

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ, САМАРҚАНД ДАВЛАТ
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.27.06.2017. FM./T.34.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ

УТАМУРАДОВА ШАРИФА БЕКМУРАДОВНА

**T-ИОНЛИ КИРИШМАЛАР БИЛАН ЛЕГИРЛАНГАН КРЕМНИЙДА
НУҚСОНЛИ МАРКАЗЛАРНИНГ ҲОСИЛ БЎЛИШ ВА
РИВОЖЛАНИШ ЖАРАЁНЛАРИ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2017

Докторлик (DSc) диссертацияси автореферати мундарижаси

Оглавление автореферата докторской (DSc) диссертации

Contents of the of Doctoral (DSc) Dissertation Abstract

Утамурадова Шарифа Бекмурадовна

Т-ионли киришмалар билан легирланган кремнийда нуқсонли
марказларнинг ҳосил бўлиш ва ривожланиш жараёнлари..... 3

Утамурадова Шарифа Бекмурадовна

Процессы формирования и развития дефектных центров в кремнии,
легированном примесями Т-ионов..... 23

Utamuradova Sharifa Bekmuradovna

The process of formation and development of defect centers in silicon,
doped with impurities of T-ions..... 43

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 49

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ, САМАРҚАНД ДАВЛАТ
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.27.06.2017. FM./T.34.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ

УТАМУРАДОВА ШАРИФА БЕКМУРАДОВНА

**T-ИОНЛИ КИРИШМАЛАР БИЛАН ЛЕГИРЛАНГАН КРЕМНИЙДА
НУҚСОНЛИ МАРКАЗЛАРНИНГ ҲОСИЛ БЎЛИШ ВА
РИВОЖЛАНИШ ЖАРАЁНЛАРИ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2017

Докторлик диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси хузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2017.1.DSc/FM45 рақам билан рўйхатга олинган

Диссертация Мирзо Улуғбек номли Ўзбекистон Миллий университетида бажарилган.

Диссертация автореферати учта тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий Кенгашнинг веб-саҳифасида (fti-kengash.uz) ҳамда “ZiyoNet” ахборот-таълим портали www.ziyounet.uz манзилларида жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи:	Абдурахманов Кахар Паттахович физика-математика фанлари доктори, профессор
Расмий оппонентлар:	Зайнабидинов Сирожиддин физика-математика фанлари доктори, профессор Баграев Николай Таймуразович физика-математика фанлари доктори, профессор Камалов Амангелди Базарбаевич физика-математика фанлари доктори
Етакчи ташкилот:	Қорақалпоқ давлат университети

Диссертация ҳимояси Физика-техника институти, Ион-плазма ва лазер технологиялари институти, Самарқанд давлат университети хузуридаги DSc.27.06.2017. FM./T.34.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2017 йил «___» _____ соат ___ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Бодомзор йўли кўчаси, 2б-уй. Физика-техника институти мажлислар зали. Тел./факс: (+99871) 235-30-41; e-mail: lutp@uzsci.net)

Диссертация билан Физика-техника институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (___ рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Бодомзор йўли кўчаси, 2б-уй. Физика-техника институтининг маъмурий биноси, мажлислар зали. Тел./факс: (+99871) 235-30-41.

Диссертация автореферати 2017 йил «___» _____ да тарқатилди.
(2017 йил «___» _____ даги ___ рақамли реестр баённомаси.)

С.Л. Лутпуллаев
Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., профессор

А.В. Каримов
Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф.д., профессор

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

КИРИШ (фан доктори (DSc) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг зарурати ва долзарблиги. Жаҳонда бугунги кунда материалнинг бир бирлик юзасига кўп сонли элементлар тўғри келадиган яримўтказгичли асбоблар ва интеграл схемаларни яратиш ва уларни ишлаб чиқариш микро- ва наноэлектроника ҳамда фотониканинг асосий ашёси ҳисобланган кремний структурасини такомиллаштиришга қаратилган тадқиқотлар олиб борилмоқда. Бу йўналишда Т-ионли киришмалар билан легирланган кремнийда нуқсон марказларини шакллантириш ва ривожлантириш жараёнларини тадқиқ этиш орқали яримўтказгичли қурилмалар параметрларини барқарорлаштиришнинг бошқариладиган усулларини яратиш муҳим вазифалардан бири бўлиб қолмоқда.

Бугунги кунда микро- ва оптоэлектроникани жадал ривожлантириш, маълум концентрациялардаги киришмаларни киритиш билан эришилган хилма-хил хусусиятли янгидан-янги материалларни ишлаб чиқиш ва тайёрлашга катта аҳамият берилмоқда. Жумладан, ўтувчи элементлар (Т-ионлар) киришмалари билан легирланган кремнийда нуқсон марказларининг турли факторлар таъсирида ҳосил бўлиш ва ривожланиш жараёнларини тадқиқ этиш, технологик киришмаларнинг ўтувчи элементлар киришмалари бор кремнийдаги чуқур марказлар ҳосил бўлиши механизмига таъсирини аниқлаш, Т-ионлар киришмалари ҳосил қиладиган чуқур сатҳларнинг электрон таркиби ва энергетик спектри ҳосил бўлишидаги қонуниятларни аниқлаш ҳамда термик, радиация ва босим таъсирида ҳосил бўладиган нуқсонларнинг ўтувчи элементлар киришмалари бор кремнийда структуравий нуқсонлар ҳосил бўлишига таъсирини ўрганиш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади.

Мустақиллик йилларида фундаментал ва амалий тадқиқотларнинг долзарб илмий йўналишларига эътибор сезиларли даражада кучайтирилди, хусусан, яримўтказгичли материалшунослик соҳасига алоҳида эътибор қаратилди. Кремнийни баъзи чуқур сатҳли киришмалар билан легирлашнинг инфрақизил нурланишга сезгир, тензосезгирлигининг ортиши ва бошқа муҳим хоссаларини келтириб чиқарувчи оптимал режимлари аниқланди. Турли киришмалар билан легирланган кремнийнинг сирти яқини соҳасидаги фазавий ўзгаришлар ва силицидлар ҳосил бўлиши ўрганилди ҳамда технологик режимларга боғлиқ ҳолда у ёки бу турдаги қатор силицидларнинг ҳосил бўлиши кузатилди, тайёр асбобларнинг тескари (қайтиш) характеристикаларининг тикланиш вақтини камайтириш мақсадида, кремнийли диффузион диодларда радиацион нуқсонлар спектрлари билан бошқариш усули ишлаб чиқилди. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантиришнинг Ҳаракатлар стратегиясига кўра, илмий ва инновация ютуқларини амалиётга жорий этишнинг самарали механизмларини яратиш масалаларига алоҳида эътибор қаратиш, шу жиҳатдан яримўтказгичли микро- ва оптоэлектроника соҳаларида яримўтказгичли материалларнинг барча параметрларини назоратли бошқариш усулларини яратиш ва

монокристаллик кремнийда нуқсон ҳосил бўлиш жараёнларини аниқлашни чуқурлаштириш жуда муҳим ҳисобланади.

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

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланиши устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг III. «Энергетика, энергоресурс тежамкорлиги, транспорт, машина ва асбобсозлик, замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника ва электрон асбобсозлиги ривожланиши» устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи¹. Яримўтказгичлар физикаси ва яримўтказгичли материалшунослик соҳаларидаги жаҳоннинг етакчи илмий марказлари ва олий таълим муассасаларида, жумладан: Мичиган университети (АҚШ), Токио университети ва Цукуба долзарб технологиялар маркази (Япония), Берлин техника университети (Германия), Цюрих тадқиқот маркази (Швейцария), Фонтис амалий фанлар университетида (Нидерландия), Физика-техника институти (Санкт-Петербург, Россия), Тошкент давлат техника университети (Ўзбекистон)да олиб борилмоқда.

Ўтувчи элементлар киришмалари билан легирланган материаллар ва уларнинг асосидаги структураларини ўрганиш бўйича бир қатор илмий натижалар олинган, жумладан, таркибида Т-ионли (Со, Ni ва бошқ.) киришмалар қатнашган кремний структуралари олинган (Токио университети, Япония); кремнийда ўтувчи элементларнинг ҳосил қиладиган парамагнит марказлари ва чуқур энергетик сатҳлари аниқланган (Берлин техника университети, Германия); яримўтказгичли кремнийнинг кристалл панжарасида марганец, германий ва никель атомлари нанокластерларини шакллантириш технологияси ишлаб чиқилган (Тошкент давлат техника университети, Ўзбекистон); арсенид-галлий асосидаги кўп қатламли фотосезгир структуралар тайёрлаш технологияси яратилган (Физика-техника институти, Ўзбекистон).

¹ Диссертация мавзуси бўйича халқаро илмий изланишлар тавсифи A study of grown-in impurities in silicon by deep-level transient spectroscopy // Solid-State Electronics, V. 46, B.11, p.1039-1051, (2003)га асосан амалга оширилди.

Дунёда легирланган кремнийда нуқсонли марказларнинг ҳосил бўлиш ва ривожланиш жараёнларини тадқиқ бўйича қуйидаги қатор устивор йўналишларда тадқиқотлар олиб борилмоқда, жумладан никель ва марганец билан легирланган кремний асосида фото- ва тензосезгир структуралар яратиш; легирланган кремний асосида намлик ва ҳарорат датчикларини ишлаб чиқиш; яримўтказгичли материаллар асосида каналда киришмаларнинг манфий градиентли фотосезгир майдон транзисторларини ва функционал характеристикалари такомиллаштирилган асбобларни яратиш; ўтувчи элементлар киришмалари мавжуд кремнийда термик ва радиацион нуқсонлар ҳосил бўлишини аниқлаш.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Дунё амалиёти кўрсатадики, турли структуралар ва асбобларни ишлаб чиқариш давомида, яримўтказгичли пластиналарга ишлов бериш жараёнларида нуқсонларнинг, энг аввало, панжарадаги максимал ҳаракатланувчанлик билан аниқланадиган нуқтавий нуқсонларнинг ўзаро таъсирлашуви бўлади. Яримўтказгичлар физикаси ва яримўтказгичли нано- ва микроэлектроника соҳаларининг чет эллардаги таниқли мутахассислар (Lemke H., Grimmeiss H.G., Graff K., Pieper H., Омельяновский Э.М., Фистуль В.И., Weber E.R.) томонидан ўтказилаётган тадқиқотлардан олинган натижалар таҳлили шуни кўрсатадики, турли чуқур сатҳли яримўтказгилар, айниқса, улар орасида муҳим ўринда турувчи ўтиш элементларининг киришмалари мавжуд кремнийли яримўтказгичларнинг оптик, люминесцент, резонанс ва бошқа хоссаларини тажрибавий (амалий) ўрганиш, ҳозирда такомиллашган бўлмасада, чуқур марказларнинг умумий моделини тузишга имкон беради.

Чуқур сатҳли киришмали атомнинг электрон структурасини моделлаштириш вазифаси бунданда умумийроқ масала – чуқур киришмали сатҳлар назариясини тузиш билан чамбарчас боғлиқдир. Ҳозирга келиб, назария яримўтказгичлардаги нуқсонларнинг одатий ярим эмпирик тавсифланишидан юқори даражада деталлаштирилган аниқ тизимларнинг миқдорий таърифига ўтиб кетган. Мазкур босқичда киришмаларнинг ҳулқ-атворидаги фарқлар ва ўзига хос хусусиятлари энди аниқ ва равшан очиб берилган. Ўрганиб бориш давомида янги эффектлар кузатилган киришма-вакансия, киришма-киришма ва бошқа комплексларнинг ҳолатлари ва ҳулқ-атворларини тавсифлашдаги аҳамиятли силжишлар ҳам алоҳида таъкидлаб ўтилган.

А.А.Лебедев, В.И.Фистуль, Л.С.Берман, Баграев Н.Т., А.Т.Мамадалимов, Ш.Махкамовларнинг ишларида кремнийдаги бир қатор чуқур сатҳларнинг қайд этилиши ўрганилган ва уларнинг энергетик параметрлари аниқланган.

К.П.Абдурахмановнинг ишларида, олинган натижалар асосида, тайёр асбобларнинг тесқари характеристикаларини тиклаш вақтини камайтириш мақсадида, кремнийли диффузион диодлардаги радиацион нуқсонлар спектрини бошқариш усули ишлаб чиқилган. М.К.Бахадирханов, С.З.Зайнабидиновлар томонидан турли чуқур сатҳли киришмаларни

киритиш йўли билан олинган компенсирланган кремний асосидаги яримўтказгичлар параметрларини яхшилаш имконияти кўрсатиб берилган.

Назарий ва амалий (тажрибавий) маълумотларнинг жуда кўплигига қарамай, то шу пайтга қадар, атайлаб ўтувчи элементлар киришмалари билан легирланган кремнийда юз берадиган физик ҳодисаларнинг табиати ва бу жараёнлардаги бошқарилмайдиган технологик киришмалар ҳолатларининг роли тушунтириб берилмаган, Т-ионлар киришмалари билан легирланган монокристалл кремний структуравий нуқсонларининг ҳосил бўлиш ва ривожланиш жараёнлари ўрганилмай қолапти.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган Олий таълим муассасасидаги илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация иши Ўзбекистон Миллий университети илмий-тадқиқотлар режасининг ОТ-Ф2-081-рақамли «Кремнийнинг киришма-нуқсонли ассоциат (бирикмали) монокристалларида дефект ҳосил бўлиши қонуниятларини ва яримўтказгич-диэлектрик бўлиниш жойларида яширин чегаралар пайдо бўлишининг динамик жараёнларини ўрганиш» (2007–2011 йй.); ИТД-14-035-рақамли «Кремнийли МДП-структуралари параметрларининг барқарорлигини ошириш усулларини ишлаб чиқиш» (2009-2011 йй.), ИТД-4-43-рақамли «Кремнийли МДП-структуралари компонентлари–кийин эрувчи элементларнинг наноструктураланган силицидларини олиш технологиясини ишлаб чиқиш» (2012-2014 йй.), А-3-116+А-4-30-рақамли «Радиацияга юқори барқарор легирланган кремний ва кремнийли диод структураларни олиш технологиясини ва кремнийли қуёш элементларининг фотосезгирлигини ошириш усулларини ишлаб чиқиш» (2015-2017 йй.), ОТ-Ф2-11-рақамли «d-элементлар киришмалари билан легирланган кремнийнинг сирт қатламларида ва хажмида наноўлчамли нуқсонларнинг шаклланиш қонуниятларини тадқиқ этиш» (2017-2020 йй.) мавзусидаги илмий лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади Т-ионлар киришмалари билан легирланган монокристаллик кремнийнинг нуқсонли структурасини ҳосил бўлиш ва ривожланиш жараёнларини ҳамда чуқур марказлар ҳосил бўлиши жараёнига технологик, ноёб ер элементлари ва изовалент киришмаларнинг таъсирини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

ўтувчи элементлар (Т-ионлар) киришмалари билан легирлашнинг физик-кимёвий аспекти ва технологиясини ишлаб чиқиш;

кремнийнинг тақиқланган соҳасида Т-ионлар ҳосил қиладиган чуқур сатҳларнинг энергетик спектрини аниқлаш ва уларни электрон ҳолатлари билан идентификация қилиш;

Т-ионларнинг чуқур марказлари ҳосил бўлиш самарадорлигига технологик факторлар таъсирини аниқлаш;

ИК-спектроскопия ёрдамида, кремнийдаги Т-ионлар киришмаларининг технологик киришмалар (кислород ва углерод) билан ўзаро таъсирини аниқлаш;

Т-ионлар киришмалари билан легирланган монокристалл кремний структуравий нуқсонларни ҳосил қилиш ва ривожланишининг физик жараёнларини тадқиқ этиш;

Т-ионлар киришмалари мавжуд бўлган кремнийда структуравий нуқсонларининг ривожланишига иссиқлик, нурланиш ва босим нуқсонлари таъсирини ўрганиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида ўтувчи элементлар (Т-ионлар) киришмалари билан легирланган кремний олинган.

Тадқиқотнинг предметини Т-ионлар киришмалари билан легирланган монокристаллик кремнийдаги структуравий нуқсонларнинг ҳосил бўлиш ва ривожланиш жараёнлари ташкил этади.

Тадқиқотнинг усуллари. Чуқур сатҳларининг ностационар сифимли спектроскопияси (DLTS), фотосифим (ФЕ), электрон парамагнит резонанс (ЭПР), инфрақизил спектроскопия (ИК) ва автордиография усулларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

илк бор чуқур сатҳларининг ностационар сифимли спектроскопияси (DLTS) ва электрон парамагнит резонанс (ЭПР) ёрдамида, кремнийда Т-ионлар киришмалари (марганец, темир, хром, кобальт ва бошқалар) ҳосил қиладиган ионлашиш энергияси айна миқдордаги ва тутиш кесимига эга бўлган чуқур сатҳларни (энергетик спектрини) парамагнит марказларнинг электрон структураси билан идентификация қилинган;

ўтувчи элементлар (Т-ионлар) киришмалари билан кремнийни легирлашнинг физика-кимёвий аспекти ва технологияси такомиллаштирилган;

Т-ионлар киришмалари билан легирланган монокристаллик кремнийнинг нуқсонли структурасини ҳосил бўлиши ва ривожланиши турли технологик факторларга яъни, кристаллнинг айна вақтдан олдинги термик ҳолати ва структуранинг такомиллиги, қиздирилиш ҳарорати ва легирлашдан сўнгги совутилиш тезлиги, ундан олдинги паст ва юқори ҳароратли ишлов беришлар, шунингдек, кремнийни ўтувчи элементлар билан легирлаш усулига боғлиқлиги исботланган;

кремнийга киритилган Т-ионлар киришмалари (Mn, Fe, Cr, Co) технологик киришмалар (кислород ва углерод) билан ўзаро таъсирлашуви натижасида киришмани киритиш усули ва уни турига боғлиқ равишда оптик фаол кислород (от 10 до 50%) концентрациясининг камайиши аниқланган;

сифимли спектроскопия усули билан монокристаллик кремнийга 450–550⁰С ва 900–1200⁰С ҳароратлар оралиғида ҳар хил вақтда берилган термик ишловлар натижасида кислороднинг интенсив препитацияси ва ўлчамлари 10–100 мкм ни ташкил этадиган 2-фазанинг ажралмалари (SiO₂ ва SiO₄ заррачалари) ҳосил бўлиши исботланган;

Т-ионлар киришмалари мавжуд бўлган кремний намуналарида марганец киритишнинг одатий режимида, ноаниқ шаклдаги (~500 Å ўлчамли) ва катта

зичликдаги заррачалар, яъни қўшимча фаза (марганец силикати) рентген топографияси ва электрон микроскопия усуллари билан аниқланган;

Т-ионларнинг махсус киритилган киришмалар билан киришмалараро таъсирлашуви назорат қилинмайдиган киришмаларни кремний ҳажмидан юза қисмига локал геттерланишига олиб келиши аниқланган;

Т-ионлар киришмаларини белгиланган миқдорий мутаносибликда киритиш йўли билан термик ва радиациявий нуқсонларнинг самарадорлиги 0.5-1.0 тартибга пасайиши аниқланган ва параметрларнинг термик барқарорлиги ва радиациявий чидамлилигини ошириш усули ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

Технологик маршрутнинг турли босқичларида структураларнинг нуқсонлигини босқичма-босқич назорат қилиш усули ишлаб чиқилган ва айрим технологик операциялар жараёнида қатор термик ва киришмали нуқсонлар пайдо бўлиши исботланган. Кремнийда турли бошқарилмайдиган киришмаларнинг фаоллигини йўқотиш ва кутилмаган нуқсонли марказлар концентрациясини, ноёб ер элементи туридаги нейтрал киришмаларни киритиш йўли билан 5-6 баробарга камайтириш усуллари топилган.

Темир киришмаларини диффузиявий қиздириш жараёнида Si сиртига қопланган Т-ионлар киришмаларини самарали геттерлаш кремний намуналарининг ҳажмидаги асосий бўлмаган заряд ташувчилар яшаш вақтининг 5-6 марта ортишига олиб келиши кузатилган. Бу эса, ўз навбатида, Si асосидаги термик барқарор ва радиацияга чидамли материал ва структураларни олишга имкон яратган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги юқори сезгирликка ва ажратиш қобилиятига эга бўлган чуқур сатҳларнинг ностационар сиғимли спектроскопияси, фотосиғим, электрон парамагнит резонанс, инфрақизил спектроскопия ва автордиография усуллариининг қўлланилганлиги билан исботини топган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти ўтувчи элементлар киришмалари билан легирланган монокристаллик кремний ва кремнийли структураларда кечадиган физик жараёнлар ҳақидаги тасавурларни кенгайтириш имконини беришдан иборат.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундан иборатки барқарор параметрларга эга бўлган яримўтказгичли структураларни яратишда ишлатиш мумкин бўлган кремнийни Т-ионлар элементлари киришмалари билан легирлашнинг физик-кимёвий аспектларини ва технологиясини ишлаб чиқилган.

Тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш. Т-ионлар киришмалари билан легирланган монокристаллик кремнийнинг нуқсонли структурасини ҳосил бўлиш ва ривожланиш жараёнларини тадқиқ қилиш натижалари асосида:

структуралар нуқсонлилигини технологик маршрутнинг турли босқичлари учун ишлаб чиқилган босқичма-босқич назорат қилиш усули

«FOTON» акциядорлик жамиятида M32-63 диодлар ва M208 симисторлардаги мавжуд бўлган назорат қилинмайдиган нуқсонлар миқдорини кескин камайтириш учун ишлатилган («Узэлтехсаноат» акциядорлик компаниясининг 2017 йил 25 сентябрдаги 02-1954-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш ноёб ер элементлари каби нейтрал киришмаларни киритиш йўли билан назорат қилинмайдиган нуқсон марказлари концентрациясини 5–6 марта камайтириш имконини берган;

кремнийни диффузиявий қиздириш жараёнида кремний намуналарида асосий бўлмаган заряд ташувчилар яшаш вақтининг 5-6 баробар ортишига олиб келадиган, темир киришмаларини Т-ионлар киришмалари билан самарали геттерлаш бўйича олинган натижалар «FOTON» акциядорлик жамияти томонидан кремний асосидаги термик барқарор ва радиацияга чидамли материаллар ва структуралар олишда ишлатилган («Узэлтехсаноат» акциядорлик компаниясининг 2017 йил 25 сентябрдаги 02-1954-сон маълумотномаси). Илмий натижанинг қўлланиши Т-ионлар киришмалари билан легирланган кремний асосида ўртача қувватли кремнийли диодларнинг иссиқликка чидамлилигини оширган;

термик барқарор ва нурланишга чидамли материалларни олиш ҳамда кремний ҳажмида наноўлчамли дефектларни Т-ионлар киришмаларини киритиш йўли билан ҳосил қилиш технологияси А-3-73 рақамли “Яримўтказгичли материалларда кластерли киришма атомлари тақсимоти ва концентрациясини бошқариш қурилмасини яратиш ва ишга тушириш” лойиҳасида кластерли яримўтказгичларни барқарорлаштириб, кластерли киришма атомлари тақсимоти ва концентрациясини бошқариш қурилмасини яратишда фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Фан ва технологиялар агентлигининг 2017 йил 20 сентябрдаги ФТА-01-02/690-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш яримўтказгичлардаги кластерлар концентрацияси ва тақсимотини самарали бошқариш имконини берган.

Ишнинг апробацияси. Диссертация ишининг асосий натижалари 20 та халқаро ва 7 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича 45 та илмий иш, жумладан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 18 та мақола нашр этилган (рўйхат автореферат сўнгида келтирилган).

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, бешта боб, хулоса, 145 номдаги адабиётлар рўйхатидан иборат бўлиб, 46 та расм ва 3 та жадвални ўз ичига олган 210 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, диссертация мавзуси бўйича ҳалқаро илмий-тадқиқотларнинг шарҳи, муаммонинг ўрганилиш даражаси, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, объект ва предметлари тавсифланган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён этилган, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиқ берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

“Кремнийда нуқсонларнинг ҳосил бўлишидаги айрим хусусиятлари” деб номланган биринчи бобда ўтувчи киришмаларнинг кремнийда ҳосил қиладиган барча чуқур сатҳларининг параметрлари тизимлаштирилган ва кремнийга мазкур киришмаларни киритилганда уларнинг ҳолатлари тўғрисидаги маълумотлар тавсия этилган. Асосий йўналиш сифатида, d-қобиғи тўлдирилмаган кремнийдаги киришмаларнинг ҳолати тўғрисида олиб борилган тадқиқотлар ёзилган, бундан ташқари уларнинг бошқа киришмалар билан ўзаро таъсирини ўрганиш бўйича маълумотлар келтирилган. Легирланган кремнийга турли ташқи таъсирлар факторларини ўрганиш бўйича тадқиқотларнинг ҳозирги ҳолати таҳлили ҳам келтирилган.

Кремнийдаги нуқсоний структураларнинг ривожланишга олдиндан иссиқлик ишлови бериш таъсири батафсил ўрганилган. Мазкур бобнинг охирида, электронейтрал ва фаол бўлмаган киришмалар билан легирланган кремнийда ҳосил бўладиган нуқсонларни ўрганиш бўйича натижалар келтирилиган.

Хулосаларга асосан диссертация тадқиқотининг вазифалари ишлаб чиқилган.

“Кремнийда чуқур марказли нуқсонларнинг мавжуд бўлганда ностационар сиғимли спектроскопиянинг хусусиятлари” деб номланган иккинчи бобда чуқур сатҳлар мавжуд бўлган кремнийда ностационар сиғимли спектроскопия усулининг асослари баён этилган. Чуқур сатҳлар кенглигининг DLTS чуққи шаклига таъсири таҳлил этилган. Турли режимларда ишловчи DLTS спектрларини ўлчаш методикаси баён этилган. Ўтувчи металллар (Т-ионлар) билган легирланган кремнийни технологияси ва физика-кимёвий хусусиятлари ёзилган.

Технологик жараённинг турли жабҳаларида структуравий нуқсонларнинг ҳолатини назорат қилиш бўйича ишлаб чиқиш йўллари баён этилган.

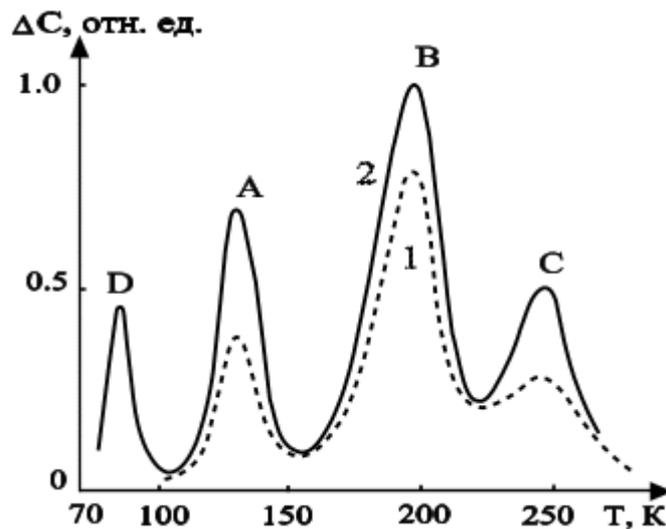
Илмий натижаларни қўллаш натижасида ноёб ер элементлар типидagi электронейтрал киришмаларни киритиш орқали керак бўлмаган нуқсонлар маркази концентрациясини 5-6 баробарга пасайтиришга олиб келиши аниқланган.

Иссиқликка ва радиацияга чидамли материаллар олиш бўйича ишлаб чиқилган технология ва Т-ионли киришмаларни кремний ҳажмига киритиш

орқали наноўлчамли нуқсонларни ҳосил қилиш технологияси баён этилган.

“Т-ионли киришмаларни билан легирланган монокристалл кремнийда структуравий нуқсонларнинг ҳосил бўлиш жараёнларни тадқиқ этиш” деб номланган учинчи бобда ўтувчи элементлар (Т-ионлар) билан легирланган кремнийдаги нуқсонларни ҳосил бўлиши жараёнларни DLTS ва фотосиғим (ФС) усуллари ёрдамида олинган тадқиқот натижалари келтирилган.

DLTS ва ФС комплекс усуллари ёрдамида нуқсонларни ҳосил бўлиш жараёнларини тадқиқ орқали, диффузия усулида марганец киритилган кремнийда тўрта чуқур сатҳлар яъни ионизация энергиялари $E_c-0.13$ эВ, $E_c-0.20$ эВ, $E_c-0.42$ эВ ва $E_c-0.54$ эВ тенг эканлиги кузатилган. Бундан ташқари хар бир энергетик сатҳга тўғри келувчи заряд ташувчиларнинг кесим тутиши мос равишда $\sigma_n = 7 \cdot 10^{-14}$ см², $6 \cdot 10^{-17}$ см², $7 \cdot 10^{-15}$ см² ва $3 \cdot 10^{-14}$ см² тенг эканлиги аниқланган.

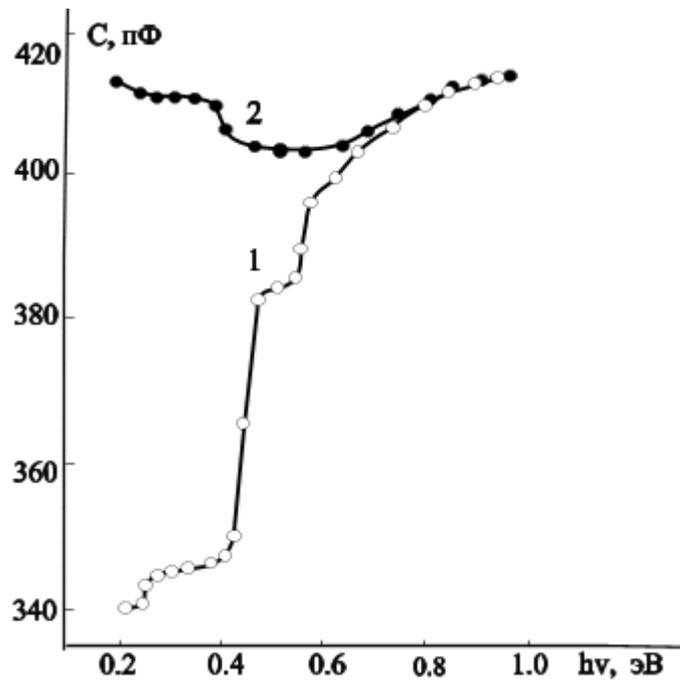


1-расм. Диффузия температураси $T_{\text{диф}}^{\circ}\text{C}$: 1-1000, 2-1250 тенг бўлган n-Si<Mn> нинг DLTS спектри

Фотосиғим спектрларига кўра (2-расм) n-Si<Mn> да $h\nu \sim 0.20$ эВ, $h\nu \sim 0.42$ эВ и $h\nu \sim 0.54$ эВ тенг энергияларда сиғим релаксацияси кузатилмоқда. Мазкур спектрларни таҳлили шуни кўрсатдики, ионизация энергиялари $E_c - 0.20$ эВ $E_c - 0.42$ эВ и $E_c - 0.54$ эВ тенг бўлган учта чуқур марказлар мавжуд эканлиги кузатилган. Индуцирланган фотосиғим (ИФС) спектрида эса битта пағона (2-расм, 2-чизиқ) яъни ионизация энергияси $h\nu \sim 0.41$ эВ тенг бўлган битта чуқур сатҳ кузатилмоқда.

DLTS ва ФС спектрларининг таҳлилига кўра, иссиқлик ва оптик усуллар билан олинган энергиялар қиймати n-Si<Mn> да улчаш хатоликлари орасида эканлиги аниқланди.

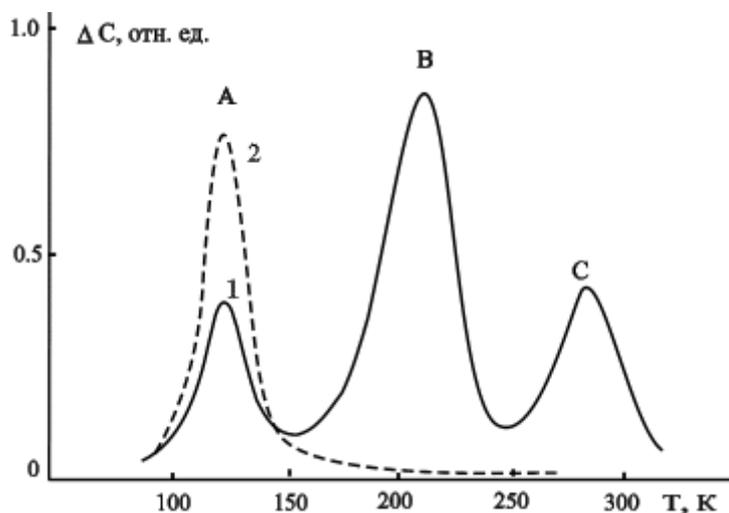
Марганец билан легирланган кремнийда чуқур сатҳларнинг ҳосил бўлиши эффективлиги: диффузия температураси ва совутиш тезлиги ортиши билан марганецга тегишли чуқур сатҳлар концентрациясининг ошиши кузатилган.



2-расм. n-Si<Mn> билан легирланган кремнийнинг ФС ва ИФС спектрлари

Электрон парамагнит резонанс (ЭПР) усули ёрдамида n-Si<Mn> намуналарида изоляцияланган Mn^- , Mn^0 ва $(Mn^0)_4$ кластери аниқланган. Аниқланган чуқур сатҳлар марганец атомлари парамагнит марказлар билан боғлиқлиги қайд этилган.

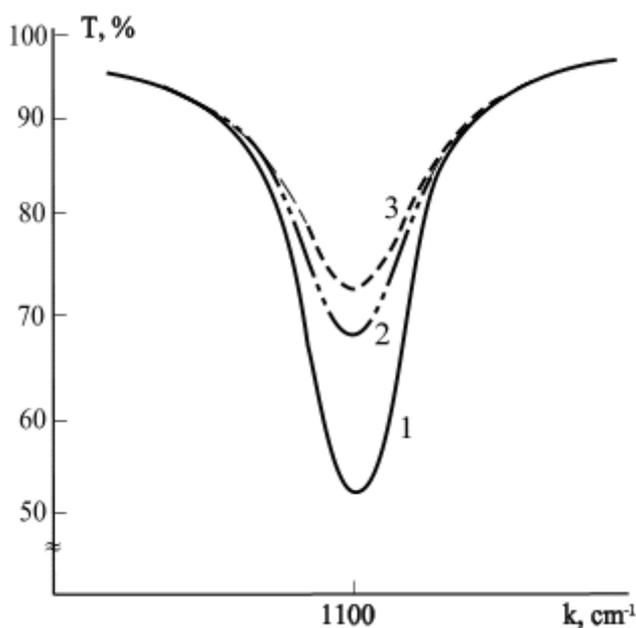
Диффузия ва ўстириш жараёнида хром атомлари киритилган кремнийдаги номувозанатий жараёнлар тадқиқ этилган. Диффузия усули билан хром атомлари кремнийга киритилганда ҳосил бўладиган чуқур сатҳлар ионизация энергиялари ва заряд ташувчилар кесим тутиши: $E_c-0.21$ эВ, $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-15}$ см², $E_c-0.41$ эВ, $\sigma_n = 6 \cdot 10^{-16}$ см² ва $E_c-0.51$ эВ, $\sigma_n = 1 \cdot 10^{-16}$ см² ва p-Si<Cr> намуналарида эса иккита $E_v+0.21$ эВ, $\sigma_p = 7 \cdot 10^{-15}$ см² ва $E_v+0.41$ эВ, $\sigma_p = 3 \cdot 10^{-15}$ см² тенг чуқур сатҳлар кузатилган (3-расм).



3-расм. n-Si<Cr> билан легиранган намуналарнинг DLTS спектрлари

Ионизация энергиялари $E_c - 0.21$ эВ ва $E_v + 0.41$ эВ га тенг бўлган чуқур сатхлар иссиқлик ишлови берилган назорат намуналарида ҳам кузатилмоқда, лекин уларнинг концентрацияси легирланган намуналарга нисбатан анча кам эканлиги кўрсатилган. Ионизация энергиялари $E_c - 0.41$ эВ, $E_c - 0.51$ эВ ва $E_v + 0.21$ эВ тенг бўлган энергетик сатхлар технологик режимларга ($T_{\text{диф}}$ ва $V_{\text{сов}}$) боғлиқ эканлиги аниқланган. Олинган натижаларга кўра $T_{\text{диф}}$ ва $V_{\text{сов}}$ лари қанча катта бўлса, юқоридаги энергетик сатхлар концентрацияси шунчалик катта бўлиши кузатилган.

Диффузия усулида хром атомлари кремнийга киритилгандаги ИҚ-ютилиш спектрларига кўра (4-расм), Cr атомининг кремнийда мавжудлиги, бошқа Т-ионлар киришмалари каби, кремний ҳажмидаги кислороднинг ютилиш чуққисининг камайишига, яъни оптик фаол кислородни концентрациясининг камайишига олиб келиши аниқланган. Бунда хром концентрацияси қанчалик кремний ҳажмида кўп бўлса, $N_0^{\text{опт}}$ шунчалик камайишига олиб келиши аниқланган.



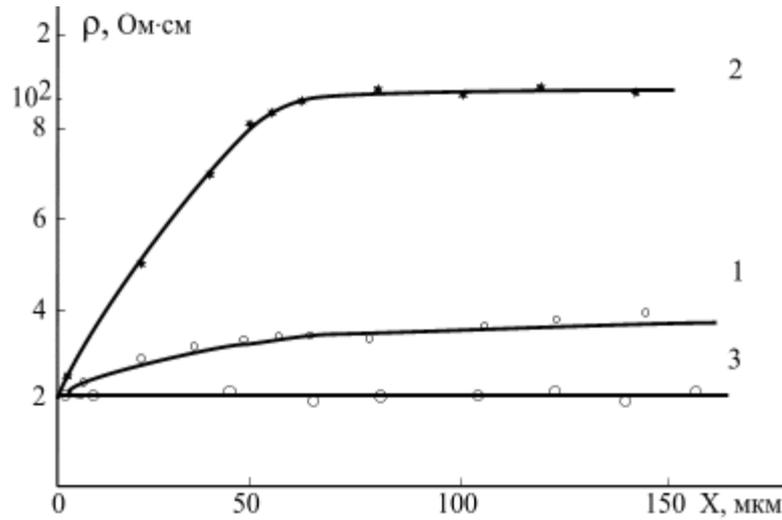
1 - назорат намунаси. $T_{\text{диф}}$: 2 - 1000°C ,
3 - 1100°C , тез совутилган

4-расм. Диффузия усулида Cr билан легирланган кремнийнинг ИҚ-ютилиш спектри

Шундай қилиб, диффузия усулида хромни кремнийга киритишда орқали Cr ва O типдаги электронейтрал ва оптик нофаол комплекслар ҳосил бўлиши мумкинлиги айtilган.

Диффузия усулида кобальтни кремнийга киритилгандан сўнг, унинг солиштирма қаршилигини (ρ) профили Si сиртидан унининг маълум ички қатламигача бўлган тақсимоти ўрганилган (5-расм). Олинган натижаларга кўра $\text{Si}\langle\text{Co}\rangle$ ва барча Т-ионли киришмаларда erfc -функцией кўринишида эмас, балки иккита қисмдан иборат эканлиги аниқланган. Бошланишида ρ нинг 1 тартибга кескин ошиши ва чуқурлиги ~ 60 мкм дан кейин ρ нинг

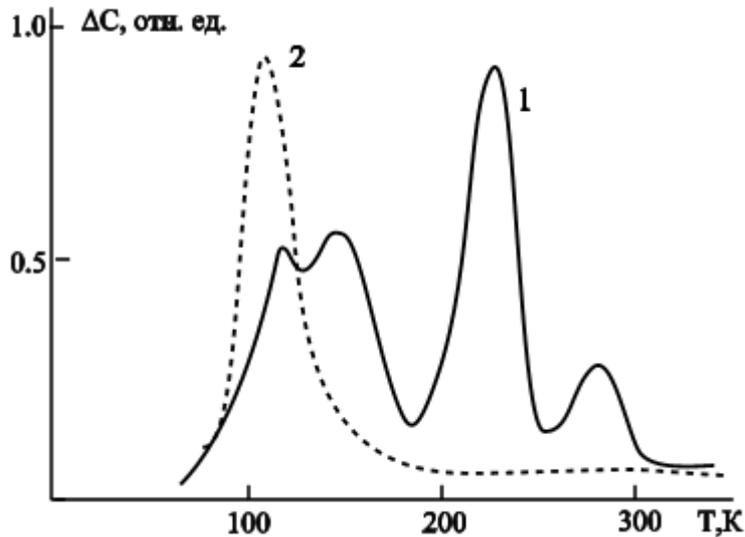
стабиллашуви ва чуқурлик бўйича тақсимоти ҳам ўзгармаётганлиги кузатилмоқда.



5-расм. Si<Co> билан легирланган кремнийнинг (1,2) Si назорат намунасини (3) солиштирма қаршилигининг ρ чуқурлик бўйича тақсимоти

Назорат намуналарида эса ρ нинг чуқурлик бўйича тақсимоти ўзгармас эканлиги кўрсатилган (5-расм, 3-чизик).

Co атомлари билан легирланган кремнийни сиғимли спектроскопия усули билан улчанганда ионизация энергиялари $E_c - 0.20$ эВ, $E_c - 0.33$ эВ,



6-расм. n-Si<Co>(1) ва n-Si назорат (2) намуналарининг типик DLTS спектрлари

$E_c - 0.45$ эВ, $E_c - 0.55$ эВ n-Si<Co> намуналарида тўртта чуқур сатҳ ва заряд ташувчилар кесим тутиши мос равишда $\sigma_n = 4 \cdot 10^{-17}$ см², $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-15}$ см², $\sigma_n = 1.1 \cdot 10^{-15}$ см² ва $\sigma_n = 1.5 \cdot 10^{-15}$ см² тенг эканлиги аниқланган (6-расм).

Олинган натижалар солиштирилганда, охириги учта чуқур сатҳларнинг ҳосил бўлиши технологик факторларга боғлиқлиги яъни диффузия температураси ва совутиш тезликларига боғлиқлиги аниқланган). Ионизация энергияси $E_c - 0.20$ эВ ва тенг бўлган чуқур сатҳ иссиқлик ишлови берилган

назорат ва легирланган намуналарида ҳам кузатилмоқда, лекин бу энергетик сатҳли марказ иссиқлик нуқсонига тегишли эканлиги кўрсатилган.

p-Si<Co> намуналарда эса тақиқланган зонанинг паст қисмида $E_c - 0.32$ эВ га тенг бўлган битта чуқур сатҳ мос равишда заряд ташувчилар кесими тутиши заряда $\sigma_p = 2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ тенг чуқур сатҳ кузатилган.

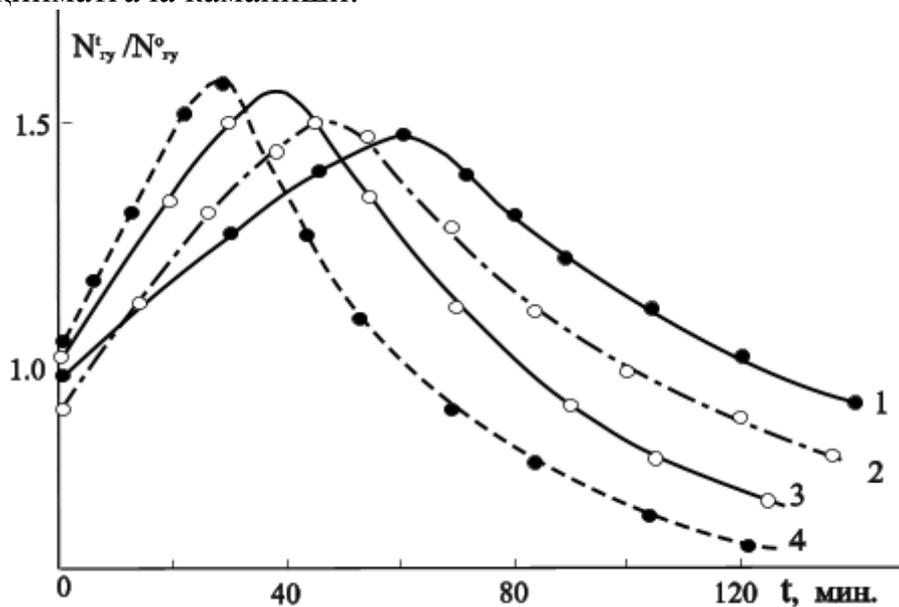
Марганец, хром ва кобальт легирланган кремний намуналарида паст ҳароратли ишлов бериш кинетикаси ўрганилди ва Т-ионли киришмалар юқори мигрицион қобилиятга ва улар ҳосил қилган чуқур марказлар параметрлари эса ностабил эканлиги кўрсатилган. Биз ўрганаётган Т-ионли барча киришмаларнинг чуқур марказлари изотермик куйдиришда икки қисмдан иборат эканлиги 7-расмда келтирилган.

Барчага маълум бўлган кесим усулида Т-ионли киришмалар активация энергияси куйидаги ифодага нисбатан:

$$\ln \frac{t_1}{t_2} = \frac{E_{омж}}{K} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right),$$

баҳоланган. Бу ерда t_1 и t_2 – вақтлар маълум T_1 ва

T_2 ($T_1 < T_2$) температураларда чуқур сатҳлар концентрациясининг маълум (бир хил) қийматгача камайиши.



7-расм. Турли паст хароратли ишлов бериш натижасидаги n-Si<Cr> нинг куйдириш кинетикаси

Ҳисоб-китобларга кўра, марганецнинг кремнийдаги $E_c - 0.42$ эВ ли чуқур сатҳи активация энергияси 0.50 ± 0.02 эВ, $E_c - 0.54$ эВ сатҳ учун 1.8 ± 0.02 эВ тенг эканлиги, хромга тегишли $E_c - 0.41$ эВ сатҳ эса 0.55 ± 0.02 эВ, $E_c - 0.51$ эВ сатҳ эса 1.7 ± 0.02 эВ тенг эканлиги аниқланган. Бошқа Т-ионли киришмалар ҳам худди шунга ўхшаш қийматларга эга эканлиги аниқланган.

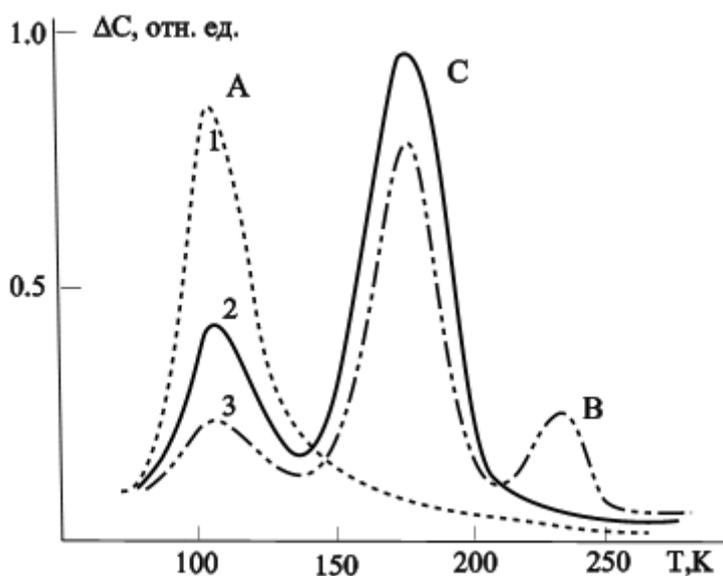
“Т-ионлар билан легирланган кремний монокристаллининг структуравий нуқсонлар ривожланиши жараёнидаги тадқиқотлар” деб номланган тўртинчи бобда бошланғич кремний нуқсонли структураларига олдиндан термик ишлов бериш ва Т-ионли киришмалар мавдуд кремнийда

структуравий нуқсонларининг ривожланишига юқори ҳароратли ишлов бериш таъсири ўрганилган.

Монокристалл кремнийга турли хил юқори ҳароратли ишловлар бериш, структуравий нуқсонларнинг ўзгаришига олиб келиши кузатилган. Бунда технологик киришмаларни турли ассоциялашган (боғланган) ҳолатлар ҳосил бўлиши кўрсатилган, масалан, кислород атомлари кремнийда. Технологик киришмалар ҳолатларини нуқсонлар ҳосил бўлиш жараёнидаги ролини ўрганиш мақсадида ва бошланғич кремнийда атомар кислород О ли диффузион қатламга эга, кремний сиртида SiO_2 пардага ва кремний ҳажмидаги SiO_2 заррачга эга намуналар тайёрланди. Шундан сўнг маълум бир режимда мазкур намуналар кобальт, марганец ёки хром легирланган. Технологик киришмаларни турли хил қисмларга ажратиш орқали кремнийдаги чуқур марказлар энергетик спектрига таъсири тадқиқ этилган.

Сигимли спектроскопия усули ёрдамида, $450-550^\circ\text{C}$ и $900-1200^\circ\text{C}$ температура оралиқларда, турли вақтларда монокристалл кремнийга олдиндан иссиқлик ишлови берилса, кислород преципитациясининг интенсив ҳосил бўлиши ва турли йиғилишлар ва 2-чи фаза чиқишлари (SiO_2 и SiO_4 заррачалари) уларнинг ўлчамлари эса 10-100 мкм ни ташкил этиши аниқланган.

DLTS ўлчаш ва унинг спектрларини, структуравий нуқсонларнинг ривожланиши ҳамда кислород ва углероднинг турли боғланган ҳолатларининг мавжудлиги- SiO_2 заррача, SiO_4 , CO_n ва бошқалар чуқур сатҳларнинг ҳосил бўлишига эффективлигига никель, марганец ва хромнинг таъсири таҳлил этилган. Технологик киришмаларнинг кремнийда боғланган ҳолатда мавжудлиги, масалан, SiO_2 парда Т-ионли киришмаларни кремнийнинг ҳажмига киришга тўсқинлик кўрсатиши ва кремний панжарасида SiO_2 заррачанинг мавжудлиги эса яримўтказгич тақиқланган зонасида ҳосил бўладиган чуқур марказлар эффективлигини ошириши аниқланган.



8-расм. n-Si<Mn> нинг кислород билан боғланган ҳолати намуналарининг DLTS спектри

DLTS ва ИҚ –ютилиш усуллари билан олиб борилган тадқиқотлар натижасига кўра, 8-расмга кўра, Т-ионлар легирланган кремнийда чуқур сатҳлар концентрациясини камайиши ва киритилаётган киришманинг концентрацияга боғлиқ ҳолда оптик фаол кислород концентрациясининг N_0^{opt} 10-30% камайиши кузатилган.

Бу ўз навбатида Т-ионли киришмалар кислород атомлари билан ўзаро таъсирлашаётганидан далолат беради. Кремнийга 1100°C да 12 соат мобайнида ишлов берилса, кислород преципитацияси жараёнида SiO_2 заррача ҳосил бўлади. Бунда N_0^{opt} 45÷50% камайиши кузатилган.

Кремнийга кўшимча марганец, кобальт ёки хром атомлари киритилса, у ҳолда олдиндан 1100°C да 12 соатлик ишлов берилса оптик фаол кислороднинг концентрацияси N_0^{opt} на 8-10% камайиши кузатилган. Бу эса Т-ионларни SiO_2 заррача билан ўзаро таъсирлашуви билан боғлиқлиги тушунтирилган.

Структуравий тадқиқотлар натижаларига кўра, Т-ионли киришмалар киритилган кремний олдиндан юқори ҳароратли ишловдан ўтган бўлса, у ҳолда технологик ва махсус киритилган киришмалар атомларидан иборат катта йиғилмалар ҳосил бўлиши кузатилган.

Электрон микроскоп ва рентген топограммаси усуллари орқали кўшимча фаза (марганец силикати) Т-ионли кремний намуналарида марганец учун ноаниқ шаклдаги (ўлчами ~500 Å) ва зичлиги катта бўлган заррача кузатилган (9-расм).



9-расм. Марганец Si га 1200°C да 2 соат диффузия қилинганда ҳосил бўлган Mn-O типдаги заррача тасвири

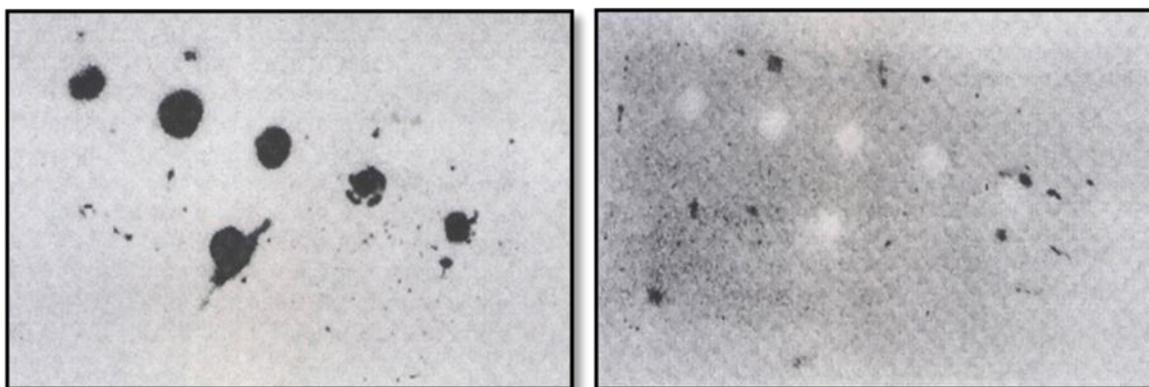
“Т-ионлар ҳосил қилган чуқур марказларнинг ҳосил бўлиш жараёнига технологик киришмаларнинг ва турли хил ташқи факторлар таъсири” деб номланган бешинчи бобда махсус киритилган электрофаол ва электрофаол бўлмаган киришмаларнинг ўзаро таъсири, ҳамда нурланиш, бир тарафлама ва ҳар тарафлама босимларнинг таъсирлари ўрганилган.

Изовалент киришмалар (ИВК) – германий ва қалай атомларининг структуравий нуқсонларнинг ривожланишида Т-ионлар (Mn, Co, Cr) киришмалари билан ўзаро таъсири ҳам сиғимли спектроскопия ёрдамида ўрганилган.

Si<Ge> ва Si<Sn> (Т-ионлар киритилмаган) намуналарининг DLTS спектрларини ўлчашлар бирор бир чуқур сатҳ мавжуд эмаслигини кўрсатган, аммо нейтрон-активацион таҳлил натижаларига кўра, Ge ва Sn атомларининг миқдори етарлича катта $10^{17} \div 10^{19} \text{ см}^{-3}$ бўлишига қарамай, гермний ёки қалай атомлари кремнийда электр фаоллик кўрсата олмаслиги кўрсатилган. Демак, ўстиришда киритилган Ge ва Sn атомлари Si ҳажмида электронейтрал ҳолатда бўлар экан.

Ge ва Sn атомларининг Si панжарасида бўлиши нуқсонларни ҳосил бўлишига кескин таъсири, яъни изовалент киришмаларнинг мавжудлиги Si даги Т-ионларга тегишли чуқур сатҳлар ҳосил бўлиш эффективлигини ошириши аниқланган. Ge ёки Sn атомларининг Si панжарасида мавжудлиги термик нуқсонларнинг ҳосил бўлишига тўсқинлик кўрсатар экан.

Битта чуқур сатҳли кришмани иккинчи чуқур сатҳли киришмалар билан кремний сиртида диффузион қатлам ҳосил қилиб, уларнинг ўзаро таъсири натижасида геттерлаш эффекти содир бўлар экан, бу эса ўз навбатида электр фаол атомлар ва уларнинг тўлиқ концентрацияларини ўзгаришига олиб келар экан. Кремнийдаги никель киришмаси учун Fe и Mn қатламлари, темир киришмаси учун - Co, Ni, Mn и Sn қатламлари ва марганц киришмаси учун Au и Pt қатламлари геттер вазифасини бажарар экан. Авторадиография усули билан кремний сиртининг маълум қисмига металлдан локал қатлам суртилиб махсус киритилган электрофаол ва электрофаол бўлмаган Т-ионлар билан ўзаро таъсир туфайли кремний ҳажмидаги бошқариб бўлмайдиган киришмаларни унинг юза қисмига локал геттерлаш (10-расм, а ва б) кўрсатилган ва тажрибада аниқланган.



а

б

10-расм. ^{59}Fe киришмали кремний намуналарининг авторадиограммаси (1200⁰С да 2 соат ЮҲИБ орқали Si да Sn қатлами орқали Fe локал геттерлаш) (а) ва мазкур намуна сиртидан 10 мкм қалинликдаги қатлам олиб ташлангандаги авторадиограмма яъни Si ҳажмидан юза қисмига Fe ни локал геттерлаш (б)

Чуқур сатҳларнинг ўзаро таъсир характери кремнийга диффузион усул билан киришмаларни легирлаш кетма-кетлигига боғлиқлиги аниқланди. Никель билан аввал кремний легирланганда, кейин марганец киритилганда кремний ҳажмида Ni атомларининг тўлиқ концентрацияси камайши, тескари

тартибда яъни аввал Mn кейин Ni атомлари кремний киритилганда эса никель атомларининг тўлиқ концентрациясининг ошиши кузатилган.

Асосан уларнинг кинетик ҳосил бўлиши, кислороднинг фазавий ҳолатлари ва концентрацияси, кейинги турли хил иссиқлик ишлов бериш (юқори ҳароратли ишлов бериш ва паст ҳароратли ишлов бериш) ва совутиш тезликларига боғлиқлик факторлари аниқланди.

Бир пайтда Mn и Ni атомларини Si га диффузия усулида киритиш преципитатлар концентрациясининг ошишига ва уларнинг ўлчамларини камайшига олиб келар экан. Кетма-кет диффузия орқали аввал Mn кейин Ni атомлари кремнийга киритилганда ҳосил бўлган Mn комплекслари (силицидлар, силикатлар) учун марказ роли бажариб, диффузия усули кўшимча киритилаётган Ni ёрдамида катта преципитатларни ҳосил бўлишга олиб келар экан. Тескари кетма-кетликда диффузия жараёни амалга оширилганда эса кичик преципитатларни яъни никелни ўзини легирлаганда ҳосил бўладиган нуқсонларни ҳосил бўлиши аниқланди.

Si<Mn> ва Si<Ni> намуналарига юқори ҳароратли ишлов берилганда кичик нуқсонларни эриши ва коагуляцияси ҳисобига преципитатларни катталашшига олиб келиши кузатилди. Si<Mn> намуналарга паст ҳароратли ишлов бериш ҳам панжара деформациясининг ошиши ва преципитатларнинг ўлчамларини катталашувига олиб келиши, Si<Ni> намуналарга паст ҳароратли ишлов бериш эса преципитатларни ўлчамларини ўзгаришга олиб келмаслиги аниқланган.

T-ионли киришмалар билан легирланган кремнийда радиацион нуқсонларнинг ҳосил бўлиш жараёнлари ўрганилган ва улар ^{60}Co γ -квантлари ва электронлар (микротрон МТ-22С) билан нурлантирилганда маълум бўлган радиацион нуқсонлар (А- ва Е- марказлар) ҳосил бўлиши аниқланган. T-ионли киришмаларнинг Si ҳажмида бўлиши яъни киришма типига, унинг концентрациясига ва киритиш услубига кўра радиацион нуқсонларнинг эффективлигини 5-6 баробарга камайишига олиб келар экан.

T-ионли киришмалар билан легирланган кремнийдаги қолдиқ эффектларни яъни бир тарафлама ва юқори гидростатик босим таъсирини чуқур сатҳли ностационар сифимли спектроскопия усули ёрдамида тадқиқ этилди. 5÷70 кбар интервалдаги гидростатик босим таъсири ёрдамида Mn, Co ва Cr атомлари чуқур сатҳларининг активация энергияси E_t нинг қолдиқ ўзгаришга олиб келиши кўрсатилган. Бир тарафлама босим таъсирида эса T-ионлар сатҳларининг концентрациясини камайишига олиб келиши аниқланган.

ХУЛОСА

Нуқсонларни ҳосил бўлиши монокристалл кремнийда киришма-нуқсонли ассоциатларга легирлаш компоненталар соф бўлмаган кристалл панжара ва турли ташқи факторлар жараёнларини комплекс усуллар ёрдамида тадқиқ этиш орқали куйидаги хулосаларга келинди:

1. Ўтувчи элементли киришмалар (Т-ионлар) билан кремнийни легирлаш технологияси ва физико-кимёвий аспектларини ишлаб чиқилди.

2. Марганец, темир, кобальт ва хром атомларини кремнийга киритиш, кремний тақиқланган зонасининг пастги ва юқори қисмларида фиксирлаган чуқур сатҳлар ва заряд ташувчиларнинг кесим тутиши ҳосил бўлиши аниқланган.

3. ЭПР ва DLTS усуллари ёрдамида илк бор кремнийда Т-ионли киришмаларнинг (марганец, темир, кобальт ва хром ва бошқалар) электрон структурали парамагнит марказлар ва чуқур сатҳлар ҳосил қилиш энергетик спектрлари идентификация қилинди.

4. Т-ионлар билан легирланган монокристалл кремнийда структуравий нуқсонларнинг ривожланиши ва ҳосил бўлиши эффективлиги турли технологик факторлар боғлиқлиги: кристалл структуранинг мукаммалиги ва иссиқлик ишлови тарихи, куйдириш ҳарорати ва легирлангандан сўнг соғутиш тезлиги, олдиндан паст ва юқори ҳароратли ишлов бериш ҳамда ўтувчи металллар билан кремнийни легирлаш усуллари аниқланган.

5. Т-ионли киришмалар (Mn, Fe, Cr, Co) кремнийга киритилганда технологик киришма (кислород ва углерод) атомлари билан ўзаро таъсирлашиб, оптик фаол кислород концентрациясини (N_o^{opt}) (10% дан 50% гача) камайиши у ёки бу киришмаларни киритиш йўлларига боғлиқлиги экспериментал тадқиқотлар орқали аниқланган.

6. Монокристалл кремнийга олдиндан иссиқлик бериш яъни 450-550°C ва 900-1200°C интервал оралиқларида кислороднинг интенсив преципитацияланиши ва турли йиғилишлар ҳамда иккинчи фазада 10-100 мкм ли (SiO_2 ва SiO_4 заррачалар) ажралиши сиғимли спектроскопия усули ёрдамида аниқланди. Кремнийдаги технологик киришмаларнинг боғланган ҳолатда бўлиши, масалан, SiO_2 парда Т-ионларни кремний ҳажмга киришига тўсқинлик кўрсатиши, SiO_2 заррачанинг Si панжарасида мавжудлиги яримўтказгич тақиқланган зонасида ҳосил бўладиган чуқур сатҳларнинг ҳосил бўлиш эффективлигини ошириши аниқланган.

7. Рентген топограммаси ва электрон микроскоп усуллари орқали Т-ион киришмалари Si намуналарида кўшимча фаза (марганец силикати) яъни заррача аниқ бўлмаган шаклда (ўлчами ~500 Å) ва катта зичликда ҳосил бўлиши аниқланган. Худди шундай фазалар бошқа Т-ионли киришмаларда ҳам аниқлаган.

8. Т-ионларнинг ўзаро таъсирлашуви махсус киритилган электр фаол ва пассив киришмалар бошқариб бўлмайдиган киришмалар ҳажмдан кремний сиртига локал геттерлашга олиб келиши кўрсатилган.

9. Т-ионли киришмалар (Mn, Fe, Cr, Co) маълум технологик режимларда киритилганда радиацион ва термик нуқсонларни кремнийда ҳосил бўлишига тўсқинлик кўрсатар экан, яъни уларнинг кириш эффективлиги 0,5-1 тартибга камайар экан.

10. Маълум нисбатта Т-ионли киришмалар киритиш орқали термик стабиллик ва радиацияга чидамлилигини ошириш йўллари ишлаб чиқилди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.27.06.2017. FM/T.34.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ,
ИНСТИТУТЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,
САМАРКАНДСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УЗБЕКИСТАНА

УТАМУРАДОВА ШАРИФА БЕКМУРАДОВНА

**ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ДЕФЕКТНЫХ
ЦЕНТРОВ В КРЕМНИИ, ЛЕГИРОВАННОМ ПРИМЕСЯМИ Т-ИОНОВ**

01.04.10 – Физика полупроводников

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

Ташкент – 2017 год

Тема диссертации доктора наук (DSc) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером B2017.1.DSc/FM.45

Диссертация выполнена в Национальном университете Узбекистана имени Мирзо Улугбека.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице по адресу fti-kengash.uz и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» по адресу www.ziyo.net.

Научный консультант: **Абдурахманов Кахар Паттахович**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Зайнабидинов Сирожиддин Зайнабидинович**
доктор физико-математических наук, профессор

Баграев Николай Таймуразович
доктор физико-математических наук, профессор

Камалов Амангелди Базарбаевич
доктор физико-математических наук

Ведущая организация: **Каракалпакский государственный университет**

Защита диссертации состоится «__» _____ 2017 года в ____ часов на заседании Научного совета DSc.27.06.2017. FM./T.34.01 при Физико-техническом институте, Институте ионно-плазменных и лазерных технологий, Самаркандском государственном университете. (Адрес: 100084, г. Ташкент, ул. Бодомзор йули, дом 26. Административное здание Физико-технического института, зал конференций. Тел./Факс: (99871) 235-30-41; e-mail: lutp@uzsci.net).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Физико-технического института (зарегистрирована за № ____). Адрес: 100084, г. Ташкент, ул. Бодомзор йули, дом 26. Административное здание Физико-технического института, зал конференций. Тел./Факс: (99871) 235-30-41.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2017г.
(протокол рассылки № ____ от _____ 2017г.)

А.С.Л.Лутпуллаев
Председатель Научного совета по присуждению
ученой степени доктора наук,
д.ф.-м.н., профессор

А.В.Каримов
ученый секретарь Научного совета по
присуждению ученой степени доктора наук
д.ф.-м.н., профессор

С.А.Бахрамов
Председатель научного семинара при Научном совете
по присуждению ученой степени доктора наук,
д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора наук (DSc))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время во всём мире разработка и производство полупроводниковых приборов и интегральных схем с большим числом элементов на единицу площади материала требует существенного повышения совершенства структуры кремния - основного материала полупроводниковой микро- и наноэлектроники и фотоники. В этом аспекте исследования, направленные на изучение процессов формирования и развития дефектных центров в кремнии, легированном примесью Т-ионов и установление управляемых способов стабилизации параметров полупроводниковых приборов являются одной из важных проблем.

Во всём мире на сегодня бурное развитие микро- и оптоэлектроники привело к необходимости разработки и изготовления новых материалов с разнообразными свойствами, что было достигнуто введением различных примесей в определенных концентрациях. В связи с этим изучение процессов дефектообразования в монокристаллическом кремнии, в частности, реализация научных исследований в следующих направлениях считается одной из важных задач: исследование процессов формирования и развития дефектных центров в кремнии, легированном примесью переходных элементов (Т-ионов) под воздействием различных факторов; влияния технологических примесей на механизмы образования глубоких центров в кремнии с примесью переходных элементов; установление закономерностей в формировании электронной структуры центров и энергетического спектра глубоких уровней, создаваемых примесью Т-ионов; их взаимодействия с другими примесями и структурными дефектами решетки; влияния термических, радиационных и барических дефектов на формирование дефектной структуры кремния с примесью переходных элементов. Научно-исследовательские работы, проводимые в указанных направлениях, указывают на актуальность темы данной диссертации.

В годы независимости в Республике особое внимание уделяется развитию полупроводникового материаловедения, где достигнуты значимые результаты. Определены оптимальные режимы легирования кремния некоторыми примесями с глубокими уровнями, приводящие к формированию новых, уникальных свойств кремния, таких как чувствительность к ИК-излучению, повышение тензочувствительности и др. Исследованы фазовые превращения и силицидообразование в приповерхностной области кремния, легированного различными примесями и обнаружено образование ряда силицидов того или иного типа, в зависимости от технологических режимов; разработан способ управления спектром радиационных дефектов в кремниевых диффузионных диодах с целью понижения времени восстановления обратных характеристик готовых приборов. На основе “Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан” в области полупроводниковой микро- и оптоэлектроники является наиболее важным разработка способов контролируемого управления всеми параметрами

полупроводниковых материалов и углубление понимания процессов дефектообразования в монокристаллическом кремнии.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в постановлениях Президента Республики Узбекистан «О приоритетных направлениях развития индустрии Республики Узбекистан на 2011-2015 годы» от 15 декабря 2010 года № ПП–1442 и «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организаций, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 № ПП-2789 года, 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 приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Настоящая работа выполнена в соответствии с Приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан III. «Энергетика, энерго- и ресурсо-сбережение, 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 Мичиганском (США), Токийском (Япония) университетах и Берлинском техническом университете (Германия) ведутся исследования по созданию оптоэлектронных приборов на основе кремния, легированного переходными элементами, В Цюрихском исследовательском центре (Швейцария) и университете прикладных наук Фонтис (Нидерланды) проводятся исследования по получению новых полупроводниковых материалов, физика наноструктур исследуется в Физико-техническом институте Санкт-Петербург (Россия), технологией получения структур микро и нанoeлектроники занимаются в НПП «Полюс» (Россия).

В результате проводимых в мире исследований по получению материалов, легированных примесями переходных элементов и изучению структур на их основе получен ряд интересных научных результатов, в частности ниже приведенные: в Токийском университете (Япония) получены кремниевые структуры, содержащие примеси Т-ионы (Co, Ni и др.); в Берлинском техническом университете (Германия) исследованы парамагнитные центры, создаваемые переходными элементами в кремнии и проведена их идентификация с глубокими центрами, в Ташкентском государственном техническом университете (Узбекистан) разработана технология формирования нанокластеров атомов марганца, германия и

¹ Обзор международных научных исследований по теме диссертации проведен на основе A study of grown-in impurities in silicon by deep-level transient spectroscopy // Solid-State Electronics, V. 46, B.11, p.1039-1051, (2003),

никеля в решетке кремния, в Физико-техническом институте научно-производственного объединения «Физика-Солнце» создана технология изготовления фоточувствительных многослойных структур на основе арсенида галлия (Узбекистан).

В настоящее время проводятся исследования в следующих перспективных направлениях, в том числе: по разработке фото- и тензочувствительных структур на основе кремния, легированного никелем и марганцем; по разработке датчиков влажности и температуры на основе легированного кремния; 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.

Степень изученности проблемы. Мировая практика показывает, что при технологических обработках полупроводниковых пластин при производстве различных структур и приборов происходят различные взаимодействия дефектов между собой, которые определяются, прежде всего, точечными дефектами, характеризующимися максимальной подвижностью в решетке. Анализ и обобщение результатов исследований, проводимых за рубежом известными специалистами в области физики полупроводников и полупроводниковой нано- и микроэлектроники (Lemke H., Grimmeiss H.G., Graff K., Pieper H., Омеляновский Э.М., Фистуль В.И., Weber E.R.) показывают, что экспериментальные исследования оптических, люминесцентных, резонансных и других свойств полупроводников с различными глубокими уровнями, среди которых особое место занимают примеси переходных элементов в кремнии, сегодня позволяют строить определенные общие модели глубоких центров, но эти модели еще не совершенны.

Вопрос о моделировании электронной структуры примесного глубокоуровневого атома тесно связан с более общим вопросом – построением теории глубоких примесных уровней. К настоящему времени теория перешла от модельного полуэмпирического описания дефектов в полупроводниках к количественному описанию конкретных систем с высокой степенью детализации. На этой стадии уже отчетливо выявлены особенности и различия поведения примесей. Наметились существенные сдвиги и в описании состояния и поведения комплексов примесь-вакансия, примесь-примесь и др. при изучении которых обнаружены новые эффекты.

В работах А.А.Лебедева, В.И.Фистуля, Л.С.Бермана, Н.Т.Баграева, А.Т.Мамадалимова, Ш.Махкамова проведена идентификация целого ряда глубоких уровней в кремнии и определены их энергетические параметры.

В работах К.П. Абдурахманова на основе полученных результатов разработан способ управления спектром радиационных дефектов в кремниевых диффузионных диодах с целью понижения времени восстановления обратных характеристик готовых приборов. М.К.Бахадырхановым, С.З. Зай-

набидиновым была показана возможность улучшения параметров полупроводниковых структур на основе компенсированного кремния путем введения различных глубокоуровневых примесей.

Несмотря на огромное количество экспериментальных и теоретических данных, до сих пор невыяснена природа физических явлений, происходящих в кремнии, специально легированном примесями переходных элементов и роль состояния неконтролируемых технологических примесей в этих процессах, остаются неизученными процессы формирования и развития дефектной структуры монокристаллического кремния, легированного примесями Т-ионов.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках проектов научных исследований Национального Университета Узбекистан по темам: ОТ-Ф2-081 «Изучение закономерностей дефектообразования в монокристаллическом кремнии с примесно-дефектными ассоциатами и динамических процессов формирования скрытых границ раздела полупроводник-диэлектрик» (2007–2011гг.); ИТД-14-035 «Разработка способов повышения стабильности параметров кремниевых МДП-структур» (2009-2011гг.), ИТД-4-43 «Разработка технологии получения наноструктурированных силицидов тугоплавких элементов-компонентов кремниевых МДП-структур» (2012-2014гг.), А-3-116+А-4-30 «Разработка технологии получения легированного кремния и кремниевых диодных структур с повышенной радиационной стойкостью и способов повышения фоточувствительности кремниевых солнечных элементов» (2015-2017гг.), ОТ-Ф2-11 «Исследование закономерностей формирования наноразмерных дефектов в приповерхностных слоях и объеме кремния с примесями d-элементов» (2017-2020гг.).

Целью исследования является определение процессов формирования и развития дефектной структуры монокристаллического кремния, а также определение роли технологических, редкоземельных и изовалентных примесей, в образовании глубоких центров в кремнии с примесями Т-ионов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

разработать физико-химические аспекты и технологию легирования кремния примесями переходных элементов (Т-ионов);

определить энергетический спектр глубоких уровней, создаваемых в запрещенной зоне кремния Т-ионами и идентифицировать их с электронными состояниями;

исследовать влияние технологических факторов на эффективность образования глубоких центров Т-ионов;

изучить взаимодействие примесей Т-ионов с технологическими примесями (кислородом и углеродом) в кремнии с помощью ИК-спектроскопии;

исследовать физические процессы формирования и развития дефектной структуры монокристаллического кремния, легированного примесями Т-ионов;

изучить влияние термических, радиационных и барических дефектов на развитие дефектной структуры кремния с примесями Т-ионов;

Объектом исследования является кремний, легированный примесями переходных элементов (Т-ионов).

Предметом исследования являются процессы формирования и развития дефектной структуры монокристаллического кремния, легированного примесями Т-ионов.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использованы методы нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS), фотоемкости (ФЕ), электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), инфракрасной спектроскопии и автордиографии.

Научная новизна диссертационного исследования:

впервые проведена идентификация энергетического спектра глубоких уровней, создаваемых примесями Т-ионов (марганца, железа, хрома, кобальта и др.) в кремнии с электронной структурой парамагнитных центров с помощью DLTS и ЭПР;

разработаны физико-химические аспекты и технология легирования кремния примесями переходных элементов (Т-ионов);

установлено, что эффективность формирования и развития дефектной структуры монокристаллического кремния, легированного примесями Т-ионов зависит от различных технологических факторов: термической предыстории и совершенства структуры кристалла, температуры отжига и скорости охлаждения после легирования, предварительных низко- и высокотемпературных обработок, а также от способа легирования кремния переходными элементами;

экспериментально определено, что примеси Т-ионов (Mn, Fe, Cr, Co), введенные в кремний, взаимодействуя с технологическими примесями (кислородом и углеродом), приводят к уменьшению концентрации оптически активного кислорода (от 10 до 50%) в зависимости от способа введения той или иной примеси;

методами емкостной спектроскопии, установлено, что предварительные термообработки монокристаллического кремния в интервале температур 450-550°C и 900-1200°C с различной длительностью приводят к интенсивной преципитации кислорода и образованию различных скоплений и выделений 2-ой фазы (частиц SiO₂ и SiO₄), размеры которых составляют 10-100 мкм;

методами рентгеновской топографии и электронной микроскопии обнаружена дополнительная фаза (силикат марганца) в образцах Si с примесями Т-ионов, которая для марганца представляет собой частицы неопределенной формы (размером ~500 Å) и большой плотности;

выявлено, что межпримесное взаимодействие Т-ионов со специально введенными электроактивными и пассивными примесями приводит к

локальному геттерированию неконтролируемых примесей из объема на поверхность кремния;

разработан способ повышения термической стабильности и радиационной стойкости путем введения примесей Т-ионов (Mn, Fe, Cr, Co) при определенных технологических режимах, препятствующих образованию термических и радиационных дефектов в кремнии и снижающих их эффективность на 0.5-1 порядок.

Практические результаты исследования: разработан способ пооперационного контроля дефектности структур на различных этапах технологического маршрута и установлено, что в процессе некоторых технологических операций возникает ряд термических и примесных дефектов. Найдены пути дезактивации различных неконтролируемых примесей в кремнии и снижения концентрации нежелательных дефектных центров путем введения нейтральных примесей типа редкоземельных элементов 5-6 раз.

Обнаружено эффективное геттерирование примесей Т-ионов в процессе диффузионного отжига примеси железа, нанесенной на поверхность Si, что приводит к повышению в образцах кремния значений времени жизни неосновных носителей заряда в объеме в 5-6 раз, что позволяет получить термически стабильные и радиационностойкие материалы и структуры на основе Si, тем самым повышает надежность и длительную работоспособность полупроводниковых приборов в различных условиях.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением методов нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней, фотоемкости, электронного парамагнитного резонанса, инфракрасной спектроскопии и автордиографии.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

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

Практическое значение результатов исследования заключается в разработке физико-химических аспектов и технологии легирования кремния примесями Т-ионов.

Внедрение результатов исследования. По результатам изучения процессов формирования и развития дефектной структуры монокристаллического кремния, легированного примесями Т-ионов:

разработанный способ пооперационного контроля дефектности структур на различных этапах технологического маршрута использован в АО «FOTON» Акционерной компании «Узэлтехсаноат» для резкого уменьшения неконтролируемых дефектов имеющих в симисторах М208 и диодах М32-63 (Справка № 02-1954 АК «Узэлтехсаноат» от 25 сентября 2017 года). Использование научных результатов позволило снизить концентрации нежелательных дефектных центров путем введения нейтральных примесей типа редкоземельных элементов в 5-6 раз;

результаты, полученные по эффективному геттерированию примеси железа примесями Т-ионов в процессе диффузионного отжига Si, приводящие к повышению в образцах кремния значений времени жизни неосновных носителей заряда в объеме в 5-6 раз, были использованы в АО «FOTON» Акционерной компании «Узэлтехсаноат» для получения термически стабильных и радиационностойких материалов и структур на основе Si (Справка № 02-1954 АК «Узэлтехсаноат» от 25 сентября 2017 года). Использование научных результатов позволило повысить термическую стабильность кремниевых диодов средней мощности на основе кремния легированного примесями Т-ионов;

разработанная технология получения термостабильных и радиационностойких материалов, а также технология создания в объеме кремния наноразмерных дефектов путем введения примесей Т-ионов использована при выполнении гранта А-3-73 «Яримўтказгичли материалларда кластерли киришма атомлари тақсимоти ва концентрациясини бошқариш курилмасини яратиш ва ишга тушириш» Ташкентского государственного технического университета для создания устройства управления концентрацией и распределением примесей атомов в кластерных полупроводниках (Справка № ФТА -01-02/690 Агентства по науке и технологиям от 20 сентября 2017 года). Использование научных результатов позволило эффективно управлять распределением и концентрацией кластеров примесных атомов в полупроводниках.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 20 международных и 7 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследований. По теме диссертации основное содержание изложено в 45 научных публикациях, в том числе в 18 научных статьях, опубликованных в журналах рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций (список в конце автореферата).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка опубликованных работ, содержит 46 рисунков, 3 таблицы, список использованной литературы из 145 наименований и изложена на 210 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, проведён обзор международных научных исследований по теме диссертации, показана степень изученности проблемы, сформулированы цель и задачи, 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 дана информация об объеме и структуре диссертации.

В первой главе **«Некоторые особенности дефектообразования в кремнии»** систематизированы параметры различных глубоких уровней, создаваемых примесями переходных элементов (ПЭ) в кремнии, представлены данные о поведении примесей ПЭ при их введении в кремний. Описаны основные направления, по которым проводились исследования поведения примесей с незавершенной d-оболочкой в кремнии, а также приведены сведения по изучению их взаимодействия с другими примесями в Si. Приведен также анализ современного состояния исследований по изучению влияния различных внешних факторов на свойства легированного кремния.

Детально изучено влияние предварительной термической обработки на развитие дефектной структуры кремния. В конце главы приведены результаты изучения дефектов в кремнии, легированном пассивными, электронейтральными примесями.

На основании выводов сформулирована постановка задачи диссертации.

Во второй главе **«Особенности нестационарной емкостной спектроскопии дефектов в присутствии глубоких центров в кремнии»** изложены основы нестационарной емкостной спектроскопии в кремнии при наличии глубоких уровней. Описана суть классического метода DLTS, основанного на измерении разности релаксационного сигнала в моменты времени t_1 и t_2 . Изложены методика измерения спектров DLTS в разных режимах и расчета спектров DLTS, полученных путем однократного и многократного сканирований.

Проанализировано влияние полосы глубоких уровней на форму пиков DLTS. Показано, что если в запрещенной зоне имеется полоса ГУ, то форма пика DLTS заметно отличается от классической. Степень искажения зависит от соотношения между шириной полосы и величиной kT . Чем больше ширина полосы по сравнению с kT , тем значительней искажения формы пика DLTS.

Описаны физико-химические аспекты и технология легирования кремния примесями переходных элементов (Т-ионов). Приведены технологические режимы, позволяющие получить легированные кристаллы с воспроизводимыми и стабильными параметрами.

Изложен разработанный способ пооперационного контроля дефектности структур на различных этапах технологического маршрута изготовления

кремниевых структур. Использование научных результатов позволило снизить концентрации нежелательных дефектных центров путем введения нейтральных примесей в 5-6 раз;

В третьей главе «Исследование процессов формирования дефектной структуры монокристаллического кремния, легированного примесями Т-ионов» приведены результаты исследований с помощью методов DLTS и ФЕ процессов дефектообразования в Si, легированном переходными элементами (Т-ионами).

Из комплексных исследований процессов дефектообразования в Si<Mn> с помощью методов DLTS (рис.1) установлено, что диффузионное введение Mn в Si приводит к образованию четырех ГУ с фиксированными энергиями ионизации $E_c - 0.13$ эВ, $E_c - 0.20$ эВ, $E_c - 0.42$ эВ, $E_c - 0.54$ эВ с сечениями захвата носителей заряда $\sigma_n = 7 \cdot 10^{-14}$ см², $6 \cdot 10^{-17}$ см², $7 \cdot 10^{-15}$ см², $3 \cdot 10^{-14}$ см², соответственно.

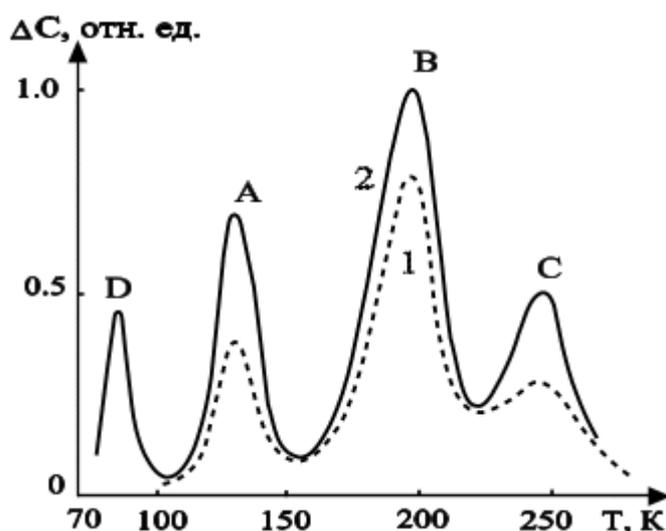


Рис.1. Спектры DLTS образцов n-Si<Mn> при $T_{\text{дифф}}, ^\circ\text{C}$: 1-1000, 2- 1250

На спектрах фотоемкости образцов n-Si<Mn> (рис.2) обнаружена релаксация емкости вблизи $h\nu \sim 0.20$ эВ, $h\nu \sim 0.42$ эВ и $h\nu \sim 0.54$ эВ. Анализ этих спектров показывает, что наблюдаемые релаксации обусловлены перезарядкой трех ГЦ: $E_c - 0.20$ эВ, $E_c - 0.42$ эВ и $E_c - 0.54$ эВ. На спектрах индуцированной ФЕ наблюдается одна ступенька вблизи $h\nu \sim 0.41$ эВ (рис.2, кривая 2). Анализ спектров DLTS и ФЕ показывает, что энергии термической и оптической активации обнаруженных уровней в образцах n-Si<Mn> совпадают в пределах ошибки измерений.

Показано, что эффективность образования ГУ в образцах Si<Mn> зависит от технологических режимов введения марганца: она увеличивается с ростом температуры диффузии и скорости охлаждения образцов после диффузии.

Показано, что эффективность образования ГУ в образцах Si<Mn> зависит от технологических режимов введения марганца: она увеличивается

с ростом температуры диффузии и скорости охлаждения образцов после диффузии.

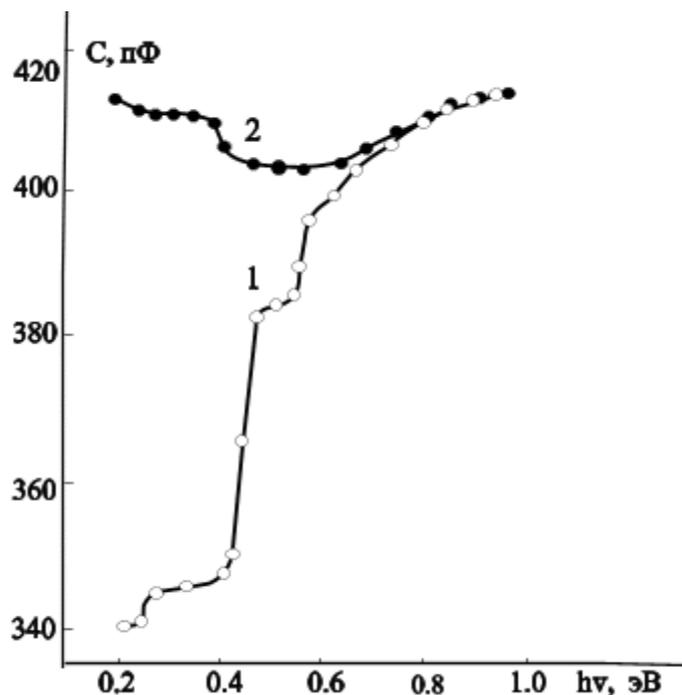


Рис.2. Спектры ФЭ (1) и ИФЭ (2) образцов n-Si<Mn>

На спектрах ЭПР образцов n-Si<Mn> обнаружены парамагнитные центры изолированных атомов Mn^{+} , Mn^0 и кластеров $(Mn^0)_4$. Проведена идентификация обнаруженных глубоких уровней, связанных с атомами марганца с парамагнитными центрами.

Исследованы процессы дефектообразования в Si, легированном Cr как путем диффузии, так и в процессе выращивания из расплава. Измерения спектров DLTS показали, что после диффузионного введения Cr в образцах

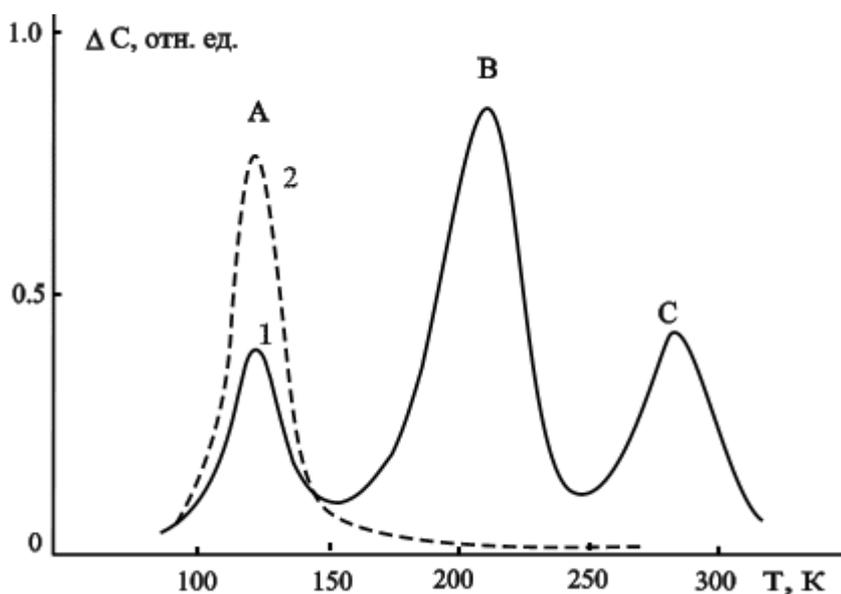


Рис.3. Спектры DLTS образцов n-Si<Cr>

n-Si<Cr> (рис.3) образуются глубокие уровни с фиксированными энергиями ионизации и сечениями захвата носителей заряда: $E_c-0.21$ эВ, $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-15}$ см², $E_c-0.41$ эВ, $\sigma_n = 6 \cdot 10^{-16}$ см² и $E_c-0.51$ эВ, $\sigma_n = 1 \cdot 10^{-16}$ см², а в образцах p-Si<Cr> наблюдаются ГУ $E_v+0.20$ эВ, $\sigma_p = 7 \cdot 10^{-15}$ см² и $E_v+0.41$ эВ, $\sigma_p = 3 \cdot 10^{-15}$ см². Глубокие же уровни $E_c-0.21$ эВ и $E_v+0.41$ эВ наблюдаются и в термообработанных образцах (без Cr), причем их концентрации в Si<Cr>_{диф} значительно ниже, то есть от технологических режимов ($T_{диф}$ и $V_{охл}$) зависит только эффективность образования уровней $E_c-0.41$ эВ, $E_c-0.51$ эВ и $E_v+0.20$ эВ: с ростом $T_{диф}$ и $V_{охл}$ их концентрации увеличиваются.

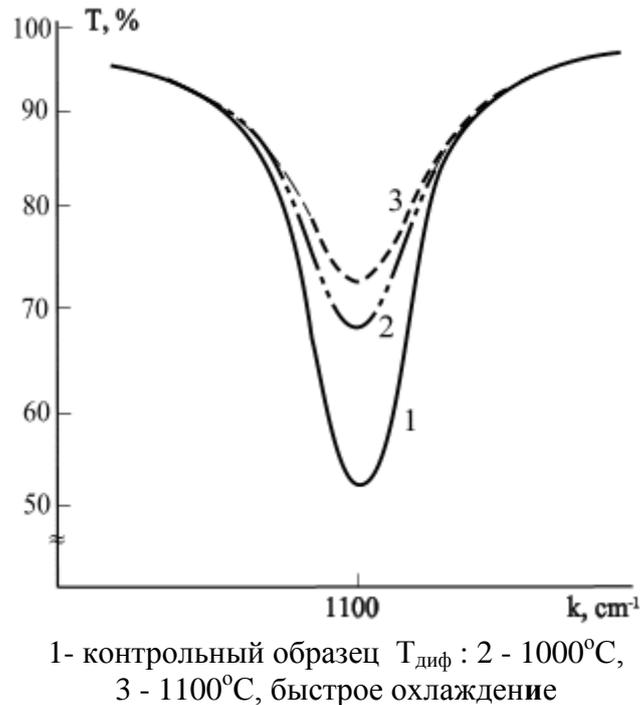


Рис.4. Спектры ИК-поглощения в образцах Si, диффузионно-легированного Cr

Измерения спектров ИК-поглощения образцов Si, диффузионно - легированного Cr (рис.4) показали, что присутствие атомов Cr, также как и других примесей Т-ионов, в объеме Si приводит к заметному уменьшению интенсивности кислородного пика поглощения, к уменьшению $N_0^{опт}$. При этом наблюдаемый эффект зависит от концентрации введенного Cr: чем больше N_{Ni} , тем больше уменьшение величины $N_0^{опт}$.

Таким образом, можно заключить, что при введении Cr в Si, вероятнее всего, образуются электронейтральные и оптически неактивные комплексы с участием атомов Cr и O.

Изучено поведение атомов кобальта, введенных в Si путем диффузии и установлено, что профиль распределения удельного сопротивления ρ в образцах Si<Co>, также как и других примесей Т-ионов, не описывается erf-функцией, а состоит из двух участков (рис.5). Вначале наблюдается резкий рост ρ на 1 порядок до глубины ~ 50 мкм, далее значение ρ стабилизируется и заметного изменения ρ с глубиной не наблюдается. Значения ρ в контрольных образцах с глубиной не изменялись.

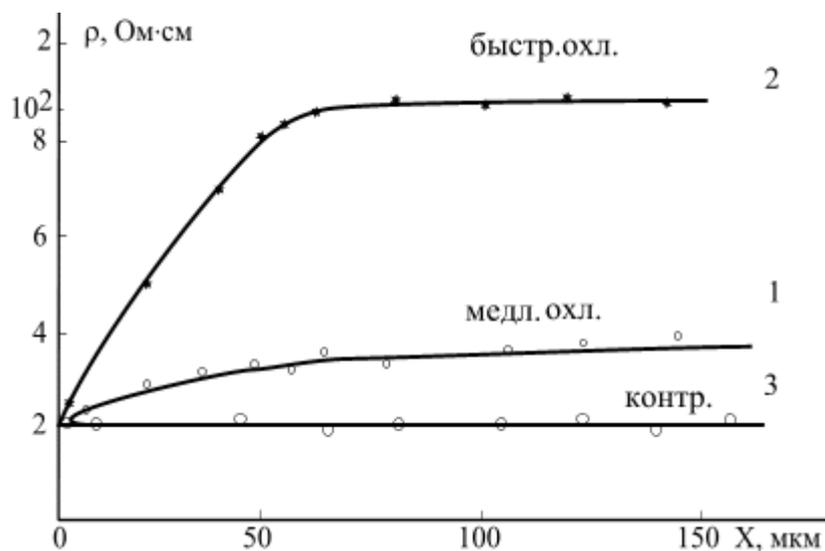


Рис.5. Зависимости распределения удельного сопротивления ρ по глубине в образцах Si<Co> (1,2) и контрольного образца Si (3)

Измерения с помощью емкостной спектроскопии показали, что в кремнии, легированном кобальтом (рис.6) образуются четыре ГУ с фиксированными энергиями ионизации $E_c - 0.20$ эВ, $E_c - 0.33$ эВ, $E_c - 0.45$ эВ и $E_c - 0.55$ эВ с сечениями захвата носителей заряда $\sigma_n = 4 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$, $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$, $\sigma_n = 1.1 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ и $\sigma_n = 1.5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ соответственно. Сопоставление полученных данных показало, что эффективность образования последних трех ГУ зависит от технологических факторов: температуры диффузии и скорости охлаждения образцов после диффузии. Из анализа спектров DLTS легированных и контрольных образцов установлено, что уровень $E_c - 0.20$ эВ, который наблюдается и в контрольных термообработанных (без Co) образцах, является термодфектом.

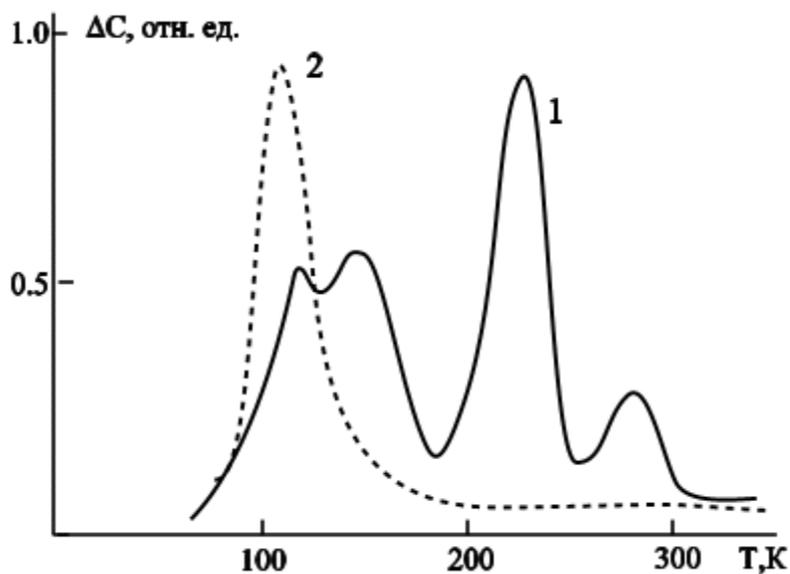


Рис. 6. Типичные спектры DLTS образцов n-Si<Co>(1), p-Si<Co> (2) и контр.образца (3)

В образцах p-Si<Co> наблюдается лишь один ГУ в нижней половине запрещенной зоны $E_v+0.32$ эВ с сечениями захвата носителей заряда $\sigma_p=2 \cdot 10^{16}$ см², соответственно.

Следует отметить, что в образцах Si, легированного примесями Т-ионов при выращивании, глубоких уровней не обнаружено, хотя по данным нейтронно-активационного анализа их полная концентрация в объеме Si довольно высокая.

Изучена кинетика низкотемпературного отжига (НТО) образцов кремния, легированного примесями марганца, хрома, кобальта и показано, что примеси Т-ионов обладают высокой миграционной способностью и поэтому параметры создаваемых ими глубоких центров (ГЦ) нестабильны. Изотермический отжиг ГЦ почти всех исследованных нами примесей Т-ионов происходит в две стадии (рис.7).

Известным методом сечений оценена энергия активации отжига глубоких уровней Т-ионов согласно выражению:

$$\ln \frac{t_1}{t_2} = \frac{E_{отж}}{K} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right), \text{ где } t_1 \text{ и } t_2 - \text{ времена, необходимые для уменьшения}$$

концентрации ГУ до определенного (одинакового) значения при температурах T_1 и T_2 ($T_1 < T_2$).

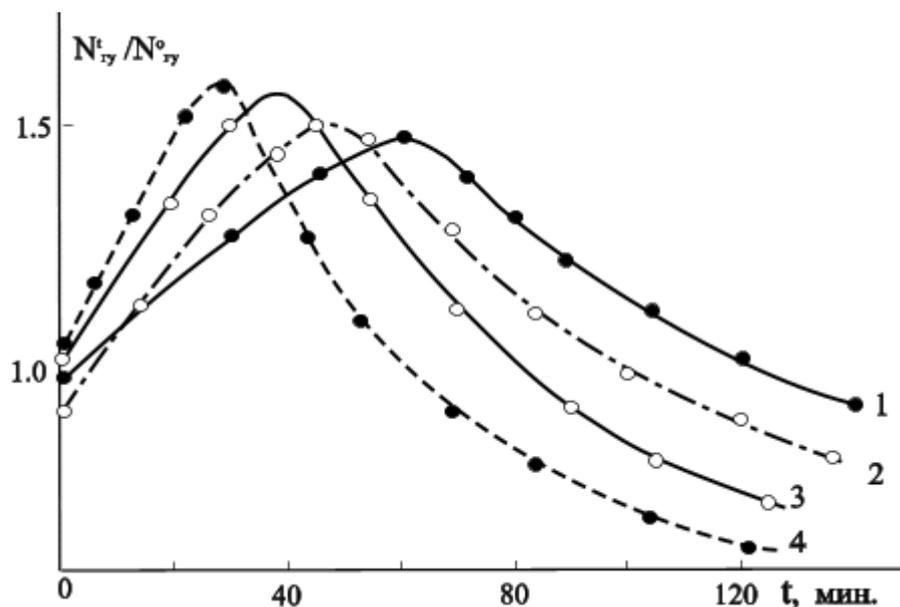


Рис.7. Кинетика низкотемпературного отжига уровней хрома в n-Si<Cr>

Расчеты показали, что энергия активации отжига уровня для ГУ марганца в кремнии $E_c-0.42$ эВ составляет 0.50 ± 0.02 эВ, а уровня $E_c-0.54$ эВ — 1.8 ± 0.02 эВ, а для уровней хрома $E_c-0.41$ эВ она составляет 0.55 ± 0.02 эВ, для $E_c-0.51$ эВ составляет 1.7 ± 0.02 эВ. Аналогичные значения имеют и другие примеси Т-ионов.

В четвертой главе «Исследование процессов развития дефектной структуры монокристаллического кремния, легированного примесями

Т-ионов» изучено влияние предварительных термических обработок на дефектную структуру исходного кремния, влияние высокотемпературных обработок (ВТО) на развитие дефектной структуры кремния с примесями Т-ионов.

Обнаружено, что различные высокотемпературные обработки приводят к изменению дефектной структуры монокристаллического кремния. Показано, что при этом происходит образование различных ассоциированных (связанных) состояний технологических примесей, например, атомов кислорода в кремнии. С целью изучения роли состояния технологических примесей в процессах дефектообразования и их влияния на энергетический спектр ГУ специальными термообработками были изготовлены образцы исходного кремния, содержащие диффузионные слои атомарного кислорода О, пленки SiO₂ на поверхности Si и частицы SiO₂ в объеме Si. Затем при определенных режимах такие образцы были легированы кобальтом, марганцем или хромом. Исследовано влияние различных выделений технологических примесей на энергетический спектр глубоких центров в кремнии.

Методами емкостной спектроскопии, установлено, что предварительные термообработки монокристаллического кремния в интервале температур 450-550°С и 900-1200°С с различной длительностью приводят к интенсивной преципитации кислорода и образованию различных скоплений и выделений 2-ой фазы (частиц SiO₂ и SiO₄), размеры которых составляют 10-100 мкм. Измерения и анализ спектров DLTS образцов с развитой дефектной структурой показали, что наличие различных связанных состояний кислорода и углерода – частиц SiO₂, SiO₄, CO_n и других различным образом влияет на эффективность образования глубоких уровней атомами никеля, марганца и хрома. Установлено, что наличие связанных состояний технологических примесей в кремнии, например, пленки SiO₂, препятствует введению в объем кремния примесей Т-ионов, присутствие же частиц SiO₂ в

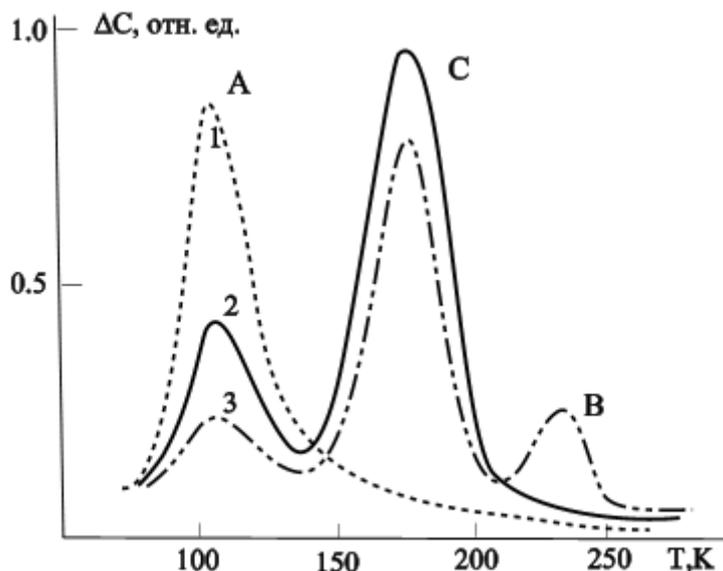


Рис.8. Спектры DLTS образцов n-Si<Mn> со связанными состояниями кислорода

решетке Si, напротив, увеличивает эффективность образования глубоких центров, создаваемых в запрещенной зоне полупроводника.

Измерения спектров DLTS и ИК-поглощения показали, что легирование кремния примесями Т-ионов приводит к уменьшению концентрации ГУ, связанных с Т-ионами (рис.8) и концентрации оптически активного кислорода $N_0^{\text{опт}}$ на 10-30% в зависимости от концентрации введенной примеси.

Это свидетельствует о взаимодействии примесей Т-ионов с атомами кислорода. Установлено также, что предварительная ВТО образцов Si при 1100°C в течение 12 часов приводит к преципитации кислорода с образованием частиц SiO₂. При этом $N_0^{\text{опт}}$ уменьшается на 45÷50%. Дополнительное введение атомов марганца, кобальта или хрома в кремний, предварительно термообработанный при 1100°C в течение 12 ч. приводит к уменьшению $N_0^{\text{опт}}$ на 8-10%. Это обусловлено особенностями взаимодействия атомов Т-ионов с частицами SiO₂. Структурные исследования показали, что в образцах кремния с примесями Т-ионов, прошедших предварительную ВТО, наблюдаются крупные скопления, состоящие из атомов специально введенных и технологических примесей.

Методами рентгеновской топографии и электронной микроскопии обнаружена дополнительная фаза (силикат марганца) в образцах Si с примесями Т-ионов, которая для марганца представляет собой частицы неопределенной формы (размером ~500 А) и большой плотности (рис.9).



Рис.9. Изображение частицы типа Mn-O в Si после диффузии Mn при 1200°C в течение двух часов.

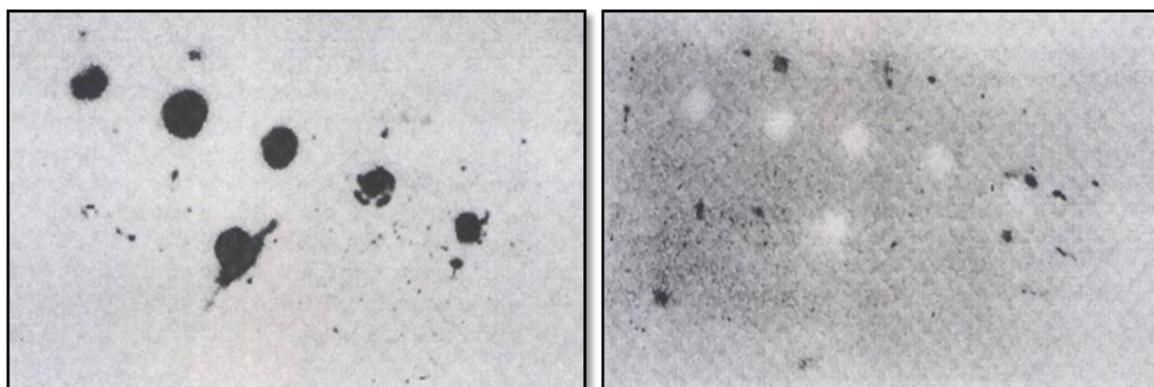
В пятой главе «**Влияние внешних факторов на развитие дефектной структуры кремния с примесями Т-ионов**» изучено межпримесное взаимодействие в кремнии со специально введенными электроактивными и электронейтральными примесями, а также влияние облучения, всестороннего сжатия и одноосной деформации.

Изучено также влияние атомов изовалентных примесей (ИВП)—германия и олова на развитие дефектной структуры кремния с примесями Т-ионов, (Mn, Co, Cr) с помощью емкостной спектроскопии. Измерения спектров DLTS в образцах Si<Ge> и Si<Sn> (до введения Т-ионов) показали, что в них не наблюдаются какие-либо ГУ в заметной концентрации, хотя

данные нейтронно-активационного анализа свидетельствуют о наличии атомов германия или олова в решетке кремния в довольно высоких концентрациях 10^{17} - 10^{19} см⁻³. Эти данные показывают, что атомы Ge и Sn не проявляют электрической активности в кремнии.

Обнаружено, что наличие атомов Ge или Sn в решетке Si оказывает существенное влияние на процессы дефектообразования: в присутствии ИВП увеличивается эффективность образования ГУ, связанных с примесями Т-ионов в Si. Показано, что присутствие атомов Ge или Sn в решетке Si препятствует образованию термических дефектов.

Обнаружено, что взаимодействие одной примеси с глубокими уровнями в кремнии со второй примесью с ГУ, диффундирующей из слоя на поверхности кремния, проявляется в эффекте геттерирования, приводящем к изменению полной концентрации и концентрации электрически-активных атомов. Геттерами для примеси никеля в кремнии являются слои Fe и Mn, для примеси железа - слои Co, Ni, Mn и Sn, а для примеси марганца - слои Au и Pt. Методом автордиографии с помощью нанесенных на участки поверхности кремния локальных слоев металлов выявлено, что межпримесное взаимодействие Т-ионов со специально введенными электроактивными и пассивными примесями приводит к локальному геттерированию неконтролируемых примесей из объема на поверхность кремния (рис.10, а и б).



а

б

Рис.10. Автордиограмма образца Si с примесью ⁵⁹Fe : локальное геттерирование Fe из Si слоем Sn после ВТО при 1200⁰С в течение 2 ч. (а) и тот же образец после удаления поверхностного слоя толщиной 10 мкм, иллюстрирующая локальную очистку Si от примеси Fe (б).

Установлено, что характер взаимодействия примесей с ГУ при диффузионном легировании ими Si зависит от последовательности введения: при легировании Si вначале Ni, а затем Mn полная концентрация Ni в объеме образцов уменьшается, а при обратном порядке введения (вначале вводится Mn, а затем Ni, полная концентрация никеля в объеме Si увеличивается).

Определены факторы, определяющие кинетику их образования: концентрация и фазовое состояние кислорода; последующая термообработка (НТО или ВТО); скорость охлаждения образцов.

При одновременном диффузионном введении Mn и Ni в Si концентрация преципитатов увеличивается, а их размер уменьшается. При последовательной диффузии вначале Mn, а затем Ni образовавшиеся комплексы Mn (силициды, силикаты), являясь центрами, способствующими дополнительной диффузии Ni, приводят к образованию крупных преципитатов. При диффузии в обратной последовательности образуются мелкие преципитаты, аналогичные дефектам, образующимся при легировании кремния только никелем.

ВТО образцов Si<Mn> и Si<Ni> приводит к укрупнению преципитатов за счет растворения и коагуляции мелких. Низкотемпературная обработка образцов Si<Mn> также приводит к возрастанию размера преципитатов и увеличению деформации решетки, а НТО образцов Si<Ni> не приводит к изменению размера преципитатов.

Изучены процессы радиационного дефектообразования в кремнии, легированном с примесями Т-ионов и установлено, что под влиянием облучения γ -квантами ^{60}Co и электронами (микротрон МТ-22С) образуются известные радиационные дефекты (А- и Е-центры). Присутствие примесей Т-ионов в объеме Si приводит к снижению эффективности образования, в зависимости от типа примеси, ее концентрации и способа введения в кремний, в 5-6 раз.

С помощью нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней исследованы остаточные эффекты в кремнии, легированном примесями Т-ионов и подвергнутом высокому гидростатическому давлению и одноосной деформации. Показано, что воздействие высокого гидростатического давления в интервале 5÷70 кбар приводит к остаточному изменению термической энергии активации E_t глубоких уровней, связанных с Mn, Co и Cr. Обнаружено, что одноосная деформация приводит лишь к снижению концентрации уровней Т-ионов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных комплексных исследований процессов дефектообразования в монокристаллическом кремнии с примесно-дефектными ассоциатами при взаимодействии атомов легирующих компонентов с несовершенствами кристаллической решетки и воздействию различных факторов сделаны следующие выводы:

1. Разработаны физико-химические аспекты и технология легирования кремния примесями переходных элементов (Т-ионов);

2. Обнаружено, что введение марганца, железа, хрома, кобальта приводит к образованию глубоких уровней с фиксированными энергиями ионизации и сечениями захвата носителей в верхней и нижней половине запрещенной зоны кремния;

3. Впервые проведена идентификация энергетического спектра глубоких уровней, создаваемых примесями Т-ионов (марганца, железа, хрома, кобальта и др.) в кремнии с электронной структурой парамагнитных центров с помощью DLTS и ЭПР;

4. Установлено, что эффективность формирования и развития дефектной структуры монокристаллического кремния, легированного примесями Т-ионов зависит от различных технологических факторов: термической предыстории и совершенства структуры кристалла, температуры отжига и скорости охлаждения после легирования, предварительных низко- и высокотемпературных обработок, а также от способа легирования кремния переходными элементами;

5. Экспериментально определено, что примеси Т-ионов (Mn, Fe, Cr, Co), введенные в кремний, взаимодействуя с технологическими примесями (кислородом и углеродом), приводят к уменьшению концентрации оптически активного кислорода (от 10 до 50%) в зависимости от способа введения той или иной примеси;

6. Методами емкостной спектроскопии, установлено, что предварительные термообработки монокристаллического кремния в интервале температур 450-550°C и 900-1200°C с различной длительностью приводят к интенсивной преципитации кислорода и образованию различных скоплений и выделений 2-ой фазы (частиц SiO₂ и SiO₄), размеры которых составляют 10-100 мкм. Установлено, что наличие связанных состояний технологических примесей в кремнии, например, пленки SiO₂, препятствует введению в объем кремния примесей Т-ионов, присутствие же частиц SiO₂ в решетке Si, напротив, увеличивает эффективность образования глубоких центров, создаваемых в запрещенной зоне полупроводника;

7. Методами рентгеновской топографии и электронной микроскопии обнаружена дополнительная фаза (силикат марганца) в образцах Si с примесями Т-ионов, которая для марганца при типичном режиме введения представляет собой частицы неопределенной формы (размером ~500 Å) и большой плотности. Аналогичные фазы обнаружены и для других примесей Т-ионов;

8. Выявлено, что межпримесное взаимодействие Т-ионов со специально введенными электроактивными и пассивными примесями приводит к локальному геттерированию неконтролируемых примесей из объема на поверхность кремния;

9. Установлено, что введение примесей Т-ионов (Mn, Fe, Cr, Co) при определенных технологических режимах препятствует образованию термических и радиационных дефектов в кремнии: их эффективность введения снижается на 0.5-1 порядок.

10. Разработан способ повышения термической стабильности и радиационной стойкости параметров путем введения примесей Т-ионов в определенных соотношениях;

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING OF THE SCIENTIFIC DEGREES
DSc.27.06.2017. FM/T. 34.01 AT PHYSICOTECHNICAL INSTITUTE,
INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES,
SAMARKAND STATE UNIVERSITY**

NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN

UTAMURADOVA SHARIFA BEKMURADOVNA

**THE PROCESS OF FORMATION AND DEVELOPMENT OF DEFECT
CENTERS IN SILICON, DOPED WITH IMPURITIES OF T-IONS**

01.04.10 – Physics of semiconductors

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

TASHKENT – 2017

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 B2017.1.DSc.FM.45

The dissertation has been prepared in National University of Uzbekistan

Abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English resume) on the website (fti-kengash.uz) and on Information and educational portal "ZiyoNet" (www.ziynet.uz).

Scientific consultant: **Abdurakhmanov Kahar Pattakhovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Official opponents: **Zainabidinov Sirozhiddin**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Bagraev Nikolay Taimurazovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Kamalov Amangeldi Bazarbaevich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Leading organisation: **Karakalpak state University**

Dissertation defense will take place "___" _____ 2017 at ___ at the meeting of Scientific council number DSc.27.06.2017. FM/T.34.01 at the Physicotechnical Institute, Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Samarkand State University. (Address: 100084, Uzbekistan, Tashkent, 2b, Bodomzor Yuli str., The administrative building of the Physicotechnical Institute, conference hall. Phone/Fax: (99871) 235-42-41; e-mail: lutp@uzsci.net.

With the dissertation is possible to review in the Information resource centre of the Physicotechnical Institute (registered under № ___). Address: 100084, Uzbekistan, Tashkent, 2b, Bodomzor Yuli str. Phone/Fax: (99871) 235-42-41.

Abstract of dissertation sent out « ___ » _____ 2017.
(meeting report № ___ on « ___ » _____ 2017).

S. L. Lutpullaev
Chairman of scientific council
on award of scientific degrees,
D.F.-M.S., professor

A. V. Karimov
Scientific secretary of scientific council
on award of scientific degrees,
D.F.-M.S., professor

S. A. Bakhrarov
Chairman of scientific seminar under scientific
council the award of scientific degrees,
D.F.-M.S., professor

INTRODUCTION (abstract of DSc thesis)

Topicality and necessity of the thesis. Currently, worldwide development and production of semiconductor devices and integrated circuits with a large number of elements per unit area of the material requires a significant increase in perfection of structure of silicon, the main material of semiconductor micro - and nanoelectronics and Photonics. In this aspect of the research aimed at studying the processes of formation and development of defect centers in silicon, doped with impurities of T-ions and the establishment of the managed ways to stabilize the parameters of semiconductor devices are one of the important issues. In the years of independence in the Republic special attention is paid to the development of semiconductor materials science, where it has achieved important results. The optimal regimes of alloying of silicon with some impurities with deep levels, leading to the formation of a new, unique properties of silicon, such as sensitivity to IR-radiation, the increase of the stress sensitivity etc. Studied phase transformations and silicidation in the near-surface region of silicon doped with various impurities and the formation of a number of silicides of one type or another, depending on technological regimes of the developed method of controlling the spectrum of radiation defects in silicon diffusion diodes in order to reduce recovery time reverse characteristics of the finished devices. Based on the "Strategy for the further development of the Republic of Uzbekistan" in the field of semiconductor micro - and optoelectronics is the most important development of methods of controlled all parameters of semiconductor materials and understanding of processes of defect formation in the monocrystalline silicon.

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 semiconductor physics and semiconductor material science conducted in research centers, institutes and leading universities, including

In Michigan (USA), Tokyo (Japan) universities and the technical University of Berlin (Germany) conducting research on the creation of optoelectronic devices based on silicon doped with transitional elements At the Zurich research center (Switzerland) and the University of applied Sciences, Fontys (the Netherlands) conducted research to obtain new semiconductor materials, physics of nanostructures is investigated in the Physico-technical Institute Saint Petersburg (Russia), the technology for producing structures of micro and nanoelectronics are engaged in NPP "Polus" (Russia).

As a result of the world's research on the production of materials doped with impurities of transition elements and study of their structures on the basis of a number of interesting scientific results, in particular the following is: at the

University of Tokyo (Japan) obtained silicon structures containing impurities of T-ions (Co, Ni, etc.); in the technical University of Berlin (Germany) investigated paramagnetic centers created by transition elements in silicon and held their identification with deep centers in Tashkent state technical University (Uzbekistan) the developed technology of formation of nanoclusters of atoms of manganese, germanium and Nickel in the lattice of silicon, Physical-technical Institute of scientific production Association "Physics-Sun" the technology of production of photosensitive multilayered structures based on gallium arsenide (Uzbekistan).

Problem development status. World practice shows that the technological treatments of semiconductor wafers in the manufacture of various structures and devices there are various interactions between defects, which are mainly determined by point defects, characterized by the maximum mobility in the lattice. Analysis and generalization of the results of research conducted abroad well-known experts in the field of physics of semiconductors and semiconductor nano- and microelectronics (H. Lemke, H. G. Grimmeiss, and K. Graff, H. Pieper, E. M. Omel'yanovskii, V. I. Fistul, Weber E. R.) show that experimental studies of optical, fluorescent, resonance and other properties of semiconductors with different deep levels, among which a special place is occupied by the impurities of transition elements in silicon, it is now possible to build some General models of deep centers, but these models are still not perfect.

Relevance of the dissertation research to the plans of scientific-research works. Dissertation research was conducted in the framework of research projects of National University of Uzbekistan on the topics:–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" (2007–2011y.); ITD-14-035 "Development of methods of increasing the stability of parameters of silicon MIS-structures" (2009-2011y.), ITD-4-43 "Development of technology of production of nanostructured silicides of refractory elements components silicon MIS structures" (2012-2014y.), A-3-116+A-4-30 "Development of technology for silicon and doped silicon diode structures with increased radiation resistance and ways to improve the photosensitivity of silicon solar cells" 2015-2017y.), OT-F2-11 "Study of regularities of formation of nanoscale defects in the surface layers and the volume of silicon with impurities of d-elements" (2017-2020y.).

The aim of research work is the study of processes of formation and development of the defect structure of monocrystalline silicon, doped by impurities T-ions, as well as defining the role of technology, rare earth and isovalent impurities in the formation of deep centers in silicon with impurities of T-ions. Study of the processes of defect formation in the monocrystalline silicon of the impurity-defect associates in the interaction of atoms of the alloying elements with imperfections of the crystal lattice and the influence of various factors.

Tasks of research work to determine the energy range of deep levels created by T-ions in the forbidden gap of silicon and to identify their electronic states;

to investigate the influence of technological factors on the efficiency of the formation of deep centers T-ions;

to study the interaction of the impurity T-ions with technological impurities (oxygen and carbon) in silicon using infrared spectroscopy;

to explore the physical processes of formation and development of the defect structure of monocrystalline silicon, doped with impurities of T-ions;

to study the effect of heat, radiation and pressure defects in the development of the defective structure of silicon with impurities of T-ions;

The object of research is silicon doped with impurities of transition elements (T-ions).

The subject of research – are the processes of formation and development of the defect structure of monocrystalline silicon, doped with impurities of T-ions.

Methods of the research: For the decision of tasks used the methods of nonstationary capacitance spectroscopy of deep levels (DLTS), photo capacity (FC), electron paramagnetic resonance (EPR), infrared spectroscopy and autoradiography.

Scientific novelty of the research work is found that the introduction of manganese, iron, chromium, cobalt leads to the formation of deep levels with fixed ionization energy and capture cross section of carriers in the upper half of the forbidden zone of silicon;

for the first time identified the energy spectrum of deep levels created by the impurity T-ions (manganese, iron, chromium, cobalt, etc.) in silicon with the electronic structure of paramagnetic centers with DLTS and EPR;

the efficiency of formation and development of the defect structure of monocrystalline silicon, doped with impurities of T-ions depends on various technological factors: thermal history and perfection of the crystal structure, annealing temperature and cooling rate after the alloying, pre-low and high temperature treatments, but also on the method of doping silicon transition elements;

experimentally determined that the impurities T ions (Mn, Fe, Cr, Co), introduced in silicon, interacting with technological impurities (oxygen and carbon), decrease of concentration optically active oxygen (from 10 to 50%) depending on the method of introduction of any impurities;

by x-ray topography and electron microscopy discovered an additional phase (silicate of manganese) in samples of Si with impurities of T-ions to manganese in the typical mode of introduction is a particle of indeterminate shape (size ~500 Å), and high density. The same phases were found for the other impurities T-ions;

it is revealed that the impurity-impurity interaction T-ions with specially designed electrically active and passive impurities leads to local gattererberg uncontrolled impurities from the bulk to the silicon surface;

it is established that the introduction of impurities T ions (Mn, Fe, Cr, Co) under certain process conditions prevents the formation of thermal and radiation defects in silicon: their effectiveness is reduced by the introduction of 0.5-1 order.

a method was developed to enhance the thermal stability and radiation resistance parameters by introducing impurities of T-ions in certain proportions;

Practical results of research work is developed method of operational control of defects in structures at various stages of the route and found that in the process some of the technological operations there are a number of thermal and impurity defects. The ways of decontamination of different uncontrolled impurities

in silicon and reduce the concentration of undesirable defect centers by introducing a neutral impurity a type of rare-earth elements 5-6 times.

Authenticity of the obtained results confirmed methods of nonstationary capacitance spectroscopy of deep levels, photoelastic, electron paramagnetic resonance, infrared spectroscopy and autoradiography.

Scientific and practical value of the research results. The scientific significance of the results of the study is to enhance understanding of the physical processes occurring in single-crystal silicon and silicon structures doped with impurities of transition elements;

developed physico-chemical aspects and technology of alloying the silicon with impurities of transition elements (T-ions).

Implementation of the research results. The results of studying the processes of formation and development of the defect structure of monocrystalline silicon, doped with impurities of T-ions:

the developed method of operational control of defects in structures at various stages of technological route used in JSC "FOTON" Joint-stock company "Uzeltehsanoat" (certificate No. 02-1954 AK "Uzeltehsanoat" dated September 25, 2017). Use of the research results allowed to reduce the concentration of undesirable defect centers by introducing a neutral impurity a type of rare earth elements in 5-6 times;

The results obtained for the effective gattererberg iron impurities impurities T-ions in the diffusion annealing process of Si, which leads to an increase in silicon samples values of the lifetime of minority charge carriers in the volume of 5-6 times, has been used in JSC "FOTON" Joint-stock company "Uzeltehsanoat" to obtain thermally stable and radiation-resistant materials and structures based on Si (certificate No. 02-1954 AK "Uzeltehsanoat" dated September 25, 2017).

developed a technology for producing thermally stable and radiation-resistant materials and the technology of creating in the volume of silicon nanoscale defects by introducing impurities T ions used in the performance of the grant A-3-73 "The establishment of a management concentration and distribution profile of atoms of cluster impurities in semiconductor materials" Tashkent state technical University (certificate No FTA -01-02/690 Agency for science and technology from 20 September 2017). The use of scientific results helped to effectively manage the distribution and concentration of clusters of impurity atoms in poluprovodnikakh.

Approbation of the research results. Results of the research work have been discussed at 27 international and republican scientific and practical conferences.

Publication of research results. On the topic of the thesis the main contents set out in 45 scientific publications, including 18 scientific articles published in journals recommended by the Higher attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of basic scientific results of doctoral theses (the list at the end of the abstract). Structure and volume of dissertation.

Structure and volume of dissertation. The thesis consists of introduction, five chapters, conclusions, list of published works contains more than 46 figures, 3 tables bibliography 145 titles and is contained in 210 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть, part I)

1. Витман Р.Ф., Гусева Н.Б., Лебедев А.А., Ситникова А.А. Утамурадова Ш.Б. Образование структурных дефектов в Si и влияния на этот процесс углерода и марганца. ЖТФ, 1988, т.58, в.11, с.2272-2274,

2. Лебедев А.А., Абдурахманов К.П., Утамурадова Ш.Б., Витман Р.Ф., Гусева Н.Б., Далиев Х.С. Влияние кислорода и углерода на поведение марганца в n-Si. ФТП, 1989, т.23, в.12, с.2227-2229.

3. Абдурахманов К.П., Утамурадова Ш.Б., Куликов Г.С., Лебедев А.А., Юсупова Ш.А. Исследование поведения примесей марганца и никеля при диффузионном легировании в кремнии. ФТП, 1991, т.25, в.6, с.1075-1078.

4. Abdurakhmanov K.P, Daliev Kh.S., Vitman R.F., Kulikov G.S, Lebedev A.A, Utamuradova Sh. B., Yusupova Sh. A. Local gettering of iron by a metal film evaporated on the surface of silicon. Semiconductors, 1993, v.27, в.7, pp.1222-1224.

5. Abdurakhmanov K.P, Vitman R.F, Kulikov G.S, Lebedev, A.A, Utamuradova Sh. B., Yusupova Sh. A. Manganese diffusion profiles in silicon with various oxygen concentrations. Publication: Semiconductors, Volume 28, Issue 1, January 1994, pp.52-54.

6. Мамадалимов А.Т., Утамурадова Ш.Б. Современные проблемы емкостной спектроскопии дефектов в полупроводниках. Вестник ТашГУ, Ташкент, 1997, N.1, с.54-61.

7. Абдурахманов К.П., Далиев Х.С., Олимбеков З.О. Исследование межпримесного взаимодействия в кремнии, легированном платиной и железом. Гелиотехника, 1998, N.2, с.91-93.

8. Утамурадова Ш.Б., Абдурахманов К.П., Далиев Х.С. О дефектообразовании в кремнии с примесями марганца и цинка. Гелиотехника, 1998, N.2, с.89-91.

9. K. P. Abdurakhmanov, Sh. B. Utamuradova, Kh. S. Daliev, S. G. Tadjy-Aglaeva and R. M. Ergashev Defect-formation processes in silicon doped with manganese and germanium. Semiconductors, 1998, v.32, в.6, pp.606-607.

10. Утамурадова Ш.Б., Мамадалимов А.Т. Изучение влияния термических обработок на поведение атомов гольмия в кремнии. ДАН РУз, 1998, № 6, с.16-19.

11. Утамурадова Ш.Б., Далиев Х.С., Бозорова О.А., Изучение межпримесного взаимодействия атомов гафния и железа в кремнии. Вестник университета, 2003, № 3, с.44-46.

12. Утамурадова Ш.Б. Дезактивация железа атомами тугоплавких элементов при их совместном введении в кремний. Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2009, Т. 9, № 2, с.174-176.

13. Утамурадова Ш.Б. Рахмонов Ж.С. Влияние облучения на свойства уровней циркония в кремнии. – Узбекский физический журнал, 2011, № 4, с.272-275.

14. Утамурадова Ш.Б. ИК-спектроскопия кремния, легированного германием при выращивании. ДАН РУз, 2010, №4, с.26-28.

15. Utamuradova Sh.B. Impurity-Impurity Interaction of Ferrum and Hafnium In Silicon. Science and World, International scientific journal, № 4 (44), 2017, Vol. I, p. 30-32.

16. Utamuradova Sh.B. On the Features of Formation of Irradiation Defects in Silicon with Holmium Impurity. Science and World, International scientific journal, № 4 (44), 2017, Vol. I, p. 29-31.

17. Утамурадова Ш.Б. Межпримесное взаимодействие в кремнии, легированном германием и хромом. Узб.физ.журн., Vol. 19 (№4), 2017, с. 12-13.

18. Utamuradova Sh.B. The interaction between impurities T-ion with the associated states of oxygen in silicon. World Journal of Engineering Research and Technology (WJERT), 2017, Vol. 5, Issue 9, p.145-150.

И бўлим (II часть, part II)

19. I.Kreissl, A.A.Lebedev, Утамурадова Ш.Б., EPR and electrical investigations of n-Si:Mn Proc. of 7th Intern. School “Defects in Crystals”, Ed.by E. Mizera, World Scientific Publ., Singapore, 1987, p.264-269.

20. Абдурахманов К.П. Далиев Х.С., Витман Р.Ф., Султанов Н.А. Кинетика распада в системе кремний - марганец и межпримесное взаимодействие в кремнии, легированном марганцем и цинком. В кн: «Свойства легированных полупроводниковых материалов», Москва, Россия, 1990, с.14-18.

21. Утамурадова Ш.Б. Влияние изовалентного легирования германием на поведение атомов хрома в кремнии. Естественные и технические науки РАН, 2009, № 1(39), с.31-33.

22. Утамурадова Ш.Б., Пардаев У.Я. Влияние атомов иттербия на радиационное дефектообразование в кремнии, облученном γ -квантами ^{60}Co . Естественные и технические науки РАН, 2009, №6(44), с.56-58.

23. Abdurakhmanov K.P., Utamuradova Sh.B., Daliev Kh.S., Ergashev R.M. Formation of Radiation Induced Defects in the Silicon Doped with Germanium and Stannum. Abstracts The Third International Conference "Modern Problems Of Nuclear Physics" Bukhara 23 - 27 August 1999, p.300.

24. Utamuradova Sh.B., Daliev Kh.S., Atabaev T.Sh. The features of thermal and radiative defect formation in silicon doped with holmium. The sixth international conference “Modern problems of nuclear physics” September 19-22, 2006, Tashkent, p.172-173.

25. Утамурадова Ш.Б. Структурные дефекты в кремнии с примесями олова и марганца. Сборник тезисов Международн. конф. «Неравновесн. процессы в полупроводн. и полупр. структурах», 2007 г., Ташкент, с.61-62.

26. Утамурадова Ш.Б. Влияние атомов марганца на процессы радиационного дефектообразования в Si<Ge>. Сборник тезисов Международн. конф. «Неравновесн. процессы в полупроводн. и полупр. структу-рах», 2007 г., Ташкент, с.115-116.

27. Утамурадова Ш.Б. Дезактивация железа атомами тугоплавких элементов при их совместном введении в кремний. Труды Междунар. научно-технич. конференции «INTERMATIC-2009», Москва, 2009 г., с.174-176.

28. Утамурадова Ш.Б. Взаимодействие примесей переходных элементов со связанными состояниями ростовых примесей в Si. Матер.2- Междунар. конф. «Неравновесн. процессы в п\п и п\п структурах», Ташкент, 2009, ноябрь, с. 79-81.

29. Утамурадова Ш.Б. Взаимодействие примесей Т-ионов с ассоциированными состояниями ростовых примесей в кремнии. Труды Междунар. Конф. «AMS-7, Санкт –Петербург, Россия, 2010 г., с.142.

30. Утамурадова Ш.Б. Остаточные релаксационные процессы в кремнии с примесями Т-ионов, подвергнутом гидростатическому давлению. Тезисы докл. XXII Междунар. конф. «Релаксационные явления в полупроводниках», г. Воронеж Россия, 2010 г., с.45.

31. Утамурадова Ш.Б. Релаксационные процессы в кремнии с примесями иттербия и железа. Тезисы докл. XXII Междунар. конф. «Релаксационные явления в полупроводниках», г. Воронеж Россия, 2010 г., с.46.

32. Утамурадова Ш.Б. Дефектообразование в кремнии с примесями Т-ионов и ассоциатами кислорода. Материалы Междунар. конф. «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» Ташкент, 2013 г. с.87 -89.

33. Утамурадова Ш.Б. Об особенностях образования радиационных дефектов в диодных структурах с примесями редкоземельных элементов. Республика илмий-амалий анжумани материаллари «Микроэлектроника, нанозарралар физикаси ва технологиялари», Андижон, 2015, 111-112 б.

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

35. Утамурадова Ш.Б. Исследование взаимодействия иттербия с технологическими примесями в кремнии с помощью ИК-спектроскопии. Матер. Конф. «Актуальные проблемы молек. спектроскопии в конденс. средах», Самарканд, 2016, с.175.

36. Утамурадова Ш.Б. Nonequilibrium processes in the bulk and at the interface between silicon MIS structures with an admixture of hafnium. Матер. конф. "Микро- и наноэлектронные специальные системы и технологии", Москва, май, 2016 г.

37. Утамурадова Ш.Б., Далиев Х.С., Далиев Ш.Х. Влияние больших доз облучения на свойства кремния с примесями РЗЭ. - 14 Междунар. научно-практ. конф. «Актуальные вопросы науки, технологии и производства» Россия, Санкт-Петербург, окт. 2015 г., с211-212.

38. Утамурадова Ш.Б., Каландаров Э.К., Далиев Ш.Х., Олимбеков З.О., Тураев З.З., Бекмуратов Б.Б., Тураев З. Об особенностях образования

радиационных дефектов в диодных структурах с примесями редкоземельных элементов. – тез. конф. «Актуальные проблемы физики полупроводников», Андижан, 2015.

39. Утамурадова Ш.Б., Далиев Ш.Х., Гафурова М.В., Адамбаев К., Бекмуратов М.Б., Казаков И. Особенности радиационного дефектообразования в Si<Er>, облученном γ -квантами ^{60}Co Труды респ. конф «Современные проблемы ядерной физики», Ташкент, 2015.

40. Далиев Х.С., Утамурадова Ш.Б., Адамбаев К., Далиев Ш.Х., Казаков И. Влияние термообработки на характеристики кремниевых фото-преобразователей. Матер.конф. «Актуальные проблемы физики полупроводников», Нукус, 2015., с.234-236.

41. Utamuradova Sh.B., Daliev Sh. Kh., Adambaev K., Kalandarov E.K., Khamidjanov I., Tadj-Aglaeva S.G., Olimbekov Z. O., Ravshanov J.R., TuraevZ., Shomukhamedova D. About the features of formation of radiation defects in the diode structures with impurities of rare earth elements. Proc.Int.Symp. «New Trends of Development Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements and Prospects», 10-11 November 2016, Tashkent, Uzbekistan, C.160-161.

42. Abdurakhmanov K.P., Utamuradova Sh.B. The process of formation and development defect structure of silicon with impurities of T-ions. Proc.Int.Symp. «New Trends of Development Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements and Prospects», 10-11 November 2016, Tashkent, Uzbekistan, C.176.

43. Утамурадова Ш.Б., Адамбаев К., Каландаров Э.К., Расулова Д.М., Зарифбаев Ж.Ш., Тураев З.З. О радиационных дефектах в кремниевых диодных структурах с примесями редкоземельных элементов. Матер. Респ.научн. конф. «Неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах», Ташкент. 1-2 февр, 2017 г., с70-71.

44. Утамурадова Ш.Б., Хакимжонов С. Влияние высокотемпературных обработок на свойства кремния, легированного гольмием. Матер. Международной конференции “Фундаментальные и прикладные вопросы физики”, Ташкент, 2017, с.29-30.

45. Sh.B.Utamuradova. About the Features of Formation of Radiation Defects in the Diode Structures with Impurities of Rare Earth Elements. XXIII International School-Seminar "Spectroscopy of Molecules and Crystals", 2017, in Kyiv, Ukraine, p.81.

Автореферат «Тил ва адабиёт таълими» журнали таҳририятида ўзбек, рус ва инглиз (резюме) тилларида таҳрирдан ўтказилди (23.10.2017 йил).

Босишга рухсат этилди: 03.11.2017 йил
Бичими 60x45 ¹/₈, «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табағи 3,4. Адади: 120. Буюртма: № 322.

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.