усули кенг баён этилган.

Кремнийдаги кислород ва углероднинг концентрациясини аниқлаш учун икки нурли схемада спектри 1200 дан 400 см^{-1} инфрақизил (ИК) – соҳасида ишлайдиган SPECORD-72-IR инфрақизил спектрофотометр ёрдамида ИҚ-ютилиш спектрларини ўлчаш усули баён этилган.

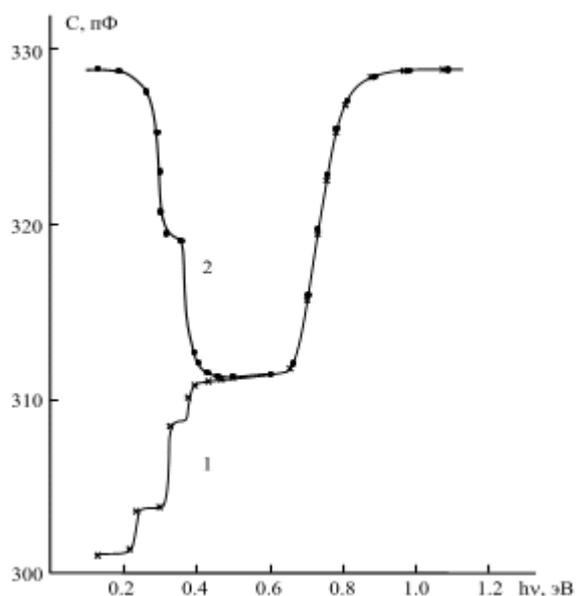
Бобнинг охирида термик ишловлар ва диод структураларининг тайёрлаш технологиялари батафсил тавсифланган. Кремнийни қийин эрувчи элементлар киришмалари билан легирлаш технологияси тўлиқ баён этилган. **«Қийин эрувчи элементлар киришмалари билан легирланган кремнийда нуқсонлар ҳосил бўлиш жараёнлари»** деб номланган иккинчи боб қийин эрувчи элементлар киришмалари билан легирланган кремнийдаги нуқсонли марказларнинг энергетик спектрини ўрганишга бағишланган. Қийин эрувчи элементлар (W, Mo, Zr, Ti ва Hf) билан легирланган кремнийда

нуқсонлар ҳосил бўлиш жараёнларини тадқиқ этиш натижалари баён этилган, сиғимли спектроскопия (DLTS ва ЁС) усуллари ёрдамида кремнийнинг тақиқланган зонасида ушбу киришмалар ҳосил қиладиган чуқур энергетик сатҳлар аниқланган ва уларнинг энергетик спектри идентификация қилинган.

Вольфрам атомларининг кремнийга диффузия усулида киритилиши $n\text{-Si}\langle W \rangle$ намуналарда $E_c - 0.22$ эВ (А-чўкки), $E_c - 0.30$ эВ (В-чўкки) ва $E_c - 0.39$ эВ (С-чўкки) ионланиш энергиясига эга бўлган бир қатор чуқур сатҳлар ҳосил бўлишига олиб келиши кўрсатилган, бунда иккинчи чуқур сатҳ $E_c - 0.30$ эВ устунлик қилади. $p\text{-Si}\langle W \rangle$ намуналарда $E_v + 0.31$ эВ (Д чўкки) ва $E_v + 0.35$ эВ (Е чўкки) ионланиш энергияларига эга бўлган икки чуқур сатҳлар мавжудлиги аниқланган. Олинган натижаларнинг таҳлили, $E_c - 0.30$ эВ, $E_c - 0.39$ эВ, $E_v + 0.31$ эВ ва $E_v + 0.35$ эВ чуқур сатҳларни ҳосил бўлиш самарадорлиги диффузия ҳарорати $T_{\text{диф}}$ ва соғутиш тезлигига $v_{\text{сов}}$ боғлиқ эканлигини кўрсатди (1 ва 2 - расм).



1-расм. $n\text{-Si}\langle W \rangle$ ва $p\text{-Si}\langle W \rangle$ намуналарининг DLTS спектрлари.
 $T_{\text{диф}}^{\circ}\text{C}$: 1-1000, 2-1100, 3-1200 ва
 А чўкки – $n\text{-Si}$ назорат намунаси



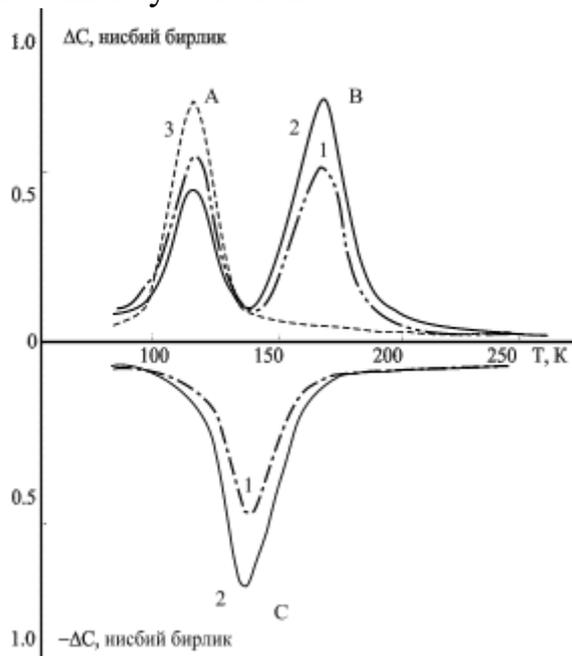
2-расм. $n\text{-Si}\langle W \rangle$ дан тайёрланган диодининг ЁС (1) ва ИЁС (2) спектрлари

$\text{Si}\langle W \rangle$ намуналарнинг DLTS ва ЁС спектрларини таққослаш, $E_c - 0.22$ эВ, $E_c - 0.30$ эВ, $E_c - 0.39$ эВ, $E_v + 0.31$ эВ ва $E_v + 0.35$ эВ энергетик сатҳлар учун термик ва оптик ўлчовлар ўртасида яхши корреляция кузатилишини кўрсатди.

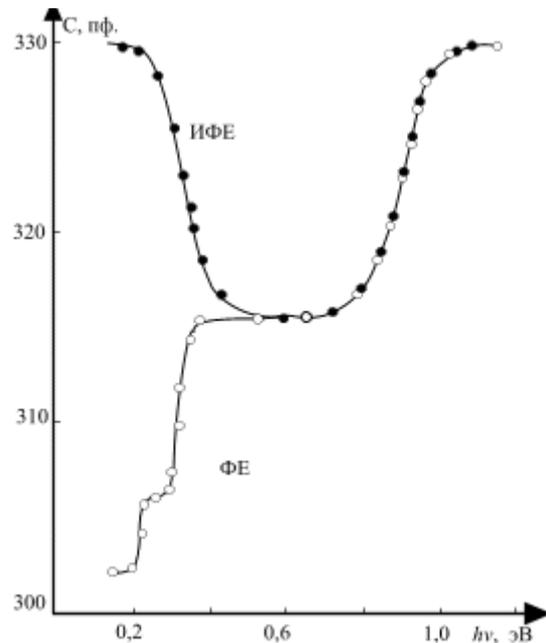
Кремнийдаги молибден киришмаси учун энергетик сатҳларнинг бошқа спектри намоён этилди. Кремнийга молибденни диффузия усулида 1200°C ҳароратда киритиш ва кейин тез соғутилиш $E_c - 0.20$ эВ ва $E_c - 0.29$ эВ ионланиш энергиясига эга бўлган иккита чуқур сатҳларнинг ҳосил бўлишига

олиб келиши аниқланган. Ушбу намуналарнинг тақиқланган зонасининг пастки қисмида $E_v + 0.36$ эВ ионланиш энергиясига эга бўлган битта чуқур сатҳ ҳосил бўлиши аниқланган.

Турли ҳароратда молибден билан легирланган n-Si<Mo> ва p-Si<Mo> намуналарининг DLTS спектри натижаларини таққослаш, молибден билан боғлиқ чуқур сатҳларнинг ҳосил бўлиш самарадорлиги, вольфрам билан бўлган ҳолатдаги каби диффузия температурасига $T_{\text{диф}}$ ва совутиш тезлигига $v_{\text{сов}}$ боғлиқ эканлигини кўрсатади: $T_{\text{диф}}$ ва $v_{\text{сов}}$ ошиши билан ЧС концентрациялари ортиб бориши аниқланган. Si<Mo> даги сатҳларнинг термик ва оптик фаоллашиш энергиялари ўлчовлар хатоликлари чегараларида мос келиши кузатилган.



3-расм. n-Si<Mo> ва p-Si Mo> намуналарининг DLTS спектрлари.
 $T_{\text{диф}}$, °C: 1-1000, 2-1200, 3 - назорат n-Si

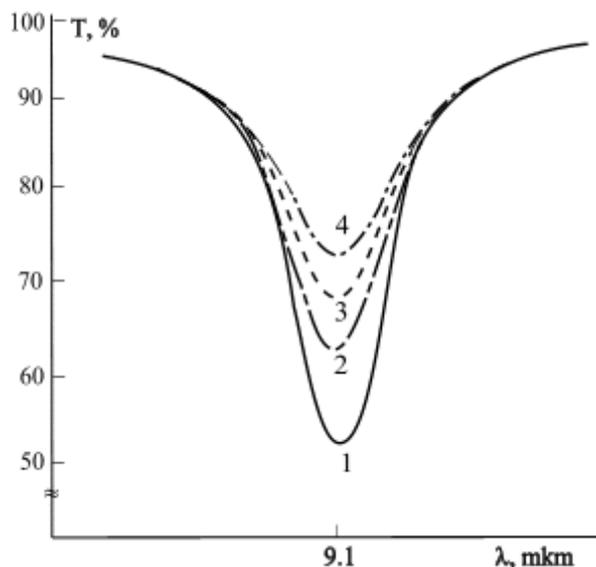


4-расм. n-Si<Mo> намуналарининг ёруғлик сиғими (1) ва индукция-ланган ёруғлик сиғими (2) спектрлари
 $T_{\text{диф}}$, °C: 1200

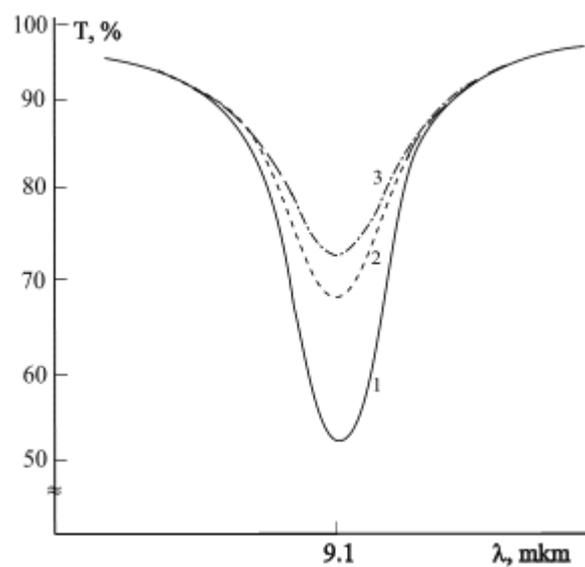
Кремнийни қийин эрувчи элементлар киришмалари билан легирлаш технологияси ва физик-кимёвий жиҳатлари ишлаб чиқилди. Қийин эрувчи элементлар киришмалари кремнийга ўстириш пайтида киритилганда, уларнинг кўпчилиги электр фаол эмаслиги қайд этилди ва уларни узоқ вақт юқори ҳароратли ишловлар бериш йўли билан фаоллаштириш мумкинлиги аниқланди.

Қийин эрувчи элементларни ўстириш жараёнидаги пайдо бўладиган киришмаларнинг турли ҳолатлари билан ўзаро таъсирлашиши ИҚ-спектроскопия ёрдамида ўрганиб чиқилди. Кремнийни қийин эрувчи элементлар киришмалари билан легирлаш, киритилган киришмаларнинг концентрациясига боғлиқ ҳолда оптик актив кислород концентрациясини ($N_{O^{opt}}$) 20-30% камайишига олиб келиши кўрсатилди (5 ва 6-расм). Термик ишлов берилган (ТИБ) кремний намуналаридаги ИҚ-ютилиш спектрларини

ўлчаш шуни кўрсатдики, 1100°C да юқори ҳароратли ишлов бериш (ЮҲИБ), кислород атомларини преципитацияланишига (SiO_2 зарраларини ҳосил бўлишига) олиб келади, бунинг натижасида $\text{N}_0^{\text{опт}}$ нинг 40-50% га камайиши содир бўлади (5-расм, 3-эгри чизиқ). Бунда дастлабки тарзда термик ишлов берилган кремнийга вольфрам ва бошқа ҚЭЭ атомлари киритилишида уларнинг бир қисми SiO_2 тўпламларига чўқади, бунинг натижасида, улар эҳтимол электр фаоллигини йўқотади. Бу эса ўз навбатида ҚЭЭ атомлари билан боғланган чуқур сатҳлар концентрациясининг камайиши ЧСНСС усулида аниқланган.



5-расм. n-Si (1) - назорат, n-Si<W> (2), n-Si+ЮҲИБ (3), 1100°C да дастлабки ЮҲИБ орқали олинган n-Si<W> намуналарининг ИҚ-ютилиш спектрлари



6-расм. n-Si - назорат ва n-Si<Mo> легирланган намуналардаги ИҚ-ютилиш спектрари
 $T_{\text{диф}}$: 2- 1100°C , 3- 1250°C

Вольфрам, молибден, цирконий ва бошқа қийин эрувчи киришмаларнинг кремнийни электрофизик хоссаларига таъсири тадқиқ қилинди ва уларнинг легирланган кремнийнинг фотосезувчанлигини оширишдаги роли аниқланди. Фотоўтказувчанлик спектрлари ўлчанишида, ҚЭЭ билан легирланган кремний асосидаги структуралар, 3-5 мкм спектр соҳасида хона ҳароратида $\lambda_{\text{Si}<\text{Zr}>} = 4.1$ мкм максимум фотосезувчанлик хусусиятига эга эканлиги намоён этилди. Ушбу структуралар асосида биз томондан термик барқарорлиги юқори, бир текисда фотогенерацияланиши ва фотоэлектрик параметрлари қайта такрорланиши билан Si асосидаги айнан ўхшаш структураларга нисбатан фарқ қилувчи фотоўзгарткичларнинг лабораториявий намуналари тайёрланди.

«Қийин эрувчи элементлар мавжуд киришмали кремнийда нуқсон ҳосил бўлиш жараёнларига ташқи факторларнинг таъсири» деб номланган учинчи бобда, термик ишловни (ТИ) қийин эрувчи элементлар киришмалари билан легирланган кремнийда чуқур сатҳларнинг ўзини тутиш

хусусиятларига таъсири, қийин эрувчи элементлар киришмалари сатҳларининг паст ҳароратли ишлов бериш кинетикасини ва кремнийдаги нурланишнинг уларга кўрсатадиган таъсирини ўрганиш натижалари келтирилган.

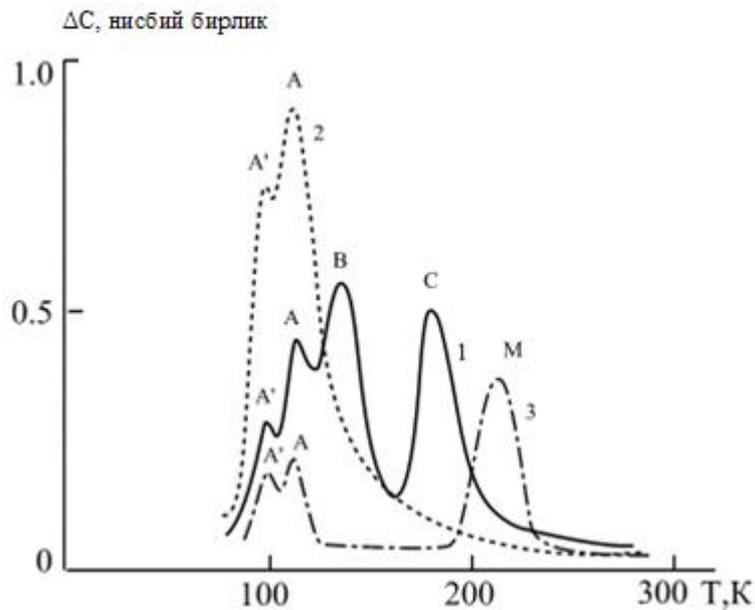
ҚЭЭ киришмалари билан легирланган кремнийдаги чуқур сатҳлар ҳолатига ТИ таъсири, Si даги вольфрам мисолида батафсил кўриб чиқилди. Вольт-фарад характеристика (ВФХ) ва DLTS спектрларини n-Si<W> даги ўлчаш натижалари келтирилган. Изотермик ишлов беришда $E_c - 0.30$ эВ ва $E_c - 0.39$ эВ чуқур сатҳлар концентрациялари (N_t) ишлов бериш вақти билан номонотон равишда ўзгариши намоён этилди: иккала сатҳларнинг концентрациялари қисқа вақтларда ортади, сўнгра $E_c - 0.30$ эВ сатҳнинг концентрацияси кескин пасаяди, ЧС $E_c - 0.39$ эВ концентрациясининг пасайиши секинроқ содир бўлади. Назорат намуналарида (яъни вольфрамсиз намуналарда) ҳам кузатилувчи $E_c - 0.22$ эВ чуқур сатҳлар концентрациясининг ўзгариши, кремнийдаги вольфрам концентрацияси ўзгаришига қарама-қарши эканлиги аниқланди.

Турли миқдордаги кислородли n-Si<W> намуналарда чуқур сатҳли марказларнинг термик куйиш кинетикасини таққослаш, кремний-вольфрам қаттиқ эритмани парчаланиш жараёнларида кислород ҳам муҳим роль ўйнашини кўрсатиб берди. Кислород концентрацияси $N_{O}^{opt} \sim 10^{18}$ бўлган намуналарда, чуқур сатҳларнинг термик куйиши $N_{O}^{opt} \sim 2 \cdot 10^{16}$ намуналардагига нисбатан 3-4 марта секинроқ содир бўлади.

ҚЭЭ билан легирланган кремнийга радиация таъсири ўрганилди ва γ -нурланиш n-Si<W> даги ЧС параметрларига (E_t ионланиш энергияси ва σ_n электронларни тутиб олиш кесими) жиддий таъсир кўрсатмаслиги, бироқ $\Phi > 10^{18}$ кв/см²·сек нурланиш дозаси ортиши билан DLTS спектрлари ўзгариши содир бўлиши аниқланди (7- расм).

Кремнийда вольфрам ёки бошқа ҚЭЭ мавжудлиги намуналарнинг γ -нурлантирилишида А-марказларнинг (вакансия-кислород комплекслари) киритилиш тезлигини назорат намуналарига нисбатан 3÷4 марта пасайишига олиб келиши ва Е-марказлар (вакансия-фосфор комплекслари) ҳосил бўлишига тўсқинлик қилиши кўрсатиб берилди. ҚЭЭ киришмалари киритилган Si нинг юқори дозаларда γ -нурлантирилишида қийин эрувчи элементлар атомлари билан боғлиқ ЧС концентрацияси пасайиши кузатилиши намоён қилинди.

Ушбу эффект нурлантиришда вакансияларни ҚЭЭ атомлари билан кетма-кет тутиб олиниш жараёни бўлиши мумкинлиги ва бу ҚЭЭ вакансия - атом туридаги электронейтрал комплекслари ҳосил бўлишига олиб келиши ва бу ўз навбатида радиацион нуқсонларни киритилиш тезлигини чеклаши мумкинлиги тахмин қилинди. Радиацион нуқсонларнинг ҳосил бўлиш самарадорлиги, шунингдек, оптик фаол тугунлараро кислород N_{O}^{opt} миқдорига боғлиқ бўлиши аниқланди.



7-расм. $n\text{-Si}\langle W \rangle$ (1 эгри чизик) ва термик ишлов берилган $n\text{-Si}$ назорат намуналарининг ($N_0^{\text{опт}} \sim 8 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$ - 2 эгри чизик, $N_0^{\text{опт}} \sim 8 \cdot 10^{16} \text{см}^{-3}$ - 3 эгри чизик) $\Phi > 10^{18} \text{кв/см}^2 \cdot \text{сек}$ доза орқали нурлантирилишидан кейинги DLTS спектрлари

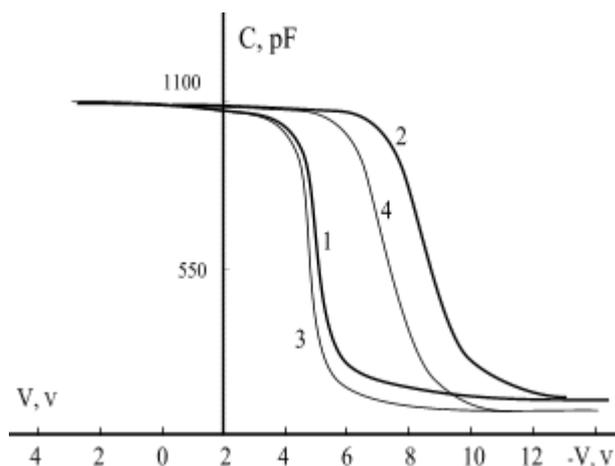
«Қийин эрувчи элементлар киришмаларининг кремний структураларининг характеристикаларига таъсири» деб номланган тўртинчи бобда, ҚЭЭ (M_0 , W , Ti , Zr , ва Hf) киришмалар киритилган кремний асосидаги МДЯ-структураларда нуқсон ҳосил бўлиш жараёнларини тадқиқ қилиш натижалари келтирилган. Вольт-фарад характеристикаси ва доимий сиғимли ностационар сиғимли чуқур сатҳлар спектроскопияси (СС-DLTS) спектрларини ўлчаш ҚЭЭ киришмаларини Si га ўстириш пайтида киритилиши кремний тагликнинг тақиқланган зонасида бирор бир ЧС ҳосил бўлишига олиб келмаслигини кўрсатди. $Si\langle Mo \rangle$ асосидаги МДЯ-структуралар мисолида ВФХ ўлчаш натижалари, улар назорат намуналардагига нисбатан манфий кучланишлар томонга силжишини кўрсатди. Бу кремнийга Mo киритилиши структураларнинг генерацион тавсифларини ўзгаришига яъни: N_{SS} МДЯ-структураларнинг юза ҳолатларининг зичлиги ортишига ва $Si\text{-}SiO_2$ ажралиш чегарасида мусбат заряд ҳосил бўлишига олиб келишидан далолат беради.

Молибден ўстириш пайтида киритилган кремний асосидаги МДЯ-структураларда ва назорат МДЯ-структураларда (Mo киришмасиз) СС-DLTS спектрларини ўлчаш, уларнинг спектрлари бир бирига мос келишини, сезиларли концентрациядаги қайсидир чўққилар намоён этилмаганлигини кўрсатди (9-расм, 1 эгри чизик). Молибден киришмали структурага эга яримўтказгичнинг E_g тақиқланган зонаси кенглиги бўйича N_{SS} тақсимланишини ўлчаш натижалари N_{SS} ни E_g га боғлиқлигининг тақсимланиш спектри типик U-симон хусусиятга эга эканлигини кўрсатди.

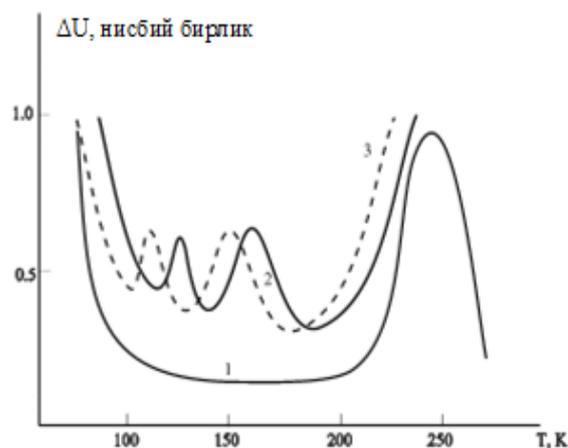
Молибден диффузия усулида киритилган МДЯ-структураларида бошқача кўриниш кузатилади. Дастлаб кремний $1000\text{-}1200^\circ\text{C}$ ҳароратлар

оралиғида 2 соат давомида, Si юзасига туширилган металл ҳолидаги Мо диффузион услубда легирланди. Сўнг, $\rho=5\div 20$ Ом•см солиштирма қаршилиқдаги n-Si<Mo> пластинкаларида МДЯ-структуралар тайёрланди.

Диффузия орқали Мо киритилган МДЯ - структураларининг ВФХ ўлчашлар (8-расм, 4-эгри чизик) улар назорат намуналарига нисбатан манфий силжишлар томонга янада кўпроқ силжиганлигини кўрсатди (8 расм, 3-эгри чизик). Маълумки, C-V-тавсифларнинг манфий кучланишлар томонга силжиши, структуралардаги юза ҳолатлар зичлиги (ЮХЗ) ортишидан далолат беради.



8-расм. Мо киришмали МДЯ-структуралар ВФХ: 1,3-назорат остидаги Мо киришмасиз МДЯ-структуралар, 2-Si<Mo>_{устир.} асосидаги МДЯ-структуралар, 4-Si<Mo>_{диф.} МДЯ-структура



9-расм. Назорат остидаги (1-эгри чизик) ва Мо билан легирланган МДЯ-структураларнинг (2 ва 3- эгри чизиклар) DLTS-спектрлари

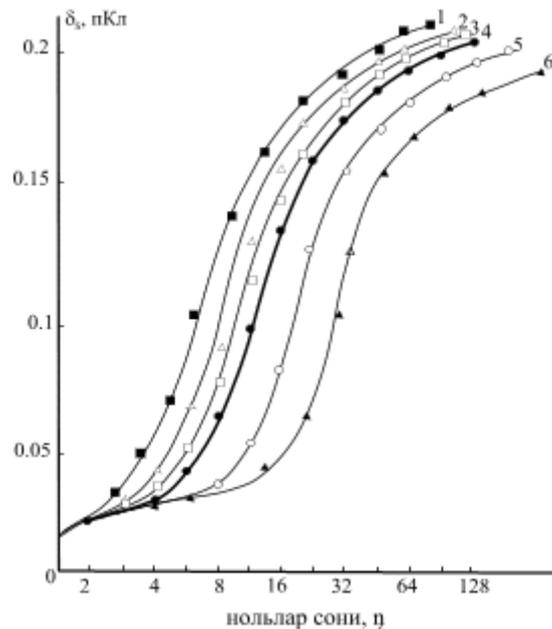
Бу тадқиқ этилаётган структураларнинг кремний тағлигидаги Мо электрофаол атомларининг мавжудлиги N_{ss} янада кўпроқ ортишига ва Si-SiO₂ ажралиш чегарасида мусбат заряд ҳосил бўлишидан далолат беради. Легирланган (9-расм, 2 ва 3 эгри чизиклар) ва назорат намунаси МДЯ-структураларда СС-DLTS спектрларини ўлчаш натижалари, легирланган намуналар спектрларида $T_{max}=125$ К ва $T_{max}=160$ К ҳароратлардаги максимумли 2 чўққи кузатилганлигини кўрсатди, уларнинг амплитудаси электрофаол Мо концентрацияси ортиши билан ўсади. Назорат намуналарида бундай чўққилар ҳосил бўлмайди. Ушбу чўққилар билан ифодаланган нуқсонлар параметрларининг сонли ҳисоблари $T=125$ К ҳароратда максимумли чўққи $E_c - 0.20$ эВ ионланиш энергиясига эга сатҳга, $T=160$ К ҳароратдаги чўққи эса $E_c - 0.29$ эВ ионланиш энергиясига эга сатҳга мос келишини кўрсатади. Легирланган (9-расм, 2 ва 3 эгри чизиклар) ва назорат намунаси (9-расм, 1 эгри чизиклар) МДЯ - структуралардаги СС-DLTS спектрларини ўлчашлар, легирланган намуналар спектрларида ва $T_{max}=125$ К ва $T_{max}=160$ К ҳароратлардаги максимумларга эга 2 чўққи кузатилганлигини кўрсатди, уларнинг амплитудаси электрофаол Мо концентрацияси ортиши

билан ўсиб боради. Назорат намуналарида бундай чўққилар намоён бўлмайди. Ушбу чўққиларнинг мавжудлиги билан ифодаланувчи нуқсонлар параметрларининг сонли ҳисоблари, $T=125$ К ҳароратдаги максимумга эга чўққи $E_c = 0.20$ эВ ионланиш энергиясига эга бўлган сатҳга, $T=160$ К ҳароратдаги максимумли чўққи эса $E_c = 0.29$ эВ ионланиш энергияли сатҳга тўғри келишини кўрсатди. Шунингдек N_{ss} ни Mo киришмали ва Mo киришмасиз МДЯ-структуралар яримўтказгичнинг E_g тақиқланган зонаси кенглиги бўйича тақсимланишининг ўзгариши ўрганиб чиқилди.

«Кремний ва қийин эрувчи элементлар киришмали кремний структураларида нодир ер элементлари ички геттерлар ролида» деб номланган бешинчи бобда, кремний панжарасида нодир ер элементлари киришмаларининг мавжудлиги, қийин эрувчи элементлар (Hf , W ёки Mo) киришмалари эрувчанлигини бир тартибга жиддий ошириши ва бир вақтнинг ўзида термонуқсонлар ҳосил бўлиш самарадорлигини пасайтириши илк бор аниқланган тадқиқот натижалари келтирилган.

Кремнийдаги нодир ер элементлари киришмалари ҚЭЭ киришмалари мавжудлигида, турли назорат қилинмайдиган технологик киришмалар (темир ва кислород) учун ички геттерлар ролини бажариши кўрсатилган: оптик фаол, тугунлараро кислороднинг концентрацияси 50-60% камаяди, кремнийга қўшимча равишда нодир ер элементлари киришмалари билан бирга ҚЭЭ атомлари киритилишида темир атомлари билан боғлиқ сатҳлар кузатилмайди. Структуравий таҳлил натижалари, бундай намуналарда темир ва кислород иштирокидаги электронейтрал комплекслар кузатилишини кўрсатди.

«Қийин эрувчи элементлар киришмалари билан легирланган, металл-диэлектрик-яримўтказгич структуралари асосидаги заряд боғланишли асбоблар» деб номланувчи олтинчи бобда қийин эрувчи элементлар киришмаларини заряд боғланишли асбобларда заряд кўчиши носамарадорлигига таъсир кўрсатиш натижалари келтирилган ва заряд боғланишли асбобларнинг кремний таглигида қийин эрувчи элементлар (W , Mo , Zr ва бошқалар) мавжудлиги юза ҳолатлари зичлигини 1 тартибга, юзани рекомбинацияланиш тезлигини эса оддий ЗБА- структуралардагига нисбатан 2 тартибга камайишига олиб келиши аниқланган. Турли кўчиш носамарадорлиги билан ЗБА нинг ўлчаш натижалари, ε катталиқ юза ҳолатлари зичлигига (ЮХЗ) тўғри мутаносиб эканлигини кўрсатди. Бунда ЗБА регистрлардаги юза ҳолатлари зичлигининг катталиги, натижавий йўқотишларда $n\varepsilon < 0,1$ махсус киритилган киришманинг турига боғлиқ бўлади. Ti , Zr ва Hf киришмалари билан легирланган намуналарда, назорат остидаги ЗБА-структураларидагига нисбатан заряд йўқотишлар кўпроқ ва Mo киришмалари билан легирланган намуналарда эса заряд йўқотишлар камроқдир. Бундан вольфрам ва молибден киришмалари билан легирланган кремний сифатли ЗБА-асбоблар яратилиши учун кўпроқ яроқли эканлиги келиб чиқади.



10-расм. Легирланган (Zr, Ti, Hf, Mo и W) ва контроль ЗБА регистрлари йуқотиш δ_s нинг ноль сонига боғлиқлиги

Бажарилган ҳисобларнинг кўрсатишича, назорат остидаги намуналарда юза ҳолатлар зичлиги (ЮЗХ) катталиги $N_{SS}=9.9 \cdot 10^{-9} \text{эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ ни ташкил этади. Бу ердан $n\epsilon < 0,1$ кўчишнинг носамарадорлигида W киришмаси билан легирланган тагликли ЗБА-асбоблар энг яхши чиқиш тавсифларига эга эканлиги экспериментда кузатилган (10-расм, 6-чизиқ).

ХУЛОСА

Ушбу тадқиқот ишининг асосий натижалари қўйидагилардан иборат:

1. Илк бор қийин эрувчи элементлар (Mo, W, Ti, Zr и Hf) киришмалари билан легирланган Si да сиғимли спектроскопия усуллари (DLTS и ЁС) ёрдамида ҳосил бўлган чуқур сатҳлар энергетик спектрлари идентификация қилинган.

2. Кремнийни қийин эрувчи элементлар киришмалари билан легирлашнинг физик-кимёвий жиҳатлари ва технологияси ишлаб чиқилган; ўстириш пайтида киритилган, кремнийдаги ҚЭЭ киришмаларининг кўпчилиги электр фаол эмаслиги ва улар узоқ вақт юқори ҳароратли ишловлар берилганда фаоллашиши аниқланган.

3. Илк бор ҚЭЭ киришмалари билан легирланган Si да нуқсон ҳосил бўлиш жараёнларининг самарадорлиги қуйидаги факторларга: кремнийни легирлаш усули, дастлабки кремнийнинг нуқсонли структурасининг мукамаллиги, дастлабки термик ишловлар, диффузия қилиш режимлари ва диффузиядан кейинги совутиш шарт-шароитларига боғлиқлиги кўрсатилган.

4. Сиғимли спектроскопия усуллари ёрдамида вольфрам, молибден, цирконий ва бошқа ҚЭЭ киришмалари киритилиши билан Si да радиацион нуқсонлар ҳосил бўлиш жараёнлари тадқиқ этилди. ^{60}Co γ -квантлари билан

нурлантириш чукур сатхларнинг параметрларига (E_t ионлашиш энергияси ва σ_n электронларни тутиб олиш кесими) сезиларли таъсир кўрсатмаслиги, аммо $\Phi > 1 \cdot 10^{18}$ кв/см²·с нурланиш дозаси ортиши билан DLTS спектрларида ўзгаришлар содир бўлиши аниқланган.

5. Кремнийда ҚЭЭ атомларининг мавжудлиги, нурлантириш пайтида А-марказнинг ҳосил бўлиш тезлиги назорат намуналардагига нисбатан 5÷6 марта пасайишига ва Е-марказлар эса ҳосил бўлишига тўсқинлик қилиши кўрсатилган. ҚЭЭ киритилган кремнийда радиацион нуқсонларнинг ҳосил бўлиш самарадорлиги, шунингдек, назорат қилинмайдиган технологик киришмалар миқдорига боғлиқлиги аниқланган.

6. ҚЭЭ киришмалари билан легирланган кремний асосида 3-5 мкм спектр соҳасида хона ҳароратида $\lambda_{Si<Zr>} = 4.1$ мкм да максимум фотосезгирликка, юқори термобарқарорликка бир текис фотогенерацияга эга бўлган, ва фотоэлектрик параметрлари такрорланувчи фотоўзгартиргичлар яратиш имконияти аниқланган;

7. Кремний панжарасида нодир ер элементлари мавжудлиги, қийин эрувчи элементлар (Hf, W ёки Mo) киришмаларининг эрувчанлигини бир тартибга ошириши ва бир вақтнинг ўзида термик нуқсонлар ҳосил бўлиш самарадорлигини пасайтириши илк бор аниқланган;

8. Кремнийдаги нодир ер элементлари киришмалари ҚЭЭ киришмалари мавжудлигида, турли назорат қилинмайдиган технологик киришмалар (темир ва кислород) учун ички геттерлар ролини бажариши кўрсатилган: оптик фаол, тугунлараро кислороднинг концентрацияси 50-60% камаяши, кремнийга қўшимча равишда нодир ер элементлари киришмалари билан бирга ҚЭЭ атомлари киритилишида темир атомлари билан боғлиқ сатхлар кузатилмаслиги аниқланган. Структуравий таҳлил натижаларига кўра бундай намуналарда темир ва кислород иштирокидаги электронейтрал комплекслар кузатилиши аниқланган.

9. Кремнийли МДЯ-структуралар таглигида ҚЭЭ киришмаларининг мавжудлиги МДЯ-структураларнинг юза ҳолатлари зичлиги ортишига ва Si-SiO₂ ажралиш чегарасида мусбат заряд ҳосил бўлишига олиб келиши аниқланган. ҚЭЭ киришмалари мавжудлиги N_{ss} юза ҳолатлари зичлигининг тақсимланиши кремнийли МДЯ-структуралар яримўтказгичнинг E_g тақиқланган зонаси кенглиги бўйича ўзгаришига олиб келиши кўрсатилган.

10. Заряд боғланишли асбобларнинг кремний таглигида қийин эрувчи элементлар (W, Mo, Zr ва бошқалар) мавжудлиги юза ҳолатлари зичлигини 1 тартибга, юзани рекомбинацияланиш тезлигини эса оддий ЗБА-структуралардагига нисбатан 2 тартибга камайишига олиб келиши аниқланган.

**РАЗОВЫЙ НАУЧНЫЙ СОВЕТ
НА ОСНОВЕ НАУЧНОГО СОВЕТА DSc.30.12.2019.FM.65.01
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ
ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ПРИ
НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА**

ДАЛИЕВ ШАХРУХ ХОЖАКБАРОВИЧ

**ПРОЦЕССЫ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В КРЕМНИИ И
КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУРАХ, ЛЕГИРОВАННЫХ
ТУГОПЛАВКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

01.04.10 – физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА (DSc) ФИЗИКО-
МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК**

Ташкент – 2020

Тема диссертации доктора наук (DSc) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2019.4.DSc/FM.147.

Диссертация выполнена в Научно-исследовательском институте физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекском, русском, английском (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (iplt.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный консультант:

Мамадалимов Абдугафур Тишабаевич
доктор физико-математических наук, академик

Официальные оппоненты:

Арипов Хайрулла Кабилович
доктор физико-математических наук, профессор

Исмаилов Қанатбай Абдреймович
доктор физико-математических наук, профессор

Онаркулов Каримберди Эгамбердиевич
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация:

Наманганский государственный университет

Защита диссертации состоится «___» _____ 2020 г. в ___ часов на заседании Разового научного совета на основе Научного совета DSc.30.12.2019.FM.65.01 по присуждению ученых степеней при Институте ионно-плазменных и лазерных технологий по адресу: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 33. Тел./Факс: (+99871) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz).

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

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2020 года.

(реестр протокола рассылки _____ от «_____» _____ 2020 года).

Х.Б.Ашуров
председатель Научного совета по
присуждению ученых степеней, д.т.н.,
профессор,

И.Д.Ядгаров
ученый секретарь Научного совета по
присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н.,
старший научный сотрудник

М.Ш.Курбанов
председатель научного семинара при
Научном совете по присуждению ученых
степеней, д.т.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора наук (DSc))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время во всём мире практически во всех областях науки и техники используются приборы твердотельной электроники. Область применения твердотельных приборов постоянно расширяется, создаются принципиально новые приборы, стимулирующие развитие промышленности в новых направлениях, что требует существенного повышения совершенства структуры Si – основного материала современной полупроводниковой твердотельной электроники.

В связи с этим исследования, направленные на изучение процессов дефектообразования в Si, легированном различными примесями и установление управляемых способов стабилизации параметров полупроводниковых приборов являются одной из важных задач.

Анализ тенденций развития микроэлектроники во всём мире на сегодня показывает, что в будущем большую часть производимых микросхем будут составлять цифровые логические интегральные микросхемы, базовым элементом которых являются структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП-структуры). В устройствах обработки цифровых и аналоговых сигналов уже сейчас широко применяются приборы с зарядовой связью (ПЗС), а в качестве твердотельных фотоприемных устройств – фоточувствительные ПЗС, работа которых также основана на базе МДП структур.

Однако, с повышением степени интеграции микросхем, при создании больших и сверхбольших интегральных микросхем всё большее влияние на работу приборов оказывают поверхностные и объемные дефекты в многослойных кремниевых структурах. Это вызывает необходимость более углубленного изучения дефектов около границы полупроводник-диэлектрик и в объеме полупроводника и выяснения их вклада в изменение параметров изготавливаемых приборов. Изучение взаимодействия между примесными частицами и дефектами структуры полупроводника, влияния гетерогенности строения МДП-структуры на перераспределение примесей открывает возможность повышения стабильности рабочих параметров микросхем на основе МДП-структур.

В мире на сегодня, изучение процессов дефектообразования в монокристаллическом кремнии, в частности, реализация научных исследований в следующих направлениях считается одной из важных задач: исследование процессов формирования дефектных центров в кремнии, легированном примесями тугоплавких элементов (ТПЭ) под воздействием различных факторов; изучение влияния технологических примесей на механизмы образования глубоких центров в кремнии с примесями тугоплавких элементов; установление закономерностей в формировании энергетического спектра глубоких уровней, создаваемых примесями тугоплавких элементов, их взаимодействия с другими примесями и структурными дефектами решетки, влияния термических и радиационных дефектов на формирование дефектной структуры кремния с примесями тугоплавких элементов. Научно-

исследовательские работы, проводимые в указанных направлениях, указывают на актуальность темы данной диссертации.

В годы Независимости, учеными Узбекистана уделяется большое внимание изучению процессов легирования полупроводниковых материалов и многослойных структур примесями с глубокими уровнями (ГУ). Достигнуты определенные успехи в разработках по повышению фоточувствительности кремниевых структур путем введения примесей переходных и редкоземельных элементов. В соответствии со Стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан, является наиболее важным повышение эффективности отрасли микроэлектроники на основе теоретических и практических исследований в области физики полупроводников за счет внедрения инновационных технологий.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в постановлениях Президента Республики Узбекистан от 15 декабря 2010 года № ПП-1442 «О приоритетных направлениях развития индустрии Республики Узбекистан на 2011-2015 годы» и от 17 февраля 2017 № ПП-2789 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организаций, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности», Стратегии действий по пяти приоритетным направлениям развития Республики Узбекистан в 2017-2021 годах, утвержденной Указом Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 года № УП-4947, а также в других нормативно-правовых актах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики. Настоящая работа выполнена в соответствии с Приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан: Ф2 «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение» и ППИ-3 «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение, транспорт, машино- и приборостроение, развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники и электронного приборостроения».

Обзор международных научных исследований по теме диссертации¹. Научные исследования в области физики полупроводников и полупроводникового материаловедения проводятся в научных центрах, институтах и университетах ведущих стран, в том числе в университетах Цинциннати и Калифорнийском университете (США), фирмах Philips Semiconductors, SGS-Thomson, а фирмой Intel и Yale University (США), в Токийском (Япония) и Берлинском техническом университете (Германия) ведутся исследования по созданию оптоэлектронных приборов на основе кремния, легированного различными примесями. В Цюрихском исследовательском центре (Швейцария) и Университете прикладных наук Фонтис (Нидерланды) проводятся исследования по получению новых полупроводниковых материалов, физика наноструктур исследуется в Физико-техническом

¹Обзор международных научных исследований по теме диссертации проведен на основе: De Luca, A., Texier, M., Burle, N., Oison, V., Pichaud, B., Portavoce, A., Tungsten diffusion in silicon. J. Applied Physics, Volume: 115; Issue: 1; United States: N. p., 2014. Web. doi:10.1063/1.4859455.

институте Санкт-Петербург (Российская Федерация), технологией получения структур микро- и нанoeлектроники занимаются в ОАО «Планар» (Республика Беларусь).

В результате проводимых в мире исследований по получению материалов, легированных примесями различных элементов и изучению структур на их основе получен ряд интересных научных результатов, в частности, ниже приведенные: в Yale University (США) получены первые образцы светоизлучающих кремниевых структур содержащих ионы редкоземельных элементов – эрбия (Er); разработаны структуры содержащие, редкоземельные элементы в кристаллической решетке (Лундский университет (Швеция) и Женевский университет (Швейцария)); изучена структура эрбиевых центров (Nation institute for materials science Yokohama); созданы приборы для систем экологического наблюдения (Japan atomic energy research institute); создана технология термодатчиков с нановключениями и наноструктур с высоким магнитосопротивлением (Ташкентский государственный технический университет), развита теория низкоразмерных сверхпроводников (Институт Ядерной физики (Узбекистан)).

В настоящее время проводятся исследования в следующих перспективных направлениях, в том числе: по разработке датчиков диагностики температуры и других параметров с улучшенными функциональными характеристиками на основе полупроводниковых материалов с нанокластерами Ni и Mn; по разработке датчиков влажности и температуры на основе легированного Si; по изготовлению фоточувствительных полевых транзисторов с отрицательным градиентом примесей в канале и других приборов с улучшенными функциональными характеристиками на основе полупроводниковых материалов; по изучению процессов термического и радиационного дефектообразования в кремнии с примесями переходных элементов; изучению наноразмерных и квантовых эффектов, протекающих в двумерных слоях межфазных границ.

Степень изученности проблемы. До настоящего времени внимание ученых и разработчиков направлено на изучение физических процессов, происходящих в кремнии и кремниевых структурах, а также на разработку способов повышения стабильности их параметров, учеными из США и Японии Milnes A., Struthers D.J., Weber E.R., Tokumari Y. для повышения фоточувствительности использованы процессы легирования приграничных слоев кремния нетрадиционными примесями (Ti, Ni, Gd, Sm и др.) в малых концентрациях с последующим его термическим окислением и нанесением металлических (Al, Cu, W) электродов.

Российскими учеными Лебедевым А.А., Берманом Л.С., Фистулем В.И. изучено поведение различных примесей с глубокими уровнями в кремнии и определены энергетические спектры этих уровней.

Определенный вклад в развитие физики локальных центров в полупроводниках и полупроводниковых структурах внесли ученые Узбекистана, среди которых академики Саидов М.С., Муминов Р.А., Мамадалимов А.Т. и другие. Свойства легированных компенсирующими примесями полупроводников были

изучены академиками Бахадырхановым М.К., Зайнабидиновым С.З., ими обнаружены эффекты температурного и ИК-гашения в компенсированном кремнии, легированном глубокими примесями. Абдурахмановым К.П. и др. были изучены процессы дефектообразования в кремнии, легированном различными примесями и определен энергетический спектр ряда примесей. Профессорами Власовым С.И., Ариповым Х.К., Исмаиловым К.А. были исследованы физические процессы, протекающие на межфазных границах кремниевых диодных и транзисторных структур и установлено, что основным фактором, определяющим отличие свойств скрытой границы раздела от свойств объема полупроводника и диэлектрика, является наличие поверхностных электронных состояний, создающих энергетические уровни в запрещенной зоне полупроводника.

Несмотря на большое число экспериментальных данных по изучению свойств полупроводников и полупроводниковых структур, до настоящего времени отсутствует картина, позволяющая прогнозировать поведение кремния и многослойных структур на его основе при воздействии различных внешних факторов: давления, радиации и солнечного света.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного или научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках проектов научных исследований Национального университета Узбекистана и Научно-исследовательского института физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана в соответствии с тематическими планами грантов Агентства по науке и технологиям Республики Узбекистан: ФМ-2-038 «Исследование физических процессов в объеме и на границе раздела многослойных структур типа металл-диэлектрик-полупроводник на основе кремния, легированного тугоплавкими элементами» (2007-2008 гг.), ОТ-Ф2-081 «Изучение закономерностей дефектообразования в монокристаллическом кремнии с примесно-дефектными ассоциатами и динамических процессов формирования скрытых границ раздела полупроводник – диэлектрик» (2007–2011 гг.); ЁФ-2-08 «Изучение влияния радиации на образование и отжиг дефектов в кремнии и кремниевых многослойных структурах с примесями редкоземельных элементов» (2010-2011 гг.) и ЁФ-2-13 «Влияние примесей подгруппы титана на электро-физические свойства кремниевых структур» (2016-2017 гг.) и МУ-ФЗ-20171025461 «Электрофизические характеристики и свойства кремниевых МДП-структур с оксидами лантана, гадолиния и европия в качестве диэлектрика» (2018-2019 гг.).

Целью исследования является комплексное исследование процессов дефектообразования в кремнии и кремниевых структурах, легированных примесями тугоплавких элементов, а также влияния некоторых редкоземельных элементов на эти процессы с помощью нестационарной емкостной спектроскопии, фотоемкости и инфракрасной спектроскопии.

Задачи исследования:

разработать физико-химические аспекты и технологию легирования кремния примесями тугоплавких элементов;

исследовать электрофизические свойства образцов Si, легированных тугоплавкими элементами как диффузионным путем, так и в процессе выращивания кремния;

определить энергетический спектр глубоких центров, создаваемых примесями тугоплавких элементов и идентифицировать их;

изучить влияние технологических факторов на эффективность образования глубоких центров, создаваемых примесями тугоплавких элементов в кремнии;

исследовать влияние внешних факторов (облучения, температуры и др.) на свойства кремния и кремниевых многослойных структур с примесями тугоплавких элементов;

изучить взаимодействие атомов тугоплавких элементов с ростовыми примесями и примесями некоторых редкоземельных элементов в кремнии;

изучить влияние атомов тугоплавких и редкоземельных элементов на параметры кремниевых структур типа металл-диэлектрик-полупроводник.

Объектом исследования является монокристаллический кремний, выращенный методом Чохральского и бестигельной зонной плавки, легированный примесями тугоплавких и редкоземельных элементов и МДП-структуры на их основе.

Предметом исследования являются процессы дефектообразования в кремнии и кремниевых структурах с примесями тугоплавких и редкоземельных элементов.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использованы методы нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней, фотоемкости, фотопроводимости, инфракрасной спектроскопии и рентгеновской топографии.

Научная новизна диссертационного исследования:

впервые проведена идентификация энергетического спектра глубоких уровней, создаваемых примесями тугоплавких элементов (Mo, W, Ti, Zr и Hf) в Si с помощью методов емкостной спектроскопии (DLTS и ФЭ);

разработаны физико-химические аспекты и технология легирования Si примесями тугоплавких элементов;

установлено, что большинство этих примесей, введенных в Si при выращивании, не проявляют электрической активности и активировать их можно путем длительных высокотемпературных обработок;

впервые установлено, что эффективность процессов дефектообразования в Si примесями ТПЭ зависит от способа легирования, совершенства дефектной структуры, термической предыстории и технологических режимов легирования исходного кремния примесями ТПЭ;

обнаружено, что присутствие примесей ТПЭ в кремнии приводит к снижению эффективности образования радиационных дефектов (РД): уменьшает скорость введения А-центров в 5÷6 раз по сравнению с

контрольными образцами и препятствует образованию Е-центров; при этом обнаружено, что эффективность образования РД в кремнии с ТПЭ зависит также от содержания неконтролируемых технологических примесей;

установлена возможность создания фотопреобразователей, обладающих фоточувствительностью в области спектра 3-5 мкм и равномерной фотогенерацией, с повышенной термостабильностью, и воспроизводимостью фотоэлектрических параметров на основе кремния, легированного примесями тугоплавких элементов;

впервые установлено, что присутствие примесей редкоземельных элементов в решетке кремния существенно повышает растворимость примесей ТПЭ (Нf, W или Мо) и одновременно снижает эффективность образования термодфектов;

показано, что примеси редкоземельных элементов в Si в присутствии примесей ТПЭ выступают в роли внутренних геттеров для различных неконтролируемых технологических примесей (железа и кислорода);

обнаружено, что наличие примесей ТПЭ в подложке кремниевых МДП-структур, приводит к увеличению плотности поверхностных состояний и образованию положительного заряда на границе раздела Si-SiO₂, а также изменению распределения плотности поверхностных состояний N_{ss} по ширине запрещенной зоны E_g полупроводника кремниевых МДП-структур;

установлено, что присутствие примесей тугоплавких элементов (W, Мо, Zr и др.) в кремниевой подложке приборов с зарядовой связью приводит к уменьшению плотности поверхностных состояний на 1 порядок, а скорости поверхностной рекомбинации в 2 раза по сравнению с обычными ПЗС-структурами.

На основе развитых и обоснованных в диссертации научных положений получена совокупность новых экспериментальных результатов, позволяющая создать новое научное направление: «Физические основы процессов дефектообразования в кремнии и кремниевых многослойных структурах, легированных тугоплавкими элементами».

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработаны рекомендации по созданию фотопреобразователей, обладающих фоточувствительностью в области спектра 3-5 мкм, с повышенной термостабильностью, равномерной фотогенерацией и воспроизводимостью фотоэлектрических параметров на основе кремния, легированного примесями тугоплавких элементов;

предложен процесс предварительного введения редкоземельных элементов перед диффузией примесей тугоплавких элементов в кремний, и проявляемые редкоземельными элементами свойства геттеров для неконтролируемых примесей в кремнии могут быть использованы при производстве полупроводниковых диодов с p⁺-n-p⁺-структурой;

разработаны способы повышения термической стабильности и радиационной стойкости параметров кремниевых структур путем введения примесей ТПЭ.

Достоверность результатов исследований подтверждается применением методов нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней, фотоемкости, методов фотопроводимости, инфракрасной спектроскопии, имеющих высокую чувствительность по концентрации, высокую разрешающую способность по энергии и возможность раздельного определения параметров каждого из уровней, а также хорошей воспроизводимостью результатов, полученных разными методами.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в расширении представлений о физических процессах, происходящих в монокристаллическом кремнии и кремниевых структурах, легированных примесями тугоплавких элементов.

Практическое значение результатов исследования заключается в разработке физико-химических аспектов и технологии легирования кремния примесями тугоплавких элементов и разработке способов создания внутренних геттеров, образуемых примесями РЗЭ в присутствии примесей ТПЭ в кремнии для различных неконтролируемых технологических примесей (железа и кислорода), а также в том, что полученные результаты по повышению термической стабильности и радиационной стойкости параметров кремния путем введения ТПЭ могут быть использованы при изготовлении различных полупроводниковых приборов.

Внедрение результатов исследования. По результатам изучения процессов дефектообразования в монокристаллическом кремнии и кремниевых структурах, легированных тугоплавкими и редкоземельными элементами:

разработанные оптимальные технологические режимы легирования кремния примесями тугоплавких элементов, новый способ геттерирования неконтролируемых технологических примесей (железа, кислорода и др.), путем введения тугоплавких и редкоземельных элементов использованы в АО «FOTON» Акционерной компании «Узэлтехсаноат» (Справка АК «Узэлтехсаноат» от 25 ноября 2019 года № 02-1953). Использование научных результатов позволило снизить дефектность полупроводниковых пластин и получить контактные области с низким последовательным сопротивлением к диодным структурам на основе кремния на АО «FOTON»;

предложенный процесс введения редкоземельных элементов в процессе диффузии традиционных примесей бора и фосфора и проявляемые редкоземельными элементами свойства геттеров для неконтролируемых примесей в кремнии использованы в ОАО «Новосибирский завод полупроводниковых приборов с ОКБ» при производстве полупроводниковых диодов с p^+n-n^+ структурой (Справка ОАО «Новосибирский завод полупроводниковых приборов с ОКБ» от 6 декабря 2019 года № 04/401-543);

применение научных результатов диссертации позволило сохранить выдерживаемую мощность при циклических испытаниях и снизить токи утечки выпускаемых диодов до одного порядка.

Обнаруженное явление существенного повышения растворимости примесей тугоплавких элементов (Hf, W или Mo) в кремнии и одновременного снижения эффективности образования термодфектов в присутствии примесей редкоземельных элементов в решетке кремния было использовано при анализе результатов влияния примесей W на радиационное дефектообразование в кристаллах BaFI. Применение данных результатов привело к установлению факта препятствия примеси W созданию радиационных дефектов и было использовано при выполнении научного фундаментального проекта Ф2-ФА-Ф118 «Закономерности радиационно-стимулированных явлений в оксидных и фторидных твердотельных материалах, применяемых в качестве детекторов ионизирующих излучений» Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан (Справка Академии наук Республики Узбекистан от 05 декабря 2019 года № 2/1255-3184);

Разработаны физико-химические аспекты и технология легирования кремния примесями тугоплавких элементов а также установлено, что большинство примесей ТПЭ в кремнии, введенных при выращивании, не проявляют электрической активности и активировать их можно путем длительных высокотемпературных обработок;

установлена возможность создания фотопреобразователей, обладающих фоточувствительностью в области спектра 3-5 мкм, с повышенной термостабильностью, равномерной фотогенерацией и воспроизводимостью фотоэлектрических параметров на основе кремния, легированного примесями тугоплавких элементов;

вышеописанные результаты использовались при создании фотоэлектрических кремниевых р-п-структур, использование научных результатов позволило повысить эффективность фотоэлектрической энергии кремниевых р-п-структур при выполнении научного фундаментального проекта А-4-12 «Эффекты наноплазмоники и с их помощью повышение эффективности получения фотоэлектрической энергии кремниевых р-п-структур» Андижанского государственного университета. (Справка Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан от 30 ноября 2019 года № 87-03-4624).

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 10 международных и 8 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 44 научных труда, из них 2 монографии, 22 статьи в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Кабинете Министров Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка опубликованных работ, содержит 64 рисунка, 3 таблицы, список использованной литературы из 155 наименований и изложена на 208 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе «**Особенности процессов дефектообразования в кремнии и кремниевых структурах**» приведены результаты работ по исследованию электрофизических свойств кремния с примесями тугоплавких и редкоземельных элементов. Проведен анализ свойств кремния, легированного тугоплавкими элементами, как в процессе выращивания, так и диффузионным методом. Рассмотрено влияние технологических примесей – кислорода и углерода на свойства кремния, легированного тугоплавкими элементами. Проанализированы данные по влиянию термообработки и облучения на электрофизические свойства кремния с примесями ТПЭ и редкоземельных элементов (РЗЭ), а также по исследованию образования структурных дефектов в кремнии с различным содержанием кислорода.

Приведен анализ современного состояния исследований поведения различных дефектов в кремнии и кремниевых структурах, а также влияния различных внешних факторов на свойства легированного кремния.

Описаны основные закономерности емкостной спектроскопии глубоких уровней в полупроводниках и полупроводниковых структурах. Изложена суть классического метода DLTS, основанного на измерении разности релаксационного сигнала в моменты времени t_1 и t_2 . Описана методика измерения спектров DLTS в разных режимах и расчета спектров DLTS, полученных путем однократного и многократного сканирований.

Описана методика измерения спектров ИК-поглощения для определения концентрации кислорода и углерода в кремнии с помощью инфракрасного спектрофотометра SPECORD-72-IR, работающего в двухлучевой схеме в ИК- области спектра от 1200 до 400 см^{-1} .

В конце главы подробно описываются технологии проведения термических обработок и изготовления диодных структур. Детально изложены особенности технологии легирования кремния примесями тугоплавких элементов.

Вторая глава «**Процессы дефектообразования в кремнии с примесями тугоплавких элементов**» посвящена изучению энергетического спектра дефектных центров в кремнии, легированном примесями тугоплавких элементов. Изложены результаты исследования процессов дефектообразования в кремнии, легированном тугоплавкими элементами – W, Mo, Zr, Ti и Hf, определены глубокие энергетические уровни,

создаваемые в запрещенной зоне кремния этими примесями и проведена идентификация их энергетического спектра в Si с помощью методов емкостной спектроскопии (DLTS и ФЕ).

Показано, что диффузионное введение атомов вольфрама в кремний приводит к образованию ряда глубоких уровней (ГУ) с энергиями ионизации $E_c - 0.22$ эВ (пик А), $E_c - 0.30$ эВ (пик В) и $E_c - 0.39$ эВ (пик С) в n-Si<W>, причем превалирует второй ГУ, $E_c - 0.30$ эВ. В образцах p-Si<W> обнаружены два глубоких уровня с энергиями ионизации $E_v + 0.31$ эВ (пик D) и $E_v + 0.35$ эВ (пик E). Анализ полученных результатов показывает, что эффективность образования глубоких уровней $E_c - 0.30$ эВ, $E_c - 0.39$ эВ, $E_v + 0.31$ эВ и $E_v + 0.35$ эВ зависит от температуры диффузии $T_{диф}$ и скорости охлаждения $\vartheta_{охл.}$ (рис.1 и рис.2).

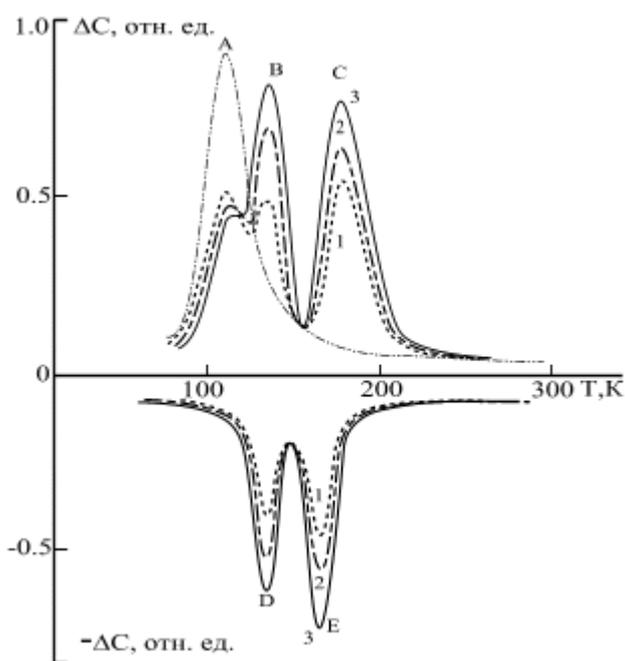


Рис.1. Типичные спектры DLTS образцов n-Si<W> и p-Si<W>. $T_{диф.}, ^\circ\text{C}$: 1 - 1000, 2 - 1100, 3 - 1200, пик А - контрольный n-Si

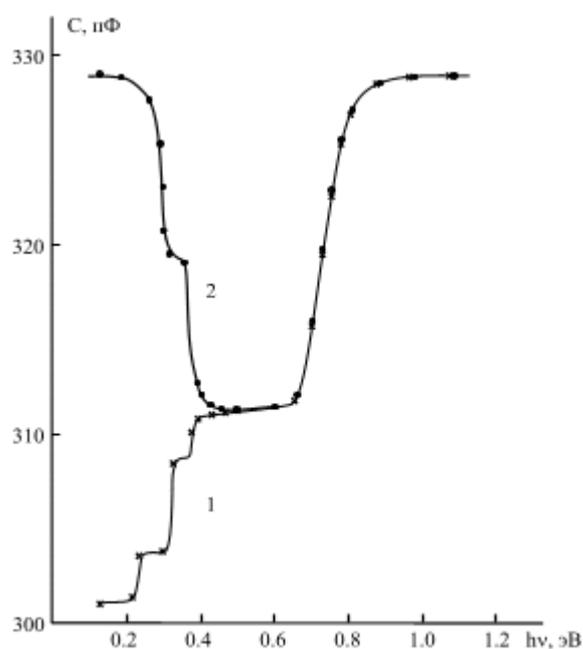


Рис.2. Спектры ФЕ (1) и ИФЕ (2) диода из n-Si<W>

Сопоставление спектров DLTS и ФЕ образцов Si<W> показало, что наблюдается хорошая корреляция между термическими и оптическими измерениями для уровней $E_c - 0.22$ эВ, $E_c - 0.30$ эВ, $E_c - 0.39$ эВ, $E_v + 0.31$ эВ и $E_v + 0.35$ эВ.

Другой спектр энергетических уровней обнаружен для примеси молибдена в кремнии. Установлено, что диффузионное введение Mo в Si при 1200°C с последующим быстрым охлаждением приводит к образованию двух ГУ в верхней половине запрещенной зоны с фиксированными энергиями ионизации $E_c - 0.20$ эВ и $E_c - 0.29$ эВ. В нижней половине

запрещенной зоны этих образцов обнаружен один глубокий уровень с энергией ионизации $E_v+0.36$ эВ.

Сравнение результатов DLTS образцов n-Si<Mo> и p-Si<Mo>, легированных молибденом при разных температурах, показывает, что эффективность образования глубоких уровней, связанных с молибденом, так же, как и в случае с вольфрамом, зависит от температуры диффузии $T_{диф.}$ и скорости охлаждения $v_{охл.}$ после нее: концентрации ГУ увеличиваются с ростом $T_{диф.}$ и $v_{охл.}$ (рис.3 и рис.4). Установлено, что термическая и оптическая энергии активации уровней в Si<Mo> также совпадают в пределах ошибки измерений.

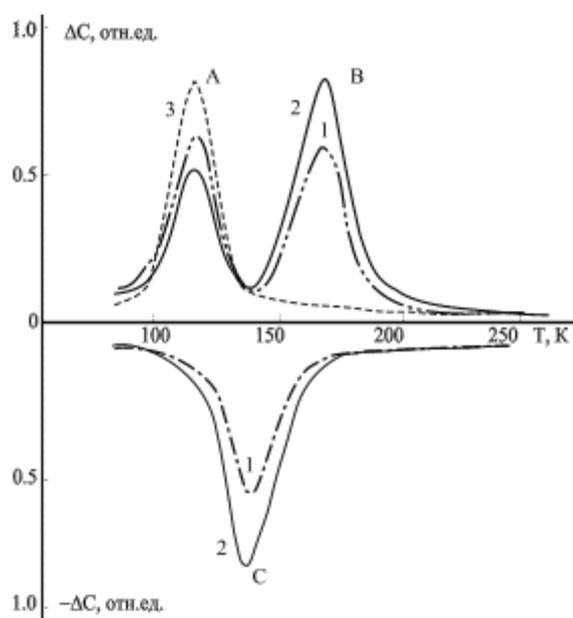


Рис.3. Типичные спектры DLTS образцов n-Si<Mo> и p-Si<Mo> $T_{диф.}$, °C: 1 - 1000, 2 - 1200, 3 – контрольный n-Si

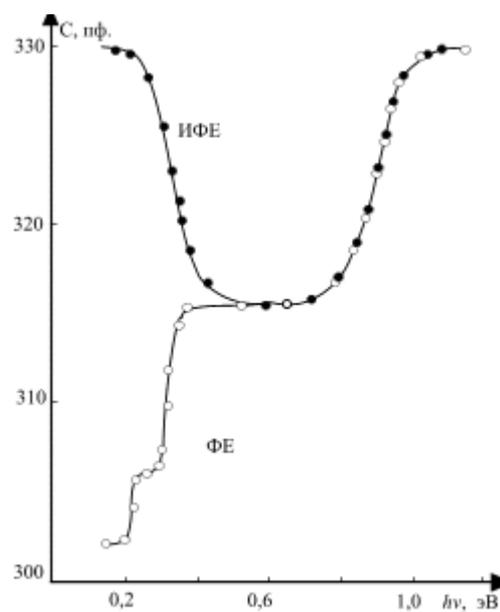


Рис.4. Спектры фотоемкости (1) и индуцированной фотоемкости (2), образцов n-Si<Mo> $T_{диф.}$, °C: 1200

Разработаны физико-химические аспекты и технология легирования кремния примесями тугоплавких элементов; установлено, что большинство примесей ТПЭ в кремнии, введенных при выращивании, не проявляют электрической активности и активировать их можно путем длительных высокотемпературных обработок;

Изучено взаимодействие примесей тугоплавких элементов с различными состояниями ростовых примесей с помощью ИК-спектроскопии.

Показано, что легирование Si примесями ТПЭ приводит к уменьшению концентрации оптически активного кислорода $N_O^{опт}$ на 20-30% в зависимости от концентрации введенных примесей (рис.5 и рис.6). Измерения спектров ИК-поглощения в термообработанных образцах кремния показали, что ВТО при 1100°C приводит к преципитации атомов кислорода с образованием частиц SiO_2 , в результате этого происходит уменьшение $N_O^{опт}$ - на 40-50% (рис.5, кривая 3). При этом часть атомов вольфрама и других ТПЭ при введении в предварительно термообработанный кремний, по всей видимости,

оседает на скоплениях SiO_2 , в результате чего они, вероятно, и теряют электрическую активность. Об этом свидетельствует уменьшение концентрации ГУ, связанных с атомами ТПЭ.

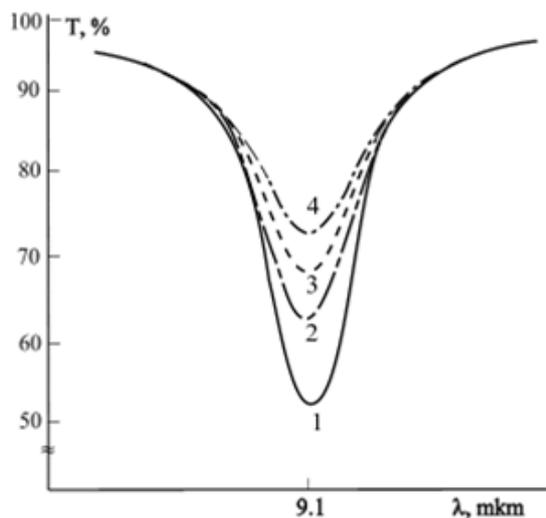


Рис.5. Типичные спектры ИК-поглощения контрольных образцов n-Si (1), n-Si<W> (2), n-Si+ВТО (3), n-Si<W> с предварительным ВТО при 1100°C (4)

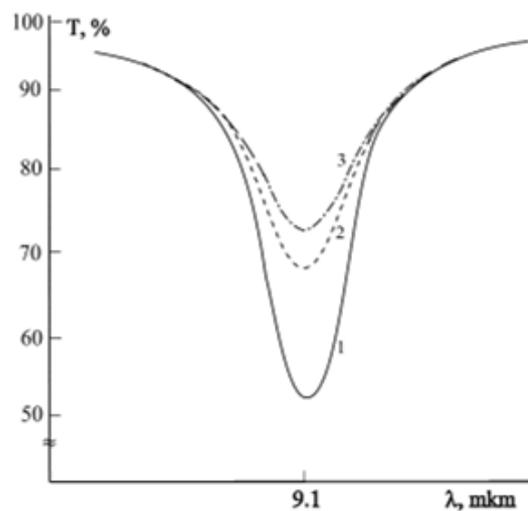


Рис.6. Спектры ИК-поглощения в контрольных образцах n-Si и легированных образцах n-Si<Mo> $T_{\text{диф}}$: 2 - 1100°C, 3 - 1250°C

Исследовано влияние примесей тугоплавких элементов – вольфрама, молибдена, циркония и др. на электрофизические свойства Si и определена их роль в повышении фоточувствительности легированного кремния. Из измерений спектров фотопроводимости обнаружено, что исследуемые структуры на основе кремния, легированного ТПЭ, обладают фоточувствительностью в области спектра 3-5 мкм, с максимумом $\lambda_{\text{Si}<\text{Zr}>} = 4.1$ мкм при комнатной температуре. На основе этих структур нами были изготовлены лабораторные образцы фотопреобразователей, обладающих повышенной термической стабильностью, равномерной фотогенерацией и воспроизводимостью фотоэлектрических параметров по сравнению с аналогичными структурами на основе Si.

В третьей главе «Влияние внешних факторов на процессы дефектообразования в кремнии с примесями тугоплавких элементов» приведены результаты исследования влияния термообработки (ТО) на поведение глубоких уровней в кремнии, легированном примесями тугоплавких элементов, изучения кинетики низкотемпературного отжига уровней примесей тугоплавких элементов и влияния на них радиации в кремнии.

Влияние ТО на поведение ГУ в кремнии, легированном примесями ТПЭ подробно рассмотрено на примере вольфрама в Si. Приведены результаты измерений ВФХ и спектров DLTS в n-Si<W>. Обнаружено, что при изотермическом отжиге концентрации N_t глубоких уровней $E_c - 0.30$ эВ и $E_c - 0.39$ эВ изменяются немонотонно со временем отжига: концентрации обоих уровней при малых временах возрастают, затем концентрация уровня $E_c -$

0.30 эВ резко падает, а уменьшение концентрации ГУ $E_c - 0.39$ эВ происходит значительно медленнее. Изменение концентрации $E_c - 0.22$ эВ, который наблюдается также и в контрольных образцах (без W), противоположно изменению концентрации уровней вольфрама в кремнии.

Сравнение кинетики отжига ГУ в образцах n-Si<W> с различным содержанием кислорода показало, что в процессах распада твердого раствора кремний-вольфрам немаловажную роль играет и кислород. В образцах, где концентрация кислорода $N_{O^{opt}} \sim 10^{18}$, отжиг глубоких уровней происходит в 3-4 раза медленнее, чем в образцах с $N_{O^{opt}} \sim 2 \cdot 10^{16}$.

Исследовано влияние радиации на свойства кремния, легированного тугоплавкими элементами и установлено, что что γ -облучение заметного влияния на параметры ГУ (энергию ионизации E_t и сечение захвата электронов σ_n) в n-Si<W> не оказывает, но с ростом дозы облучения $\Phi > 1 \cdot 10^{18}$ кв/см²·с происходит трансформация спектров DLTS (рис.7).

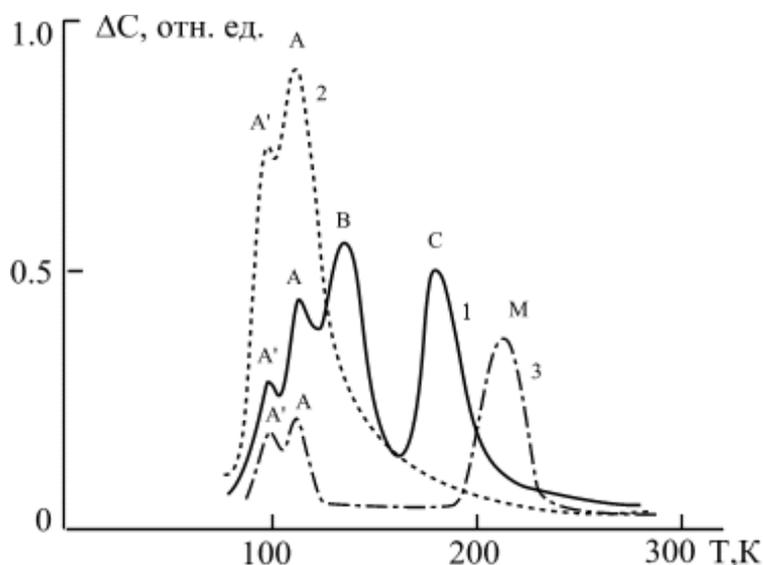


Рис.7. Типичные спектры DLTS n-Si<W> (кривая 1) и контрольного термообработанного n-Si (кривая 2 - с $N_{O^{opt}} \sim 8 \cdot 10^{17}$ см⁻³, кривая 3 - с $N_{O^{opt}} \sim 8 \cdot 10^{16}$ см⁻³) после облучения дозой $\Phi > 1 \cdot 10^{18}$ кв/см²·с

Показано, что присутствие атомов вольфрама или других ТПЭ в кремнии при γ -облучении приводит к снижению скорости введения А-центров (комплексов вакансия-кислород) в 3÷4 раза по сравнению с контрольными образцами и препятствует образованию Е-центров (комплексов вакансия-фосфор). Обнаружено, что при высоких дозах γ -облучения Si с примесями ТПЭ наблюдается уменьшение концентрации ГУ, связанных с атомами тугоплавких элементов. Предполагается, что этот эффект обусловлен тем, что при облучении возможен процесс последовательного захвата вакансий атомами ТПЭ, что приводит к образованию электронейтральных комплексов типа вакансия-атом ТПЭ, что может, в свою очередь, ограничивать скорость введения радиационных дефектов.

Установлено, что эффективность образования РД зависит также от содержания оптически активного междоузельного кислорода N_{O}^{opt} .

В четвертой главе «Влияние примесей тугоплавких элементов на характеристики кремниевых структур» приведены результаты исследования дефектообразования в МДП-структурах на основе кремния с примесями ТПЭ (Mo, W, Ti, Zr и Hf). Измерения вольт-фарадных характеристик и спектров СС-DLTS показали, что введение примесей ТПЭ в Si в процессе выращивания из расплава не приводит к образованию каких-либо ГУ в запрещенной зоне кремниевой подложки. Рассмотрим результаты измерений ВФХ на примере МДП-структур на основе Si<Mo> (рис.8), которые показали, что они смещены в сторону отрицательных напряжений по сравнению с контрольными образцами. Это свидетельствует о том, что введение молибдена в Si приводит к изменению генерационных характеристик структур: увеличению плотности поверхностных состояний N_{ss} МДП-структур и образованию положительного заряда на границе раздела Si-SiO₂.

Измерения спектров СС-DLTS в МДП-структурах на основе Si, легированного Mo при выращивании и контрольных МДП-структурах (без примеси Mo) показали, что их спектры практически совпадают, каких-либо пиков в заметной концентрации не обнаружено (рис.9, кривая 1). Измерения распределения N_{ss} по ширине запрещенной зоны E_g полупроводника структур с примесью Mo показали, что спектр распределения зависимости N_{ss} от E_g имеет типичный U-образный характер.

Иная картина наблюдается в МДП-структурах с диффузионно введенным Mo. Предварительно Si легировался Mo диффузионным методом в интервале температур 1000-1200°C в течение 2 часов из нанесенного на поверхность Si слоя металлического Mo. Затем, на пластинах n-Si<Mo> с удельным сопротивлением $\rho=5\div 20$ Ом·см изготавливались МДП-структуры.

Измерения ВФХ МДП-структур с диффузионно введенным Mo (рис. 8, кривая 4), показали, что они еще больше сдвинуты в сторону отрицательных смещений относительно контрольных образцов (рис.8, кривая 3). Известно, что сдвиг ВФХ-характеристик в сторону отрицательных напряжений свидетельствует об увеличении плотности поверхностных состояний (ППС) в структурах.

Это свидетельствует о том, что наличие электроактивных атомов Mo в кремниевой подложке исследуемых структур приводит к еще большему увеличению N_{ss} и образованию положительного заряда на границе раздела Si-SiO₂. Измерения спектров СС-DLTS в легированных (рис. 9, кривые 2 и 3) и контрольных (рис.9, кривая 1) МДП-структурах показали, что на спектрах легированных образцов наблюдаются 2 пика с максимумами при температурах $T_{max} = 125$ К и $T_{max} = 160$ К, причем их амплитуда растет с увеличением концентрации электроактивного Mo. В контрольных образцах такие пики не обнаружены. Численные расчеты параметров дефектов, обусловленных этими пиками, показали, что пик с максимумом при $T = 125$ К соответствует уровню с энергией ионизации $E_c - 0.20$ эВ, а пик при $T = 160$ К - уровню с энергией ионизации $E_c - 0.29$ эВ. Измерения спектров СС-DLTS в

легированных (рис.9, кривые 2 и 3) и контрольных (рис.9, кривая 1) МДП-структурах показали, что на спектрах легированных образцов наблюдаются 2 пика с максимумами при температурах $T_{\max} = 125$ К и $T_{\max} = 160$ К, причем их амплитуда растет с увеличением концентрации электроактивного Мо.

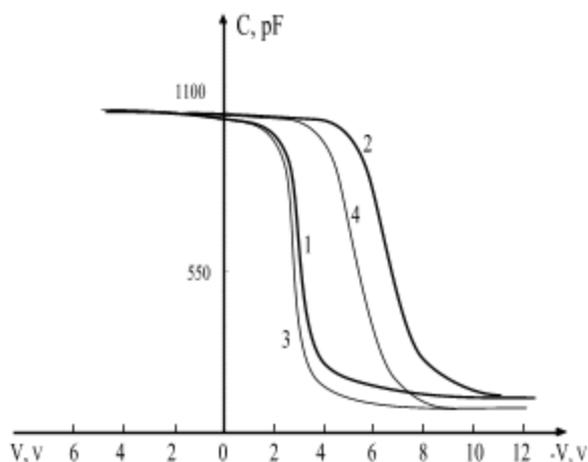


Рис.8. ВФХ МДП-структур с Мо: 1,3 – контрольные МДП-структуры без примеси Мо, 2 - МДП-структура на основе Si<Mo> выращ., 4 - МДП-структура Si< Mo> диф.

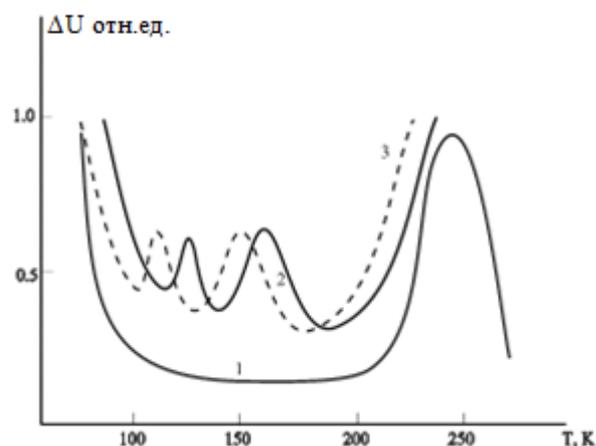


Рис. 9. DLTS - спектры контрольных (1) и легированных молибденом МДП-структур (2 и 3)

В контрольных образцах такие пики не обнаружены. Численные расчеты параметров дефектов, обусловленных этими пиками, показали, что пик с максимумом при $T = 125$ К соответствует уровню с энергией ионизации $E_c - 0.20$ эВ, а пик при $T = 160$ К - уровню с энергией ионизации $E_c - 0.29$ эВ.

Было также изучено изменение распределения N_{ss} по ширине запрещенной зоны E_g полупроводника МДП-структур с примесью Мо и без Мо. Спектры распределения N_{ss} по ширине запрещенной зоны E_g полупроводника структур с примесью Мо имеют несколько сложный характер.

В пятой главе «**Редкоземельные элементы в роли внутренних геттеров в кремнии и кремниевых структурах с примесями тугоплавких элементов**» приведены результаты исследования, где впервые установлено, что присутствие примесей редкоземельных элементов в решетке кремния существенно повышает растворимость примесей тугоплавких элементов (Hf, W или Mo) на один порядок и одновременно снижает эффективность образования термодфектов.

Показано, что примеси редкоземельных элементов в Si в присутствии примесей ТПЭ выступают в роли внутренних геттеров для различных неконтролируемых технологических примесей (железа и кислорода): концентрация оптически активного междуузельного кислорода уменьшается на 50-60%, а глубокие уровни, обусловленные атомами железа при дополнительном введении атомов РЗЭ в кремний с примесями тугоплавких элементов, не наблюдаются. Результаты структурного анализа показали, что

в таких образцах наблюдаются электронейтральные комплексы с участием атомов кислорода и железа;

В шестой главе «Приборы с зарядовой связью на основе структур металл-диэлектрик-полупроводник, легированных примесями тугоплавких элементов» приведены результаты исследования влияния примесей тугоплавких элементов на неэффективность переноса заряда в приборах с зарядовой связью и установлено, что присутствие примесей тугоплавких элементов (W, Mo, Zr и др.) в кремниевой подложке приборов с зарядовой связью приводит к уменьшению плотности поверхностных состояний на 1 порядок, а скорости поверхностной рекомбинации в 2 раза по сравнению с обычными ПЗС-структурами.

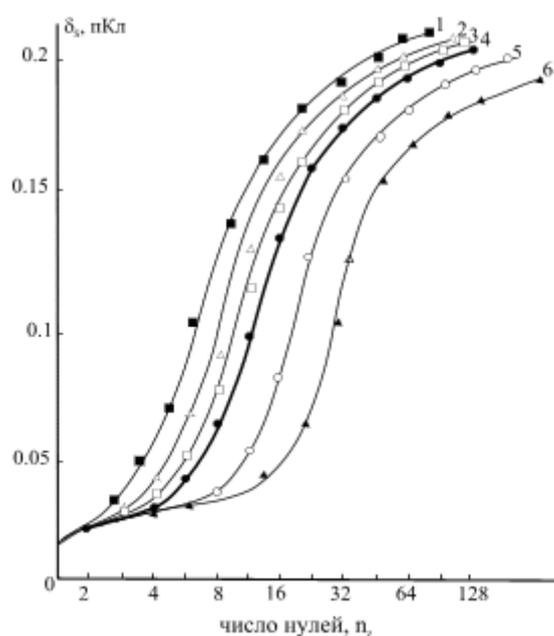


Рис.10. Зависимость потерь δ от числа нулей в легированных (Zr, Ti, Hf, Mo и W) и контрольных ПЗС регистрах

Результаты измерений ПЗС с различной неэффективностью переноса показали, что величина ε прямо пропорциональна плотности поверхностных состояний (ППС). При этом величина плотности поверхностных состояний в ПЗС регистрах при результирующих потерях $n\varepsilon \leq 0,1$ зависит от типа специально введенной примеси.

В образцах, легированных примесями Ti, Zr и Hf, относительно контрольных ПЗС структур потерь заряда больше, а легированных примесями W и Mo потерь заряда меньше. Эти данные свидетельствуют о том, что кремний, легированный примесями вольфрама и молибдена более пригоден для создания качественных ПЗС приборов. Расчеты показали, что в контрольных образцах величина ППС составляет $N_{ss} = 9,9 \cdot 10^{-9} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. Отсюда следует, что самые наилучшие выходные характеристики имеют ПЗС-приборы с подложкой, легированной примесью W при неэффек-

тивности переноса $n\epsilon \leq 0,1$ (рис. 10) по сравнению с контрольными структурами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты данной работы состоят в следующем:

1. Впервые проведена идентификация энергетического спектра глубоких уровней, создаваемых примесями тугоплавких элементов (Mo, W, Ti, Zr и Hf) в Si с помощью методов емкостной спектроскопии (DLTS и ФЕ);

2. Разработаны физико-химические аспекты и технология легирования кремния примесями тугоплавких элементов; установлено, что большинство примесей ТПЭ в кремнии, введенных при выращивании, не проявляют электрической активности и активировать их можно путем длительных высокотемпературных обработок;

3. Впервые установлено, что эффективность процессов дефектообразования в Si, легированном примесями ТПЭ зависит от следующих факторов: способа легирования кремния, совершенства дефектной структуры исходного кремния, предварительных термических обработок, температурных режимов диффузии и условий постдиффузионного охлаждения;

4. С помощью методов емкостной спектроскопии исследованы процессы радиационного дефектообразования в Si с примесью вольфрама, молибдена, циркония и других ТПЭ и установлено, что облучение γ -квантами ^{60}Co заметного влияния на параметры глубоких уровней (энергию ионизации E_t и сечение захвата электронов σ_n) не оказывает, но с ростом дозы облучения $\Phi > 1.10^{18}$ кв/см²·с происходит трансформация спектров DLTS.

5. Показано, что присутствие атомов ТПЭ в кремнии при облучении приводит к снижению скорости введения А-центра в 5÷6 раз по сравнению с контрольными образцами и препятствует образованию Е-центров.

Установлено, что эффективность образования РД в кремнии с ТПЭ зависит также от содержания неконтролируемых технологических примесей.

6. Установлена возможность создания фотопреобразователей, обладающих фоточувствительностью в области спектра 3-5 мкм с максимумом при $\lambda_{\text{Si}<\text{Zr}>} = 4.1$ мкм, с повышенной термостабильностью, равномерной фотогенерацией и воспроизводимостью фотоэлектрических параметров на основе кремния, легированного примесями тугоплавких элементов;

7. Впервые установлено, что присутствие примесей редкоземельных элементов в решетке кремния существенно повышает растворимость примесей тугоплавких элементов - Hf, W или Mo (на один порядок) и одновременно снижает эффективность образования термодфектов;

8. Показано, что примеси редкоземельных элементов в Si в присутствии примесями ТПЭ в объеме кремния выступают в роли внутренних геттеров для различных дефектов и неконтролируемых технологических примесей (железа и кислорода): концентрация оптически активного междоузельного

кислорода уменьшается на 50-60%, а глубокие уровни, обусловленные атомами железа при дополнительном введении атомов РЗЭ в кремний с примесями тугоплавких элементов, не наблюдаются. Результаты структурного анализа показали, что в таких образцах наблюдаются электронейтральные комплексы с участием атомов кислорода и железа.

9. Обнаружено, что наличие примесей ТПЭ в подложке кремниевых МДП-структур, приводит к увеличению плотности поверхностных состояний МДП-структур и образованию положительного заряда на границе раздела Si-SiO₂; установлено, что наличие примесей ТПЭ приводит к изменению распределения плотности поверхностных состояний N_{ss} по ширине запрещенной зоны E_g полупроводника кремниевых МДП-структур.

10. Установлено, что присутствие примесей тугоплавких элементов (W, Mo, Zr и др.) в кремниевой подложке приборов с зарядовой связью приводит к уменьшению плотности поверхностных состояний на 1 порядок, а скорости поверхностной рекомбинации в 2 раза по сравнению с обычными ПЗС-структурами.

**ONE-TIME SCIENTIFIC COUNCIL BASED ON THE SCIENTIFIC
COUNCIL DSc.30.12.2019.FM.65.01 FOR AWARDING SCIENTIFIC
DEGREES AT THE INSTITUTE
ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES**

**RESEARCH INSTITUTE OF SEMICONDUCTOR PHYSICS
AND MICROELECTRONICS
AT THE NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN**

DALIEV SHAKHRUKH KHOJAKBAROVICH

**PROCESSES OF DEFECT FORMATION IN SILICON AND SILICON
STRUCTURES DOPED WITH REFRACTORY ELEMENTS**

01.04.10 – Physics of semiconductors

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

TASHKENT – 2020

Theme of dissertation of doctor of science (DSc) on physics and mathematics Sciences registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2019.4.DSc/FM.147.

The dissertation has been prepared in Research institute of semiconductor physics and microelectronics at the National university of Uzbekistan

Abstract of the dissertation is posted in three (uzbek, russian, english (resume) languages on the website (iplt.uz) and on Information and educational portal «Ziyonet» (www.ziyonet.uz).

Scientific consultant: **Mamadlimov Abdugafur Tishabaevich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, academician

Official opponents: **Aripov Xayrulla Kabulovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Ismaylov Kanatbay Abdreymovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Onarkulov Karimberdi Egamberdievich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Leading organisation: **Namangan State University**

Thesis defense will take place "____" _____ 2020 in _ _ _ _ hours at the meeting of the one-time scientific Council based on the Scientific Council DSc. 30. 12. 2019. FM. 65. 01 for awarding scientific degrees at the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent city, 33, Durmon yuli str., Phone: (99871) 262-42-54, e-mail: info@iplt.uz.).

The doctoral dissertation is can be looked through in the Information-resource centre of the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (is registered №__) (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent city, 33, Durmon yuli str., Phone: (99871) 262-32-54.)

The abstract of dissertation is sent out on «__» _____ 2020.

(Mailing report № _____ on «__» _____ 2020).

X.B.Ashurov

Chairman of Scientific Council on award of scientific degrees, DSc in physics and mathematics, professor

I.D.Yadgarov

Scientific secretary of Scientific Council on award of scientific degrees, DSc in physics and mathematics, professor

M.Sh.Kurbanov

Chairman of Scientific Seminar under Scientific Council on award of scientific degrees, DSc in physics and mathematics, professor

INTRODUCTION (abstract of DSc thesis)

Topicality and necessity of the thesis. Currently, almost all areas of science and technology around the world use solid-state electronics devices. The field of application of solid-state devices is constantly expanding, creating fundamentally new devices that stimulate the development of industry in new directions, which requires a significant improvement in the structure of Si-the main material of modern solid-state semiconductor electronics.

In this regard, studies aimed at studying the processes of defect formation in Si doped with various impurities and the establishment of controlled methods for stabilizing the parameters of semiconductor devices are one of the important tasks.

Analysis of trends in the development of microelectronics around the world today shows that in the future, most of the produced chips will be digital logic integrated circuits, the basic element of which are metal-insulator-semiconductor structures (MIS structures). In devices for processing digital and analog signals, charge-coupled devices (CCD) are already widely used, and as solid - state photodetector devices, photosensitive CCD devices are also based on these structures.

However, with the increasing degree of integration of chips, when creating large and ultra-large integrated circuits, surface and volume defects in multi-layer silicon structures have an increasing influence on the operation of devices. This causes the need for a more in-depth study of defects near the semiconductor-dielectric boundary and in the volume of the semiconductor and find out their contribution to changing the parameters of manufactured devices. Studying the interaction between impurity particles and structural defects in the semiconductor, the influence of heterogeneity of structure of a MIS structures on the redistribution of impurities opens up the possibility of increasing the stability of the operating parameters of the chip on the basis of MIS structures.

In the world today, the study of the processes of defect formation in the monocrystalline silicon, in particular, the implementation of scientific research in the following areas is considered an important task: the study of the formation of defect centers in silicon, doped with impurities of refractory elements (RE) under the influence of various factors; the influence of technological impurities on the formation mechanisms of deep centers in silicon with impurities of refractory elements; - establishing regularities in the formation of the energy spectrum of deep levels created by impurities of refractory elements; their interaction with other impurities and structural defects of the lattice; the influence of thermal and radiation defects on the formation of the defective structure of silicon with impurities of refractory elements.

Research works carried out in these areas indicate the relevance of the topic of this dissertation.

Relevant research priority areas of science and developing technologies of the Republic. The research described in the dissertation was carried out in accordance with the Priority directions of development of science and technology of the Republic of Uzbekistan: F2 «Physics, astronomy, energy and engineering»

and PPI-3 «Energy, energy and resource conservation, transportation, engineering and development of modern electronics, microelectronics, Photonics and electronic instrumentation».

A review of international research on the topic of dissertation. Research in the field of semiconductor physics and semi-semiconductor materials science is conducted in research centers, institutes and universities in leading countries, including the universities of Cincinnati and California (USA), Philips Semiconductors, SGS-Thomson, and Intel and Yale University (USA), Tokyo (Japan) and Berlin technical University (Germany) are conducting research on the creation of optoelectronic devices based on silicon doped with various impurities. At the Zurich research center (Switzerland) and the University of applied Sciences of Fontys (Netherlands) conducted research to obtain new semiconductor materials, physics of nanostructures is investigated in the Physico-technical Institute Saint Petersburg (Russia), the technology for the production of structures for micro - and nanoelectronics are engaged in NPP «Polus» (Russia).

As a result of research conducted in the world to obtain materials doped with impurities of various elements and the study of structures based on them, a number of interesting scientific results have been obtained, in particular the following: Yale University (USA) obtained the first samples of light-emitting silicon structures containing ions of rare earth elements of erbium (Er); developed structures containing rare earth elements in the crystal lattice (Lund University (Sweden) and the University of Geneva (Switzerland)); studied the structure of erbium centers (Nation institute for materials science Yokohama); devices for environmental monitoring systems were created (Japan atomic energy research institute); the technology of thermal sensors with nanoclusions and nanostructures with high magnetoresistance was created (Tashkent state technical University); the theory of low-dimensional superconductors was developed (Institute of Nuclear physics (Uzbekistan)).

Currently, research is being conducted in the following promising areas, including: the development of sensors for diagnostics of temperature and other parameters with improved functional characteristics based on semiconductor materials with Ni and Mn nanoclusters; the development of humidity and temperature sensors based on doped Si; the production of photosensitive field-effect transistors with a negative gradient of impurities in the channel and other devices with improved functional characteristics based on semiconductor materials; to study the processes of thermal and radiation defect formation in silicon with admixtures of transition elements; to study nanoscale and quantum effects occurring in two-dimensional layers of interfacial boundaries.

Problem development status. To date, the attention of scientists and developers focused on the study of the physical processes in silicon and silicon structures, as well as the development of methods of increase of stability of their parameters, scientists from the US and Japan (Weber E.R., Graputa R., Feichtinger H., Tokumari Y.) to improve the photosensitivity is used, the processes of alloying frontier silicon layers with non-traditional impurities (Ti, Ni, Gd, Sm etc.) in low

concentrations, followed by thermal oxidation and the application of metal (Al,Cu,W) of the electrodes.

Russian scientists Lebedev A. A., Berman, L. S., V. I. Fistulas studied the behavior of various impurities with deep levels in silicon and determined the energy spectra of these levels.

Uzbek scientists, including academicians Saidov M. S., Muminov R. A., Mamadalimov A. T. and others, made a certain contribution to the development of physics of local centers in semiconductors and semiconductor structures. The properties of the compensating impurity doped semiconductors have been studied by academics of Badirkhanov M. K., S. Z. Zainobidinov, they discovered the effects of temperature and IR quenching in compensated silicon doped with deep impurities. K. p. Abdurakhmanov and others studied the processes of defect formation in silicon doped with various impurities and determined the energy spectrum of a number of impurities. Professors Vlasov S. I., Aripov H. K., and Ismayilov K. A. studied the physical processes occurring at the interfacial boundaries of silicon diode and transistor structures and found that the main factor determining the difference between the properties of the hidden interface and the properties of the volume of the semiconductor and the dielectric is the presence of surface electronic States that create energy levels in the forbidden zone of the semiconductor.

Relevance of the dissertation research to the plans of scientific-research works. The dissertation work performed at the National University of Uzbekistan in accordance with thematic plans grants of agency of science and technology of RUz FM-2-038 «Study of physical processes in the bulk and at the interface of multilayer structures of the type metal-insulator-semiconductor based on silicon, alloyed with refractory elements» (01.01.07 - 31.12.08.),–F2-081 «the Study of patterns of defect formation in the monocrystalline silicon of the impurity-defect associates and the dynamic processes of the formation of the hidden interface semiconductor - dielectric» (01.07.07–31.12.11.); EF-2-08 «Study of influence of radiation on the formation and annealing of defects in silicon and silicon multilayer structures with impurities of rare earth elements» (01.07.10-.31.12.11 gg.) and EF-2-13 «the Influence of impurities of the titanium subgroup on electrophysical properties of silicon structures» (01.01.16-31.12.17.).

The aim of research work is to comprehensive study with the help of capacitance spectroscopy electrophysical properties of Si doped with impurities in some refractory elements, in particular, atoms Zr, Ti and Hf, their interactions with other electrically active and neutral impurities in silicon, influence of impurities on properties of silicon structures.

The object of research is single-crystal silicon grown by the method of Chokhralsky method and floating zone melting, doped with impurities of refractory and rare-earth elements and a MIS structure based on them.

The subject of research – are the processes of defect formation in silicon and silicon structures with impurities of refractory and rare-earth elements.

Research methods. Methods of non-stationary capacitive spectroscopy of deep levels, photo capacity, photoconductivity, and infrared spectroscopy were used to solve the set tasks.

Scientific novelty of research consist in the following:

for the first time, the energy spectrum of deep levels created by impurities of refractory elements (Mo, W, Ti, Zr, and Hf) in Si was identified using capacitive spectroscopy (DLTS and FE);

physical and chemical aspects and technology for alloying Si with impurities of refractory elements have been developed;

it was found that most of these impurities introduced into Si during growth do not exhibit electrical activity and can be activated by long-term high-temperature treatments;

for the first time, it was established that the efficiency of defect formation processes in Si by refractory elements (RE) impurities depends on the doping method, the perfection of the defect structure, the thermal background, and the technological modes of doping the original silicon with RE impurities;

found that the presence of impurities RE in silicon leads to a decrease in the efficiency of formation of radiation defects (RD): reduces the infusion rate of A-centers in 5÷6 times in comparison with control samples and prevents the formation of E-centres; it was found that the formation efficiency in the RD silicon RE depends also on the technological content of uncontrolled impurities;

the possibility of creating photovoltaic converters with photosensitivity in the range of 3-5 microns and uniform photogeneration with increased thermal stability and reproducibility of photovoltaic parameters based on silicon doped with impurities of refractory elements has been established;

for the first time, it was found that the presence of rare-earth element (REE) impurities in the silicon lattice significantly increases the solubility of RE impurities (Hf, W, or Mo) and simultaneously reduces the efficiency of thermodeflect formation;

it is shown that the impurities of REE in Si in the presence of RE impurities act as internal getters for various uncontrolled technological impurities (iron and oxygen);

discovered that the presence of RE impurities in the substrate silicon MIS structures, leads to an increase in the density of surface States and the formation of positive charge at the interface Si-SiO₂, as well as changing the distribution density of surface States N_{ss} on width of forbidden zone E_g semiconductor silicon MIS structures;

it was found that the presence of impurities of refractory elements (W, Mo, Zr, etc.) in the silicon substrate of devices with a charge bond leads to a decrease in the density of surface States by 1 order, and the speed of surface recombination by 2 times compared to conventional CCD structures.

On the basis of the developed and justified scientific positions in the dissertation, a set of new experimental results is obtained that allows creating a new scientific direction: «Physical bases of defect formation processes in silicon and silicon multilayer structures doped with refractory elements».

Practical results of research work are as follows:

recommendations have been developed for the creation of photo converters with photosensitivity in the range of 3-5 microns, with increased thermal stability, uniform photogeneration and reproducibility of photovoltaic parameters based on silicon doped with impurities of refractory elements;

the process of pre-introduction of rare earth elements before diffusion of refractory element impurities into silicon is proposed, and the properties of getters for uncontrolled impurities in silicon shown by rare earth elements can be used in the production of semiconductor diodes with a p+ - n-n+ -structure;

methods for increasing the thermal stability and radiation resistance of silicon structure parameters by introducing RE impurities have been developed.

Authenticity of the obtained results is supported by use methods of photoconductivity, infrared spectroscopy and transient capacitance spectroscopy with high sensitivity by concentration and high resolution in energy, the possibility of the separate determination of the parameters for each of the levels.

Scientific and practical value of the research results. The scientific significance of the research results lies in expanding the understanding of physical processes occurring in single-crystal silicon and silicon structures doped with impurities of refractory elements.

Practical value of research results is the development of a physic-chemical aspects and technology of doping the silicon with impurities of refractory elements and design ways of creating the internal getters, formed by the impurities of REE in the presence of impurities RE in silicon for various technological uncontrolled impurities (iron and oxygen), and also that the results obtained to improve the thermal stability and radiation resistance parameters of silicon by introduction of RE can be used in the manufacture of various semiconductor devices.

Implementation of the research results. Based on the results of studying the processes of defect formation in single-crystal silicon and silicon structures doped with refractory and rare-earth elements:

In the developed optimal technological modes for doping silicon with impurities of refractory elements, a new method for gettering uncontrolled technological impurities (iron, oxygen, etc.), by introducing refractory and rare earth elements, were used in JSC «FOTON» of the Joint-Stock company «Uzeltchanoat» (reference of AK «Uzeltchanoat» dated November 25, 2019, No. 02-1953). The use of scientific results made it possible to reduce the defects of semiconductor wafers and obtain contact areas with low serial resistance to silicon-based diode structures at JSC «FOTON»;

the proposed process of introducing rare-earth elements in the process of diffusion of traditional boron and phosphorus impurities and the properties of getters for uncontrolled impurities in silicon shown by rare-earth elements are used in JSC «Novosibirsk plant of semiconductor devices with Experimental design Bureau» in the production of semiconductor diodes with a p+ - n - n+ structure (breakdown voltage of 250-300 V at a power of up to 5 kW). The use of scientific results of the dissertation made it possible to preserve the sustained power during cyclic tests and reduce the leakage currents of the produced diodes to one order

(Reference of JSC "Novosibirsk plant of semiconductor devices with OKB" dated December 6, 2019 No. 04/401-543);

the observed phenomenon of a significant increase in the solubility of impurities of refractory elements (Hf, W, or Mo) in silicon and a simultaneous decrease in the efficiency of formation of thermodeflects in the presence of impurities of rare earth elements in the silicon lattice was used in the analysis of the results of the influence of W impurities on radiation defect formation in BaFI crystals. The application of these results has led to the establishment of the fact of obstacles of the impurity W the creation of radiation defects was used to perform the research project F2-FA-Φ118 «Regularities of radiation-stimulated phenomena in oxide and fluoride solid-state materials used as detectors of ionizing radiation», Institute of nuclear physics, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan (certificate of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan from 05 Dec 2019 n 2/1255-3184);

physical and chemical aspects and technology for alloying silicon with impurities of refractory elements have been developed. it has also been established that most of the TPE impurities in silicon introduced during cultivation do not exhibit electrical activity and can be activated by long-term high-temperature treatments;

it is possible to create photo-converters with photosensitivity in the range of 3-5 microns, with increased thermal stability, uniform photogeneration and reproducibility of photoelectric parameters based on silicon doped with impurities of refractory elements;

The above results were used to create photoelecelectric Modul and triggers a silicon p-n-structures, the use of scientific results helped to improve the efficiency of photovoltaic power silicon p-n-structures at run-research project A-4-12 «Effects of nanoplasmonics and with their help increase efficiency for photovoltaic energy silicon p-n-structures» at the Andijan state University. (Reference No. 87-03-4624 of the Ministry of higher and secondary special education of the Republic of Uzbekistan dated November 30, 2019).

Approbation of the research results. Results of the research work have been discussed at 18 international and republican scientific and practical conferences.

Publication of research results. 44 scientific works have been published on the topic of the dissertation, including 2 monographs, 22 articles in journals recommended by the Higher attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan for publishing the main scientific results of dissertation works.

Structure and volume of dissertation. The dissertation work consists of an introduction, six chapters, a conclusion, a list of published works, contains 64 figures, 3 tables, a list of references from 155 titles and is presented on 208 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть, part I)

1. Далиев Ш.Х. Эффекты влияния примесей тугоплавких элементов на электрофизические свойства МДП-структур. Ташкент: НУУз, 2018, 126 С. (01.00.00; №8).

2. Далиев Х.С., Утамурадова Ш.Б., Далиев Ш.Х. Неравновесные процессы в кремнии и кремниевых многослойных структурах. Ташкент: НУУз, 147 С. (01.00.00; №8).

3. Daliev Sh.Kh. The formation of defects in MIS structures based on silicon with molybdenum impurity. European science review, № 7-8, 2019, P.74-77. (GIF: 1.36).

4. Далиев Ш.Х. Редкоземельные элементы в роли внутренних геттеров в кремнии и кремниевых структурах с примесями тугоплавких элементов. Eurasian science journal (Евразийский научный журнал), №9, P.22-26, 2019. (GIF: 0.388).

5. Далиев Ш.Х., Палуанова А.Д. Влияние вольфрама на характеристики кремниевых МДП-структур. Science and world, International scientific journal, (№ 3(67), 2019, Vol. I, p. 11-14. (GIF: 0.325).

6. Далиев Ш.Х., Мамадалимов А.Т., Насриддинов С.С., Палуанова А.Д., Бекмуратов М.Б. Влияние термообработки на поведение глубоких уровней в кремнии, легированном вольфрамом. Физика полупроводников и микроэлектроника. 1 (01) 2019, с.23-26. (01.00.00; №16).

7. Мамадалимов А.Т., Далиев Ш.Х. Влияние примесей тугоплавких элементов на неэффективность переноса заряда в приборах с зарядовой связью Физика полупроводников и микроэлектроника. 2 (т.1) 2019, с.16-21. (01.00.00; №16).

8. Далиев Ш.Х., Мамадалимов А.Т., Бекмуратов М.Б. Влияние атомов эрбия, лантана и ростовых примесей на эффективность образования радиационных дефектов в кремнии. Узб.физ.журн., Vol. 21 (№ 4), 2019, с.214-217. (01.00.00; №5).

9. Daliev Sh.Kh. Effect of impurities of difficult melt elements on the photosensitivity of doped silicon. World Journal of Engineering Research and Technology (WJERT), 2018, Vol. 4, Issue 1, 467-472. (№ 23 GIF: 0.342, IF: 4.326).

10. Daliev Sh.Kh. Deep Level Transient Spectroscopy of Silicon, Doped by Zirconium. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET), 2018, Vol. 6, Iss. III, pp 3547-3549. (GIF: 0.435).

11. Daliev Sh.Kh. Study of the interaction of europium with oxygen in silicon. World Journal of Engineering Research and Technology (WJERT), 2018, Vol. 4, Issue 3, 149-154. (GIF: 0.342).

12. Utamuradova Sh.B., Daliev Kh.S., Daliev Sh. Kh. and Bekmuratov M.B. On the role of oxygen and ytterbium in the formation of radiation defects in silicon after gamma-irradiation. World Journal of Engineering Research and Technology (WJERT), 2018, Vol. 4, Issue 3, p. 330-334. (GIF: 0.342).

13. Далиев Ш.Х., Палуанова А.Д. Влияние γ -облучения на свойства уровней вольфрама в кремнии. Science and world, International scientific journal, (№ 10 (62), 2018, Vol. I, p. 28-31. (GIF: 0.325).

14. Далиев Ш.Х. Инфракрасная спектроскопия кремния, легированного молибденом. Science and world, International scientific journal, (№ 6 (58), 2018, Vol. I, p. 11-13. (GIF: 0.325).

15. Далиев Х.С., Утамурадова Ш.Б., Далиев Ш.Х., Норкулов Ш.Б. Образование радиационных дефектов в кремнии, легированном ванадием. Science and world, International scientific journal, (№ 5 (57), 2018, Vol. I, p. 8-10. (GIF: 0.325).

16. Далиев Ш.Х. Образование дефектных центров в кремнии, легированном титаном. Science and world, International scientific journal, (№ 1 (53), 2018, Vol. I, p. 15-18 (№ 5 GIF, IF: 0.325).

17. Далиев Ш.Х. Влияние примесей тугоплавких элементов на фоточувствительность кремниевых фотопреобразователей. Узб.физ.журн., Vol. 20 (№6), 2018, с. 355-358. (01.00.00; №5).

18. Далиев Х.С., Утамурадова Ш.Б., Далиев Ш.Х., Дехканов М.Ш., Норкулов Ш.Б. О влиянии диспрозия на процессы радиационного дефектообразования в кремнии. Узб.физ.журн., Vol. 20 (№2), 2018, с. 131-133. (01.00.00; №5).

19. Далиев Ш.Х., Бекмуратов М.Б. Влияние примеси иттербия на генерационные характеристики МДП-структур. Узб.физ.журн., Vol. 20 (№1), 2018, с. 46-48. (01.00.00; №5).

20. Далиев Ш.Х., Эруглиев У.К. Влияние примесей редкоземельных элементов на параметры МДП-структур. Узб.физ.журн., (Uzbek Journal of Physics), Vol. 19 (№ 6), 2017, с. 355-357. (01.00.00.№5).

21. Утамурадова Ш.Б., Каландаров Э.К., Далиев Ш.Х., Акимова Ж.О. Исследование взаимодействия лантана с кислородом в кремнии. – ДАН РУз, 2009, №1, с.21-23.(01.00.00, №7)

22. Утамурадова Ш.Б., Далиев Х.С., Акимова Ж.О. Далиев Ш.Х. Исследование влияния атомов гафния на свойства границы раздела Si-SiO₂. – Вестник Каракалпакского госуниверситета, 2009, № 1, с.16-17 (01.00.00, №11)

23. Утамурадова Ш.Б., Далиев Х.С., Каландаров Э.К., Далиев Ш.Х. Влияние термических обработок на свойства кремния, легированного лантаном. Узбекский физический журнал, 2006, т.8, № 6, с.365-367.(01.00.00; №5).

24. Далиев Х.С., Утамурадова Ш.Б., Дехканов М.Ш., Каландаров Э.К., Далиев Ш.Х. О роли лантана в образовании радиационных дефектов в кремнии. «Доклады АН РУз», 2005, № 4, стр. 38-41. (01.00.00, №7)

II бўлим (II часть, part II)

25. Далиев Ш.Х. Взаимодействие атомов вольфрама со связанными состояниями кислорода в кремнии. Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2018, Т. 18, № 2, с.346-348. (№ 5 GIF, IF: 0.209).

26. Утамурадова Ш.Б., Далиев Х.С., Далиев Ш.Х. Шаронов И.А., Худайбердиев А.Т., Пардаев У.Я., «Изучение влияния радиации на параметры МДП-структур с примесями иттербия и эрбия». Естественные и технические науки, РАН, 2012, № 1(57), С.57-61.

27. Далиев Ш.Х. Влияние примесей редкоземельных элементов на свойства системы Si-SiO₂ с термическим окислом, облученной гамма-квантами. Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2009, Т. 9, № 2, с.177-179. (№ 5GIF, IF: 0.209).

28. Nasriddinov S.S., Daliev Sh.Kh., Ismoilov Sh.A., Esbergenov D.M. Study of the Influence of γ -Irradiation on the Performance Characteristics of Temperature Sensors Based on Silicon Alloyed with Nickel and Titanium. The Ninth International Conference «Modern Problems of Nuclear Physics and Nuclear Technologies», September 24-27, 2019, Tashkent, Uzbekistan, pp. 216-217.

29. Daliev Kh.S., Daliev Sh.Kh., Erugliev U.K. Influence of Thermal Treatment on the Properties of Irradiated Silicon Mosfet Structures with Impurities of Refractory Elements. The Ninth International Conference «Modern Problems of Nuclear Physics and Nuclear Technologies», September 24-27, 2019, Tashkent, Uzbekistan, pp.217-219.

30. Daliev Sh.Kh., Mamadalimov A.T., Paluanova A.D. Radiation Defect Formation in Silicon With Molybdenum Impurity. The Ninth International Conference «Modern Problems of Nuclear Physics and Nuclear Technologies», September 24-27, 2019, Tashkent, Uzbekistan, pp. 257-258.

31. Далиев Ш.Х., Мамадалимов А.Т., Бекмуратов М.Б., Матчанов Ҳ.Ж. О роли атомов эрбия и технологических примесей в образовании радиационных дефектов в кремнии. Материалы Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы внедрения инновационной техники и технологий на предприятиях по производству строительных материалов, химической промышленности и в смежных отраслях», Фергана, 24-25 мая 2019 года, 1 том, стр.510-511.

32. Далиев Ш.Х., Утемуратова Х.Ю., Палуанова А.Д., Норкулов Ш.Б. Генерационные характеристики МДП-структур с диэлектрическими пленками из оксидов редкоземельных элементов. Материалы Республиканской конференции «Современные проблемы физики полупроводников» СПФП-2019, г.Нукус, 20 ноября 2019 г., стр.188-189.

33. Далиев Ш. Х., Палуанова А.Д. Кинетика низкотемпературного отжига уровней вольфрама в кремнии. Материалы республиканской научно-теоретической и практической конференции «Физика и экология», г.Нукус, 17-18 октября 2019 года, стр. 19-21.

34. Далиев Ш.Х. Взаимодействие атомов вольфрама со связанными состояниями кислорода в кремнии. Материалы Международной научно-технической конференции, 19-23 ноября 2018 г., Москва, INTERMATIC – 2018, часть 2, РТУ МИРЭА, стр. 346-348.

35. Далиев Ш.Х., Бекмуратов М.Б. Влияние примесей редкоземельных элементов на генерационные характеристики МДП-структур. Материалы республиканской научно-практической конференции «Современные проблемы физики полупроводников и развития возобновляемых источников энергии». г.Андижан, 20-21 апреля, 2018 г., стр.30.

36. Далиев Ш.Х., Эруглиев У.К. Влияние термообработок на свойства n-Si<Eu>. Материалы республиканской научно-практической конференции «Современные проблемы физики полупроводников и развития возобновляемых источников энергии». г.Андижан, 20-21 апреля, 2018 г., стр.31-32.

37. Далиев Ш.Х., Палуанова А.Д. Взаимодействие тугоплавких элементов с кислородом в кремнии. Материалы Республиканской научной конференции «Современные проблемы физики полупроводников», 96-98 стр. 26-27 октябрь 2018 год. г.Ташкент, стр. 96-98.

38. Далиев Ш.Х., Палуанова А.Д. Радиационное дефектообразование в кремнии, легированном тугоплавкими элементами. Материалы Республиканской научной конференции «Современные проблемы физики полупроводников», 26-27 октябрь 2018 г., Ташкент, стр. 208-210.

39. Далиев Ш.Х. Фоточувствительность кремния, легированного гафнием. Материалы IV Международной конференции по оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах. 25-26 мая 2018 г., Фергана, стр. 334-335.

40. Далиев Х.С., Утамурадова Ш.Б., Далиев Ш.Х., Арипджанова Х.А. О роли атомов титана в повышении фоточувствительности кремниевых фотопреобразователей. Матер. Респ.научн.конф. «Неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах», Ташкент, 1-2 февр, 2017 г., с.192.

41. Далиев Х.С., Далиев Ш.Х., Сатимов Д.Ш. Влияние атомов гафния на образование радиационных дефектов в кремнии. Матер. Респ. научн. конф. «Неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах», Ташкент, 1-2 февр, 2017 г., с.16-17.

42. Daliev Sh.Kh., Bekmuratov M.B., Rasulova D.M. The study of the role of atoms of zirconium in enhancing the photosensitivity of silicon solar cells. Symposium proceedings IPS-2016 «New Trends of Development Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements and Prospects», 10-11 November 2016, Tashkent, Uzbekistan, p.251.

43. Далиев Х.С., Далиев Ш.Х., Бекмуратов М.Б. Исследование взаимодействия иттербия с технологическими примесями в кремнии с помощью ИК-спектроскопии. Матер. конф. «Актуальные проблемы молекулярной спектроскопии в конденсированных средах» Самарканд, сентябрь, 2016 г., с.97-98.

44. Далиев Ш.Х. Инфракрасная спектроскопия кремния, легированного нетрадиционными примесями. Матер.респ.конф. «Оптические методы в современной физике», Ташкент, май, 2016 г., с. 173-175.

Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали таҳририятида
таҳрирдан ўтказилди
(06.02.2020 йил).

Босишга рухсат этилди: 07.02.2020 йил
Бичими 60x45 ¹/₈, «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табағи 3,5. Адади: 100. Буюртма: № _____.

Ўзбекистон Республикаси ИИВ Академияси,
100197, Тошкент, Интизор кўчаси, 68.

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.