

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР  
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ, САМАРҚАНД ДАВЛАТ  
УНИВЕРСИТЕТИ ХУЗУРИДАГИ ИЛМий ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ  
DSc.27.06.2017.ҒМ/Т.34.01 РАҚАМЛИ ИЛМий КЕНГАШ**

---

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ**

**ДАЛИЕВ ШАХРУХ ХОЖАКБАРОВИЧ**

**КРЕМНИЙЛИ СТРУКТУРАЛАРНИНГ ЭЛЕКТРОФИЗИК  
ХУСУСИЯТЛАРИГА Zr, Ti ВА Hf КИРИШМАЛАРИНИНГ  
ТАЪСИРИ**

**01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси**

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)  
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2017**

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

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

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

<b>Далиев Шахрух Хожакбарович</b> Кремнийли структураларнинг электрофизик хусусиятларига Zr, Ti ва Hf кириндиларининг таъсири	3
<b>Далиев Шахрух Хожакбарович</b> Влияние примесей Zr, Ti и Hf на электрофизические свойства кремниевых структур	21
<b>Daliev Shakhrukh Khojakbarovich</b> The influence of impurities in Zr, Ti and Hf on electrophysical properties of silicon structures	39
<b>Эълон қилинган ишлар рўйхати</b> Список опубликованных работ List of published works	44

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

---

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ**

**ДАЛИЕВ ШАХРУХ ХОЖАКБАРОВИЧ**

**КРЕМНИЙЛИ СТРУКТУРАЛАРНИНГ ЭЛЕКТРОФИЗИК  
ХУСУСИЯТЛАРИГА Zr, Ti ВА Hf КИРИШМАЛАРИНИНГ  
ТАЪСИРИ**

**01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси**

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)  
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2017**

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2017.2. PhD/FM33 рақам билан рўйхатга олинган**

Диссертация Мирзо Улуғбек номидаги Ўзбекистон Миллий университетида бажарилган.

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

**Илмий раҳбар:**

**Мамадалимов Абдугафур Тишабаевич**  
физика-математика фанлари доктори, академик

**Расмий оппонентлар:**

**Камалов Амангелди Базарбаевич**  
физика-математика фанлари доктори

**Зикриллаев Нурулла Фатхуллаевич**  
физика-математика фанлари доктори, профессор

**Етакчи ташкилот:**

**Наманган давлат университети**

Диссертация ҳимояси Физика-техника институти, Ион-плазма ва лазер технологиялари институти, Самарқанд давлат университети ҳузуридаги 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, 26-уй. Тел./факс: (99871) 235-42-91, e-mail: [lutr@uzsci.net](mailto:lutr@uzsci.net), Физика-техника институти мажлислар зали).

Диссертация билан Физика-техника институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин ( \_\_\_\_\_ рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Бодомзор йўли кўчаси, 26-уй. Тел./факс: (99871) 235-42-91.

Диссертация автореферати 2017 йил «\_\_» \_\_\_\_\_ кунни 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 (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)**

**Диссертация мавзусининг зарурати ва долзарблиги.** Бугунги кунда жаҳонда қийин эрийдиган киришмаларни кремнийли структураларнинг электрофизик хусусиятларига таъсирини ва кремний асосидаги металл-диэлектрик-яримўтказгичли (МДЯ)-структураларнинг ташқи муҳит ҳамда радиацион нурланишларга чидамлилигини ошириш усуллари ишлаб чиқишга қаратилган тадқиқотлар олиб борилмоқда. Бунда тез ривожланаётган микро- ва оптоэлектрон яримўтказгичлар соҳасида яримўтказгичларда нуқсонлар марказларини ҳосил қилувчи киришмалар хусусиятларини тадқиқ этиш орқали наноструктурали қурилмалар яратиш муҳим вазифалардан бири бўлиб қолмоқда.

Мустақиллик йилларида амалий татбиққа эга бўлган долзарб илмий йўналишларга сезиларли даражада эътибор кучайтирилди, хусусан, физика соҳасида наноэлектроника қурилмалари учун яримўтказгичли материалларни ҳамда кўпқатламли структураларни олиш ва уларни чуқур сатҳли киришмалар билан легирлаш усуллари такомиллаштиришга алоҳида эътибор қаратилди. Кремний ва кремний структураларида кечувчи физик жараёнлар параметрлари барқарорлигини муқобиллаштириш усуллари такомиллаштиришда сезиларли натижаларга эришилди. Кремнийли структураларга ўтиш ва ноёб ер элементлар киришмаларини киритиш йўли билан уларнинг фотосезгирлиги янада оширилди, қатор киришмаларнинг энергетик спектрларини аниқлаш усуллари ишлаб чиқилди. Шу билан бир қаторда яримўтказгичлар ва яримўтказгичли структураларни ўрганиш бўйича кремнийнинг ва унинг асосидаги кўпқатламли структураларнинг босим, радиация ва қуёш нури каби ташқи таъсирларга муносабатини башорат қилиб берувчи физик асосларини яратишни тақозо этмоқда. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантиришнинг Ҳаракатлар стратегиясига кўра, илмий-тадқиқот ва инновация фаолиятини рағбатлантириш, илмий ва инновация ютуқларини амалиётга жорий этишнинг самарали механизмларини яратиш масалаларига алоҳида эътибор қаратиш, шу жихатдан яримўтказгичлар физикаси соҳасида ташқи таъсирларга чидамли кремний ва унинг асосидаги кўпқатламли структураларни олиш муҳим аҳамиятга эга.

Бугунги кунда жаҳонда замонавий электрониканинг базавий элементлари ҳисобланган металл-диэлектрик-яримўтказгич структуралар асосидаги микросхемалар ишчи параметрларининг барқарорлигини оширишга катта аҳамият берилмоқда. Жумладан қийин эрувчан элементлар билан легирланган яримўтказгичларнинг электрофизик хоссаларини ва киришмалар ҳосил қилган чуқур сатҳлари идентификациясини (қайд этишни) ўрганиш, қийин эрувчи элементлар (ҚЭЭ) атомларининг кремнийда термик ва радиацион нуқсонлар ҳосил бўлиши жараёнига таъсирини татқиқ этиш, ҚЭЭ атомларининг бошқариб бўлмайдиган технологик аралашмалар билан ҳамда

киришма атомлари ва яримўтказгичли структура нуқсонларининг ўзаро таъсирини аниқлаш муҳим вазифалардан 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-4997-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 II. «Физика, астрономия, энергетика ва машинасозлик» устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Шу кунга қадар олимлар ва ишлаб чиқарувчиларнинг эътибори кремнийда ва кремний структураларида кечувчи физик жараёнлар, шунингдек уларнинг параметрлари барқарорлигини муқобиллаштириш усулларини ишлаб чиқишга қаратилган, АҚШ ва Япония олимлари А.Милнес, D.J.Struthers, E.R.Weber, Y.Tokumari лар томонидан фотосезгирликни ошириш учун кремнийнинг чегаравий қатламларида ноанъанавий аралашмалар (Ti, Ni, Gd, Sm ва б.) билан кичик концентрацияларда, кейинчалик уни термик оксидлаш ва (Al,Cu,W) металл электродларини жойлаштириш билан, легирлаш жараёни ишлатилган.

Россиялик олимлар А.А.Лебедев, Л.С.Берман, В.И.Фистуллар томонидан кремнийда ҳар хил чуқур сатҳли аралашмаларнинг ҳолати ўрганилган ва ушбу сатҳларнинг энергетик спектрлари аниқланган. Академиклар М.С.Саидов, Р.А.Муминов, А.Т.Мамадалимов ва бошқа Ўзбекистонлик олимлар ҳам яримўтказгичлар ва яримўтказгичли структуралардаги локал марказлар физикасини ривожлантиришга қаратилган илмий изланишларда ўзларининг муносиб ҳиссаларини қўшганлар. Компенсацияловчи киришмалар билан легирланган яримўказгичларнинг хоссалари М.К.Бахадирханов ва С.З.Зайнабидиновлар томонидан ўрганилган.

К.П.Абдурахмонов ва бошқалар томонидан ҳар хил киришмалар билан легирланган кремнийдаги дефект ҳосил бўлиш жараёнлари ўрганилган ва қатор киришмаларнинг энергетик спектрлари аниқланган. С.И.Власов томонидан кремний структураларининг фазалараро чегараларида юз берувчи физик жараёнлар ўрганилиб, бўлинишнинг яширин чегараси хоссаларини яримўтказгич ва диэлектрикнинг ҳажмий хоссаларидан фарқловчи асосий фактор, яримўтказгичнинг таъқиқланган соҳасидаги энергетик сатҳларни ҳосил қилувчи сиртий электрон ҳолатларнинг борлиги исботлаб берилган.

**Тадқиқотнинг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация иши Ўзбекистон Миллий университетининг ФМ-2-038 рақамли «Қийин эрувчи элементлар билан легирланган, кремний асосидаги, металл-диэлектрик-яримўтказгич типигаги кўпқатламли структураларнинг бўлиниш чегарасидаги ва ҳажмидаги физик жараёнларни тадқиқ қилиш» (2007-2008 йй.); ОТ–Ф2-081 рақамли «Кремнийнинг аралашмали-нуқсонли ассоциат монокристалларида нуқсон ҳосил бўлиши қонуниятларини ва яримўтказгич-диэлектрик бўлиниш чегараларида яширин чегаралар пайдо бўлишининг динамик жараёнларини ўрганиш» (2007–2011 йй.); ЁФ-2-08 рақамли «Ноёб ер элементлар киридилари билан легирланган кремний ва кремнийли кўпқатламли структуралардаги нуқсон ҳосил бўлишига ва термик ишловига радиациянинг таъсирини ўрганиш» (2010-2011 йй.) ва ЁФ-2-13 рақамли «Кремний структураларининг электрофизик хоссаларига титан кичик гуруҳи киридиларининг таъсирини ўрганиш» (2016-2017 йй.) мавзусидаги лойиҳалар доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** сиғимли спектроскопия ёрдамида қийин эрувчи Zr, Ti ва Hf атомлари билан легирланган кремнийнинг электрофизик хоссалари ва ушбу элементлар атомларининг кремний таркибидаги аралашмалар билан ўзаро таъсирини, ҳамда кремний асосидаги металл-диэлектрик-яримўтказгич (МДЯ) структураларнинг хоссаларига таъсирини аниқлашдан иборат.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

қийин эрувчи элементлар – Zr, Ti ва Hf билан легирланган кремний намуналарининг электрофизик хоссаларини диффузион йўл ва эритмадан ўстириш жараёнида тадқиқ қилиш;

Zr, Ti ва Hf киришмалари ҳосил қиладиган чуқур сатҳларни идентификация қилиш ва уларнинг энергетик спектрларини аниқлаш;

қийин эрувчи элементлар атомларининг кремнийдаги термик нуқсонлар ҳосил бўлиши жараёнларига таъсирини ўрганиш;

Zr, Ti ва Hf атомларининг  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -квантлари билан нурлантирилган кремнийдаги радиацион нуқсонлар ҳосил бўлишига таъсирини ўрганиш;

қийин эрувчи элементлар атомларининг кремнийдаги технологик киришмалари - кислород ва углерод билан, шунингдек, қўшимча киритилган электрофаол ва электронейтрал киришмалари билан ўзаро таъсирини тадқиқ қилиш;

қийин эрувчи элементлар атомларининг металл-диэлектрик-яримўтказгич типигаги кремнийли структуралари параметрларига таъсирини ўрганиш.

**Тадқиқотнинг объекти** Zr, Ti ва Hf билан легирланган Si, МДЯ-структуралардан иборат.

**Тадқиқотнинг предмети:** Zr, Ti ва Hf билан легирланган кремнийнинг DLTS ва ФС спектрлари; қийин эрувчи элементлар киришмаларининг назорат қилинмайдиган киришмалар билан ўзаро таъсирлари; шунингдек,

МДЯ-структураларда қийин эрувчи элементлар киришдилари билан кечадиган физик жараёнлардан иборат.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Тадқиқотларни амалга оширишда ностационар сигимли чуқур сатҳлар спектроскопияси (DLTS), фотосигими (ФС) ва инфрақизил (ИК) ютилиши усуллари қўлланилди.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

кремнийда Zr, Ti ва Hf атомлари сатҳларининг ҳосил қилиш самарадорлиги технологик режимга (ҳарорат ва диффузия вақти, шунингдек, намуналарнинг диффузиядан кейинги совутиш тезлиги) боғлиқлиги аниқланган;

қийин эрувчи элементлар киришмалари билан ўстириш жараёнида легирланган кремнийда чуқур сатҳлар ҳосил бўлмаслиги, лекин  $1000\div 1250^\circ\text{C}$  даража оралиғидаги ҳароратли қайта ишлов натижасида Zr, Ti ва Hf атомларининг фаоллашуви ва чуқур сатҳларнинг ҳосил бўлиши кўрсатилган;

қийин эрувчи элементлар киришмаларининг диффузион киритиш жараёнида термик ва радиацион нуқсонларнинг камайиши ва кремний параметрларининг барқарорлашуви исботланган;

кремний панжарасида нодир ер элементлари (лантан ёки эрбий) киришмаларининг мавжудлиги, қўшимча киритилган Zr, Ti ва Hf билан боғлиқ чуқур сатҳлар ҳосил бўлиш самарадорлигини ошириши илк бор кўрсатилган;

металл-диэлектрик-яримўтказгич структураларнинг кремний таглиги ҳажмидаги Zr, Ti ва Hf киришмалар таъсирида юқори частотали вольт-фарада характеристикаларининг назорат намуналарига нисбатан манфий томонга силжиши МДЯ-структураларни юза ҳолатларининг зичлиги ошишига ва Si-SiO<sub>2</sub> бўлиниш чегарасида мусбат заряд ҳосил бўлишига олиб келиши аниқланган;

қийин эрувчи элементлар киришмалари таъсирида кремнийли МДЯ-структураларнинг яримўтказгич соҳасининг таъқиқланган зонасининг кенглиги  $E_g$  бўйича юзавий ҳолатлари зичлигининг  $N_{ss}$  тақсимоти ўзгаришига олиб келиши кузатилган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

кремнийли МДЯ-структураларни ҳажмини ва юзавий сатҳларини Zr, Ti ва Hf киришмалари билан легирлаш технологияси ва МДЯ-структуралар параметрларини қийин эрувчи элементлари киришмаларини киритиш йўли билан оптималлаштириш шартлари ишлаб чиқилган;

кремнийли МДЯ-структуралар параметрларининг термик барқарорлигини ва радиацион чидамлилигини қийин эрувчи элементлари киришмаларини киритиш йўли билан амалга ошириш усуллари ишлаб чиқилган.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** юқори сезгирликка ва ажратиш қобилиятига эга бўлган тажрибавий услубларнинг қўлланилганлиги, шунингдек, турли усулларда олинган натижаларнинг яхши мос келиши билан асосланади.

### **Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.**

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти ноёб элементлар киритилган яримўтказгичларнинг янги хусусиятларини тушунтириб бериш имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундаки, кремний параметрларининг термик барқарорлигини ва радиацион чидамлилигини қийин эрувчи элементлар киришмаларини киритиш йўли билан ошириш

бўйича олинган натижаларидан турли яримўтказгичли асбоблар ишлаб чиқаришда фойдаланиш мумкин.

Тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш. Қийин эрувчи элементлари билан легирланган кремний ва кремнийли структураларда нуқсонлар ҳосил бўлиш жараёнларини ўрганиш асосида:

силицид титан-кремний тизими асосидаги ишчи соҳаси билан модифицирланган структурани ҳосил қилиш усули «FOTON» акционерлик жамиятида диод структурларига омик контакт олишда фойдаланилган («Ўзэлтехсаноат» акциядорлик компаниясининг 2017 йил 25 сентябрдаги 02-1953-сон маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланиши кремний асосидаги диод структураларига кичик кетма-кет қаршиликли контакт соҳаларини олиш имконини берган;

кремнийли МДЯ-структуралари ҳажмини ва юзавий қатламларини қийин эрувчи элементлар (Zr, Ti ва Hf) киришмалари билан легирлаш технологияси ёрдамида олинган натижалар ФА-ФЗ-Ф003 рақамли «Компенсирланган кремний датчиги асосида озик-овқат сақланадиган омбор температурасини ва намлигини узоқ масофадан назорат қилиб турадиган қурилмани яратиш» ва А-3-57 рақамли «Наноструктурали кремний датчик асосида турли хил объектларда ҳарорат ва намликни назорат қилувчи микропроцессорли асбобни ишлаб чиқиш» мавзусидаги лойиҳаларда ҳарорат ва намликни назорат қилувчи қурилма яратишда ишлатилган (Фан ва технологиялар агентлигининг 2017 йил 20 сентябрдаги ФТА-01-02/691-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш компенсирланган кремний асосидаги датчиклар параметрларининг иссиқликка бардошлилигини ошириш имконини берган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Диссертация ишининг асосий натижалари 10 та халқаро ва 8 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши.** Диссертация мавзуси бўйича 33 та илмий иш, жумладан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 9 та мақола нашр этилган.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг ҳажми 37 та расм ва 3 та жадвални ўз ичига олган ҳолда 128 бетни ташкил этади.

## ДИССЕРТАЦИЯ ИШИНING АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация иши мавзусининг долзарблиги асослаб берилган, ишнинг мақсад ва вазибалари баён қилинган, ишнинг илмий янгилиги ва амалий аҳамияти кўрсатилган ҳамда химояга олиб чиқиладиган асосий қоидалар келтирилган.

Биринчи **“Кремнийда ва кремнийли структураларда нуқсон ҳосил бўлиш жараёнларининг хусусиятларини таҳлил қилиш”** номли бобда қийин эрувчи ва нодир ер элементлари киришмалари бўлган кремнийнинг электрофизик хусусиятларини тадқиқ қилиш бўйича ишларнинг натижалари келтирилган. Қийин эрувчи элементлар билан легирланган кремний хусусиятларининг ўстириш жараёнларидаги таҳлили ҳам, диффузион усулдаги таҳлили ҳам келтирилган. Қийин эрувчи элементлар билан легирланган кремнийнинг хусусиятларига кислород ва углерод каби технологик кириндиларнинг таъсири қараб чиқилган. Қийин эрувчи элементлар ва нодир ер элементлари кириндиларига эга кремнийга термоишлов бериш ва нурлантиришни унинг электрофизик хусусиятларига таъсири, шунингдек турли миқдордаги кислородга эга бўлган кремнийда структуравий нуқсонларни тадқиқ қилиш бўйича маълумотлар таҳлил қилинган.

Металл-диэлектрик-яримўтказгич типидagi кремнийли структуралар ва Шоттки диодларидаги турлича нуқсонларнинг ҳолатини ўрганиш бўйича ишларнинг таҳлили келтирилган, шунингдек яримўтказгичлар ва яримўтказгич структуралардаги нуқсонларнинг сиғим спектроскопияси хусусиятлари тавсифланган. Р-п ўтишнинг сиғими ҳамда чуқур сатҳларни температуранинг ўзгариши билан қайта зарядланиши қараб чиқилган ҳамда ўзгармас сиғим режимидаги DLTS усулнинг моҳияти баён қилинган бўлиб, у  $t_f$  давомийликка ва  $U_f$  амплитудали тўлдириш импульсининг тугаганидан кейинги вақтнинг  $t_1$  ва  $t_2$  вақтларида структурадаги кучланишлар фарқининг температуравий боғланишини ўлчашдан иборатдир.

Кремнийдаги кислород ва углероднинг концентрациясини аниқлаш учун икки нурли схемада спектрнинг 1200 дан 400  $\text{см}^{-1}$  инфрақизил (ИК) - соҳасида ишлайдиган SPECORD – 72-IR инфрақизил спектрофотометри ёрдамида ИҚ-ютилиш спектрларини ўлчаш методикаси баён қилинган.

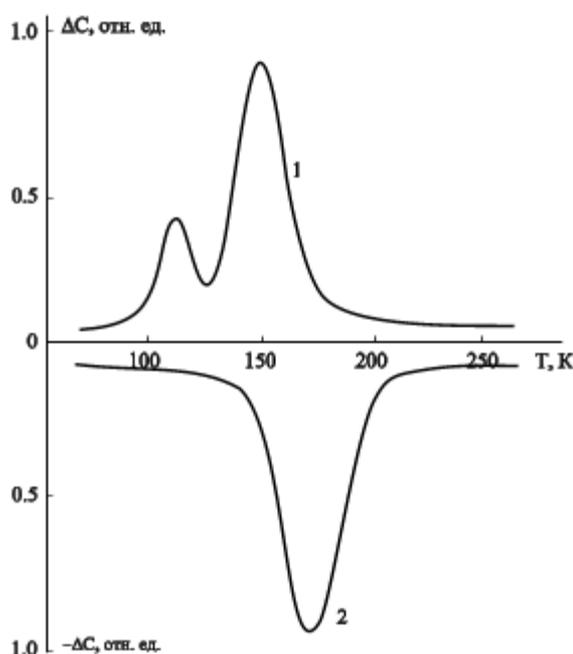
Бобнинг сўнгида диод структураларнинг тайёрлаш ва уларга термик ишлов беришни ўтказишнинг технологияси батафсил тавсифланган. Кремнийни Zr, Ti ва Hf қийин эрувчи элементлар билан легирлаш технологияси батафсил баён қилинган.

**“Титан кичик гуруҳидаги кириндиларни кремнийнинг электрофизик хусусиятларига таъсири”** номли иккинчи бобда қийин эрувчи элементларнинг кремнийнинг хусусиятларига таъсирини тадқиқ қилишга бағишланган. Ушбу бобда Zr, Ti ва Hf - қийин эрувчи элементлар билан легирланган кремнийда нуқсон ҳосил бўлиш жараёнларини, шунингдек кремнийда гафний ва лантан мисолида нодир ер элементлари ва

технологик киришмалар атомларининг киришмалараро ўзаро таъсирини ўрганиш, кремнийдаги қийин эрувчи ва нодир ер элементларнинг хусусиятларига термик ишлов беришнинг таъсирини текширишнинг комплекс тадқиқотлари натижалари келтирилган.

Zr, Ti ва Hf киришмалари билан легирланган кремнийни 50 соат мобайнида  $1200^{\circ}\text{C}$  да диффузия усули билан легирлаш шуни кўрсатдики, барча тадқиқ қилинган диодларда вольт-фарад характеристикалардан (ВФХ) аниқланган  $1/C^2 = f(V_{\text{обр}})$  боғланишлар чизикли бўлиб, бу Zr, Ti ва Hf ларнинг яримўтказгич ҳажмида текис тақсимланганлигини кўрсатади.  $300\text{ K}$  да  $1/C^2 = f(V_{\text{обр}})$  дан аниқланган, ионлашган марказларнинг ҳажмий заряд қатламидаги концентрацияси n-турдаги кремнийдан тайёрланган диодларда ҳам, шунингдек Zr, Ti ва Hf киришмали p-турдаги кремнийдан тайёрланган диодларда ҳам дастлабки кремнийдаги акцепторлар концентрацияси билан мос келади.

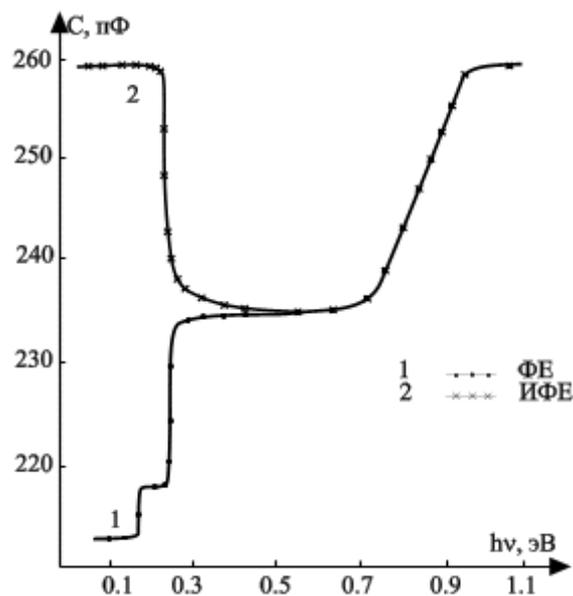
Кремнийдаги нуқсонларнинг энергетик спектри титан мисолида кўриб чиқилган. DLTS спектридан келиб чиқадики, n-Si<Ti> намуналарида  $T_M=120\text{K}$  ва  $T_M=150\text{K}$  да максимумларга эга иккита чўкки (1-расм, 1- эгри чизик) кузатилади. DLTS спектрларини Аррениус боғланишида қайта ҳисоб-китоб қилиш чуқур сатҳларнинг бу чўкқиларнинг  $E_c-0.20\text{ эВ}$ ,  $E_c-0.27\text{ эВ}$  га тенг ионизация энергияси билан қайта зарядланиши билан боғлиқлигини кўрсатади. p-Si<Ti> намуналарида  $E_v+0.30\text{ эВ}$  га тенг ионизация энергиясига тенг ва  $\sigma_n=2.10^{-17}\text{ см}^2$  - кавакларнинг қамраб олиш кесимига эга фақат биттагина чуқур сатҳ аниқланди.



**1-расм. n-Si<Ti> (1) ва p-Si<Ti> (2) намуналарининг DLTS спектри**

Натижаларнинг таҳлили кўрсатадики,  $E_v+0.30\text{ эВ}$  чуқур сатҳларнинг ҳосил бўлиш самарадорлиги  $T_{\text{диф}}$  ва  $\vartheta_{\text{сов}}$  га боғлиқ. Шунингдек титан электрофаол атомларининг DLTS спектрларидан аниқланган концентрацияси

хам  $T_{\text{диф}}$  га боғлиқлиги аниқланди. Сигим спектроскопияси ва нейтрон-активацион таҳлил усули билан олинган маълумотларнинг таҳлили шуни кўрсатадики, кремнийга диффузия йўли билан киритилган титан атомларининг ҳаммаси ҳам электр жихатидан фаолликни кўрсатмайди, Si ҳажмидаги титаннинг фақатгина 20% га яқини электрофаол бўлади. Титаннинг ўзини бундай тутиши кремнийдаги бошқа ўтиш элементларининг ўзини тутишига ўхшайди. Биз кремнийга ўстириш жараёнида ( $\text{Si}\langle\text{Ti}\rangle_{\text{ўст}}$ ) эритмадан киритилган Ti атомларининг ҳолатини ҳам ўргандик. Тадқиқ қилинган намуналар n-турдаги ўтказувчанликка ва  $\rho \approx 20\text{--}100$  Ом·см га эга эди.  $\text{Si}\langle\text{Ti}\rangle_{\text{ўст}}$  намуналарининг DLTS спектрларининг таҳлилидан аниқланган чуқур сатҳларнинг параметрлари диффузион-легирланган n- $\text{Si}\langle\text{Ti}\rangle_{\text{диф}}$  намуналаридаги чуқур сатҳларнинг параметрларига ўхшашлиги аниқланди. Фотосигим (ФС) спектрларининг ўлчашларидан n- $\text{Si}\langle\text{Ti}\rangle$  намуналаридаги титаннинг сатҳларини идентификацияси ўтказилди. n- $\text{Si}\langle\text{Ti}\rangle$  дан қилинган диоднинг типик фотосигим спектри (2-расм) турли катталиқдаги иккита поғонадан иборат. Бу титаннинг  $E_c - 0.20$  эВ,  $E_c - 0.27$  эВ га тенг фиксирланган ионизация энергиясига эга иккита чуқур сатҳнинг ҳосил қилишини кўрсатади



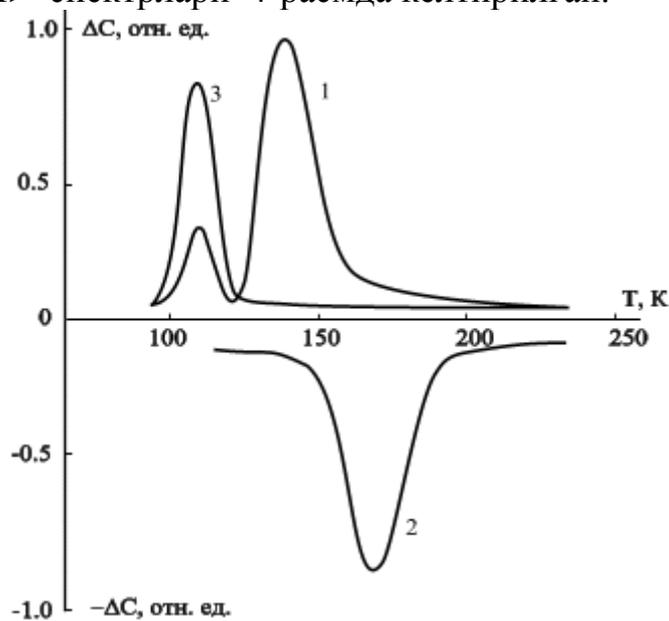
2-расм. n- $\text{Si}\langle\text{Ti}\rangle$  асосидаги диодларнинг ФС ва ИФС спектрлари

ва  $h\nu > 0.6$  эВ соҳада сигимнинг охиста ортиши рўй беради. Худди шундай термик ишловдан ўтган n-Si (Ti сиз) назорат намуналарида фақат термик ишлов нуқсонлари учун характерли бўлган  $E_c - 0.20$  эВ сатҳлар топилди, уларнинг концентрацияси  $N_{\text{гy}} = 10^{12}$  см<sup>3</sup> тартибда эди.

Чуқур марказларнинг ҳосил бўлиш жараёнлари гафний билан диффузион-легирланган намуналарда ҳам ўрганилди. 3-расмда n- $\text{Si}\langle\text{Hf}\rangle$  намуналарининг типик DLTS спектрлари келтирилган.

DLTS спектрларини ҳисоб-китоб қилиш шуни кўрсатадики, n- $\text{Si}\langle\text{Hf}\rangle$  намуналарида  $E_c - 0.20$  эВ ва  $E_c - 0.28$  эВ га тенг ионизация энергиясига эга иккита чуқур сатҳ ҳосил бўлади. p- $\text{Si}\langle\text{Hf}\rangle$  намуналарида  $E_v + 0.35$  эВ га тенг

ионизация энергиясига эга битта чуқур сатҳ аниқланди. DLTS спектрларининг таҳлили  $E_c-0.28$  эВ ва  $E_v+0.35$  эВ га тенг ионизация энергиясига эга иккита чўққи кремнийдаги Hf атомлари билан боғлиқлигини кўрсатди. Фотосиғим спектрларида  $E_c-0.20$  эВ ва  $E_c-0.26$  эВ га тенг ионизация энергиясига эга иккита чўққи, индуцирланган фотосиғим спектрларида эса  $E_v+0.34$  эВ га тенг ионизация энергиясига эга фақат битта чўққи кузатилади. n-Si<Hf> ва p-Si<Hf> спектрлари 4-расмда келтирилган.

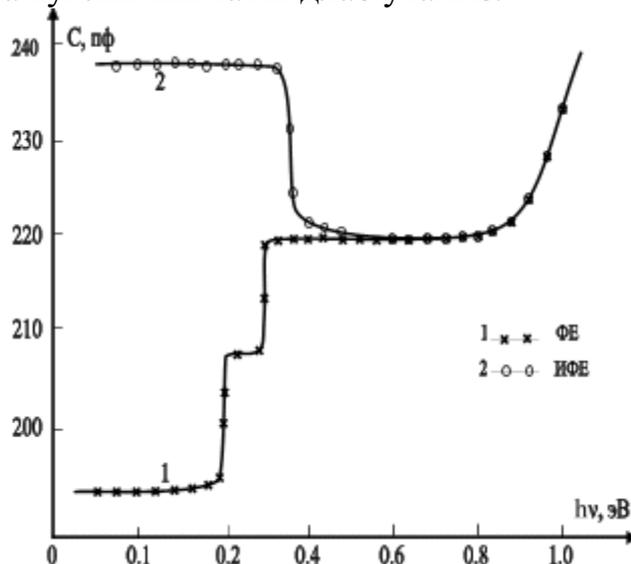


**3-расм. n-Si<Hf> (1), p-Si<Hf> (2) ва n-Si (назорат) намуналарининг DLTS спектрлари.**

Маълумотларни таҳлил қилиш ва таққослаш Si ҳажмида Hf атомларининг мавжудлиги термо ишлов бериш билан боғлиқ  $E_c-0.20$  эВ га тенг чуқур сатҳлар концентрациясининг камайишига олиб келишини кўрсатади. Кремний ҳажмида гафний атомларининг мавжудлиги, кремнийда нодир ер элементларининг мавжудлиги каби термик нуқсон ҳосил бўлиш самарадорлигининг пасайишига олиб келади: n-Si<Hf> да термик ишлов берилган n-Si назорат намунасидагига қараганда  $E_c-0.20$  эВ га тенг чуқур сатҳларнинг концентрацияси анчагина кам.

Гафний атомлари кремнийга ўстириш жараёнида киритилган намуналар ҳам тадқиқ қилинди. n-Si<Hf> намуналари DLTS спектрларининг ўзгариши бирор бир чуқур сатҳ концентрацияси, гарчи нейтрон-активацион таҳлил маълумотларига кўра Hf атомларининг миқдори етарлича катта  $\sim 2 \cdot 10^{16} \div 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  бўлишига қарамай, сезиларли даражада ўзгариши кузатилмаганини кўрсатди. Демак, ўстиришда киритилган Hf атомлари Si ҳажмида электронейтрал ҳолатда бўлар экан. Тадқиқотлар уларни юқори ҳароратли ишловлар ёрдамида фаоллаштириш мумкинлигини кўрсатди. Бунда чуқур сатҳларнинг энергетик спектри Hf диффузион йўли билан легирланган намуналарникига ўхшаган бўлади.  $\text{Si<Hf>}_{\text{диф}}$  да чуқур сатҳнинг

Hf атомлари билан боғлиқ концентрацияси  $\text{Si}\langle\text{Hf}\rangle_{\text{уст.}}$  намуналардагига қараганда бир тартибга кўплигини таъкидлаб ўтамыз.



4-расм. n-Si<Hf> ФС (1) ва n-Si<Hf> ИФС (2) типик спектрлари

Кремнийда биз тадқиқ қилган яна бир қийин эрувчи элемент бўлиб цирконий ҳисобланади. Ушбу бобда кремнийга диффузия усули билан киритилган элементлардан бири – цирконий билан легирланган кремнийдаги нуқсонлар энергетик спектрини ўрганиш натижалари келтирилган. Тадқиқотлар фотосиғим ва чуқур сатҳларнинг ностационар сиғим спектроскопияси ёрдамида ўтказилди.

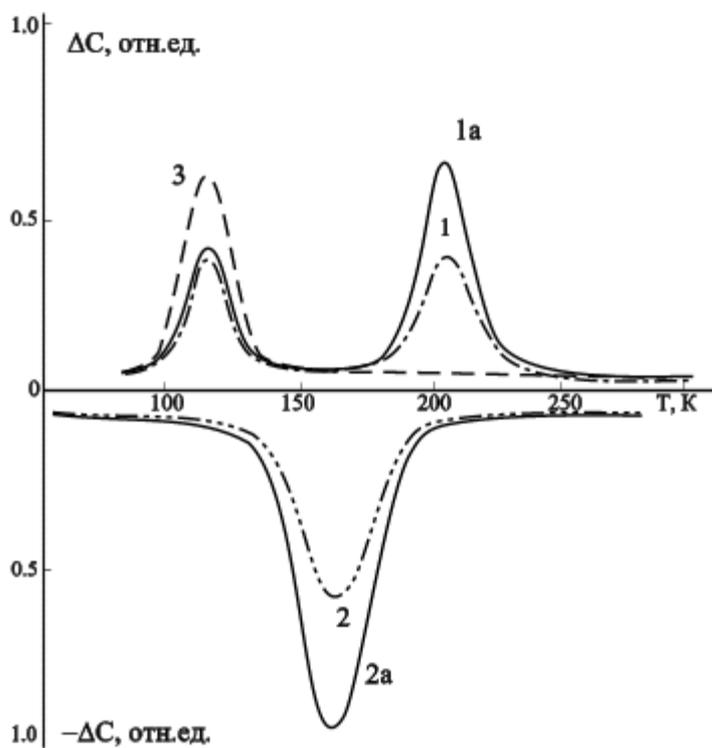
Тадқиқ қилинаётган намуна сифатида турлича солиштирма қаршиликка эга n- ва p-тип ўтказувчанликли монокристалл кремнийдан фойдаланилди. Кремнийни цирконий билан легирлаш махсус софликка эга Zr нинг пуркатилган қатламидан 1000÷1250<sup>0</sup>С температура оралиғида диффузион усулда амалга оширилди. Назорат намуналари сифатида Zr нинг кремнийга киритилишидаги вақт мобайнида ва юқори ҳароратда термо ишлов берилган n- ва p-Si намуналаридан фойдаланилди. Ўлчашлар натижаси барча n-Si намуналари цирконий билан легирлангандан кейин уларнинг солиштирма қаршилигининг катталиги ортишини кўрсатди. p-Si намуналарда эса, солиштирма қаршиликнинг қиймати деярли ўзгармасдан қолар экан.

Цирконий билан диффузион усулида легирланган Si намуналари, ҳамда назорат термоишлов берилган намуналарда DLTS ва фотосиғим спектрлари ўлчанди. 5- расмда цирконий билан 1000<sup>0</sup>С ва 1250<sup>0</sup>С температураларда легирланган ва ундан кейин сувга солиш йўли билан кескин равишда совутилган n-Si и p-Si намуналарининг DLTS спектрлари келтирилган. n-Si<Zr> ва p-Si<Zr> намуналарнинг ўлчанган DLTS спектрларининг таҳлили кремнийда цирконийнинг мавжудлиги ионизация энергиясининг  $E_c-0.22$  эВ,  $E_c-0.42$  эВ ва  $E_v+0.30$  эВ га тенг фиксирланган қийматларига эга учта чуқур сатҳнинг ҳосил бўлишига олиб келишини кўрсатади, уларнинг охири иккита

сатҳи катта қийматга эга бўлгани аниқланди. Цирконий атомлари билан боғлиқ чуқур марказларнинг ҳосил бўлиш самарадорлиги диффузия температурасининг ортиши ва диффузиядан кейинги совутиш тезлигининг ортиши билан ортиши аниқланди:  $T_{\text{диф}}$  ва  $v_{\text{сов}}$  қанчалик катта бўлса, цирконийнинг чуқур сатҳларининг концентрацияси шунчалик катта бўлади.

Фотосиғим спектрларининг ўлчаниши, текширилаётган намуналарда  $h\nu \sim 0.22, 0.42$  ва  $0.30$  эВ соҳада сиғимнинг релаксацияси кузатилишини кўрсатди. Бу эса кузатилаётган сатҳларнинг термик ва оптик ионизация энергиялари деярли мос тушишини англатади.

Термоишлов берилган n-Si назорат намуналарида DLTS ва ФС спектрларининг параллел равишда ўлчанишининг кўрсатишича, уларда фақат  $E_c-0.22$  эВ га тенг ионизация энергиясига эга битта сатҳ кузатилар экан, бунинг устига унинг концентрацияси цирконий билан легирланган намуналардагига қараганда бир тартибга юқори экан. Бу ердан шундай хулоса қилиш мумкинки, кремнийдаги цирконий атомлари билан фақат иккита охириги сатҳлар, айнан эса,  $E_c-0.42$  эВ ва  $E_v+0.30$  эВ энергияга тенг сатҳлар боғланган,  $E_c-0.22$  эВ сатҳ эса термоишлов беришнинг нуқсони ҳисобланади.



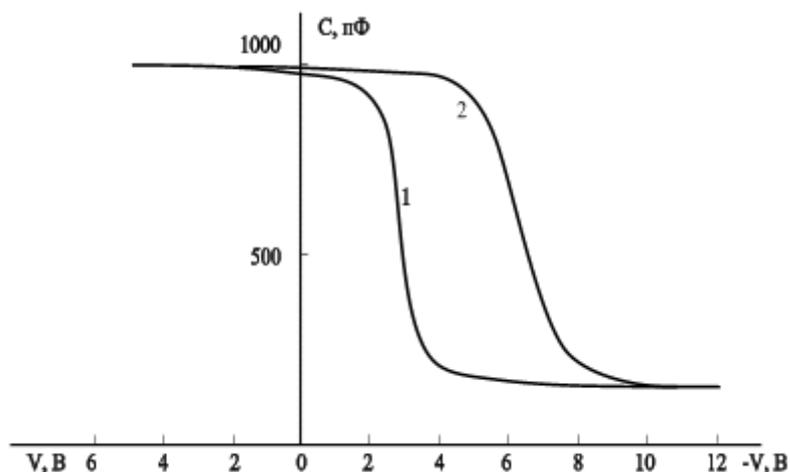
**5-расм. Zr билан легирланган n-Si ва p-Si нинг 1000°C (1,2) ва 1250°C (1a, 2a) даги ва Si-контроль намуна (3) DLTS спектрлари**

Паст температурали ишлов бериш (ПТИ) экспериментлари шуни кўрсатдики, 100 – 300°C температуралар оралиғида изотермик қиздириш  $E_c-0.42$  эВ ва  $E_v+0.30$  эВ га тенг чуқур сатҳлар концентрациясининг ортишига олиб келар экан,  $E_c-0.22$  эВ га тенг сатҳ эса ПТИ нинг таъсирига стабил бўлар экан.

**“Титан кичик гуруҳи киришмаларининг МДЯ-структуралар параметрларига таъсири эффектларини тадқиқ қилиш”** номли учинчи бобда МДЯ-структура параметрларига баъзи қийин эрувчи элементларнинг таъсири тадқиқотининг натижалари келтирилган.

МДЯ-структуралар параметрларига қийин эрувчи элементлар атомларининг таъсири титан мисолида батафсил кўриб чиқилган. Титан билан легирланган n-Si тагликдаги МДЯ-структураларда СС-DLTS ва ВФХ спектрларини ўлчашнинг натижалари келтирилган. Шунини таъкидлаб ўтамузика, ҳозиргача кремний тагликка киритилган Ti атомларининг МДЯ-структура параметрларига таъсири ҳақидаги бирор-бир маълумот йўқ. Шунинг учун мазкур ишда ушбу бўшлиқни тўлдиришга ҳамда титан киришмали кремнийли МДЯ-структураларнинг хусусиятларини батафсил тадқиқ қилишга ҳаракат қилинган.

Кремнийни титан билан легирлаш 1250 °С температурада 10 соат мобайнида Si сиртига пуркалган метал қатламидан диффузия қилиш ёрдамида амалга оширилди. Сўнгра юқорида кўрсатилганидек, МДЯ-структуралар тайёрланди. Si<Ti> асосида МДЯ-структураларнинг ВФХни ўлчаш, уларнинг назорат намуналарига қараганда манфий силжишлар томонига сурилганини кўрсатди. Бу эса кремнийга титанни киритилиши МДЯ-структура сиртий ҳолатларни зичлигининг ортишига ва Si-SiO<sub>2</sub> бўлиниш чегарасида мусбат зарядларнинг ҳосил бўлишига олиб келиши ҳақида гувоҳлик беради.

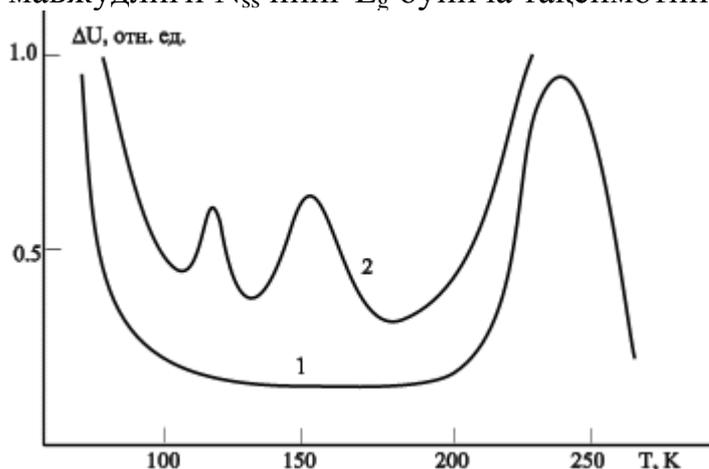


1-назорат намунаси, 2-Ti билан легирланган МДЯ-структура  
**6-расм. Титан билан легирланган МДЯ-структуранинг юқори частотали C-V-характеристикаси**

Si<Ti> асосидаги МДЯ-структураларда ва назорат МДЯ-структураларида (Ti киришмасисиз) СС-DLTS спектрларини ўлчаш легирланган намуналар спектрларида  $T_{\max} = 118$  К ва  $T_{\max} = 153$  К температураларда максимумга эга 2 та чўққининг кузатилишини, назорат намуналарида эса бундай чўққиларнинг топилмаганини кўрсатди (7-расм). Бу чўққилар билан боғлиқ нуқсон параметрларининг сонли ҳисоб-китоблари уларнинг аввал

титан билан легирланган Si да кузатганимиздек, тегишли чуқур сатх параметрларидан фарқ қилмаслигини кўрсатди. Дарҳақиқат,  $T = 118 \text{ K}$  да максимумга эга чўққи  $E_c - 0.20 \text{ эВ}$  га тенг ионизация энергиясига эга чуқур сатхга,  $T = 153 \text{ K}$  даги чўққи эса -  $\Gamma$ У  $E_c - 0.27 \text{ эВ}$  ли чуқур сатхга мос келади.

Титан киришмасига эга ва усиз кремнийли МДЯ-структураларда ярим-ўтказгичнинг тақиқланган соҳа кенлиги  $E_g$  бўйича сирт ҳолатлари зичлиги  $N_{ss}$  тақсимотининг ўзгариши келтирилган.  $N_{ss}$  нинг  $E_g$  га боғлиқлик тақсимотининг спектри типик U-симон характерга эга. Al-SiO<sub>2</sub>-n-Si<Ti> типдаги структуралар учун  $N_{ss}$  нинг кремнийнинг  $E_g$  бўйича тақсимоти тағлиқда титаннинг мавжудлиги  $N_{ss}$  нинг  $E_g$  бўйича тақсимотининг



1- Si<Ti> ва 2-назорат намунаси

### 7-расм. Si<Ti> асосидаги МДЯ-структуранинг СС-DLTS спектри

ўзгаришига олиб келишини ҳамда  $E_c - 0.20 \text{ эВ}$ ,  $E_c - 0.27 \text{ эВ}$  ва  $E_v + 0.30 \text{ эВ}$  га тенг қийматга эга энергиялар соҳасида учта яққол ифодаланган чўққиларнинг пайдо бўлишига олиб келишини кўрсатади. Тадқиқ қилинаётган МДЯ структураларда маълум киришмаларга эга ушбу нуқсонларнинг табиатини идентификациялаш учун оксид қатлами олиб ташланди ва уларда Шоттки барьерлари тайёрланди.

Олинган барьерларда СС-DLTS спектрларининг ўлчаниши барча намуналарда иккита чуқур сатхларнинг Si тақиқланган соҳасининг юқори ярмида ионизация энергияси  $E_c - 0.20 \text{ эВ}$  ва  $E_c - 0.27 \text{ эВ}$  га эга ҳолда қайта зарядланиши кузатилишини кўрсатди.

Шундай қилиб, МДЯ-структуранинг кремний тағлигида титан киришмасининг бўлиши  $N_{ss}$  нинг ортишига ва титан атомлари билан боғлиқ учта яққол ифодаланган чўққининг пайдо бўлишига олиб келар экан.

МДЯ-структура параметрларига гафний ва цирконий киришмаларининг таъсири ҳам кўриб чиқилган. n-Si<Hf> ва n-Si<Zr> асосидаги МДЯ-структура ВФХ нинг ўлчаниши, уларнинг назорат намуналарига қараганда манфий силжишлар томонига сурилганини кўрсатади. Бу эса Si га Hf ва Zr нинг киритилиши МДЯ-структура сиртий ҳолатлар зарядининг ортишига ва

Si-SiO<sub>2</sub> бўлиниш чегарасида мусбат зарядлар миқдорининг (назорат намуналарига нисбатан) ортишига олиб келишига шохидлик беради.

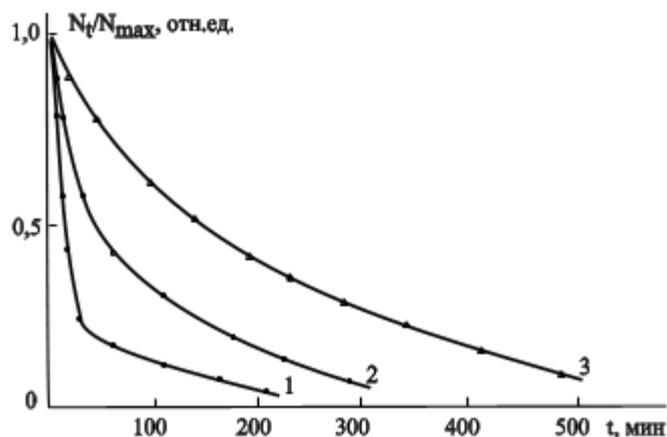
Si<Hf> асосидаги МДЯ-структуралар ва назорат МДЯ-структураларининг СС-DLTS спектрларини ўлчаш уларнинг спектрлари бирмунча фарқла-нишини кўрсатди, чунки Hf ни МДЯ-структуранинг кремний таглигига киритишда N<sub>ss</sub> ортади, DLTS спектрларида эса сезиларли концентрацияга эга бирор бир чўққининг топилмади.

Hf киришмали ва усиз кремнийли МДЯ-структураларнинг N<sub>ss</sub> сиртий ҳолатлар заряди тақсимотининг ярим ўтказгич тақиқланган соҳаси бўйича ўзгариши N<sub>ss</sub>(E<sub>g</sub>) тақсимот спектрининг типик U-симон характерга эга эканлигини кўрсатади.

**“Кремнийли структураларда титан кичик гуруҳи киришмалари-нинг термик ва радиацион нуқсон пайдо бўлиши жараёнларга таъсири”** номли тўртинчи бобда кремний ва кремнийли структураларга киритилган қийин эрувчи элементларнинг турли нуқсонларнинг пайдо бўлиш ва қиздириш жараёнларига таъсири бўйича тадқиқотнинг натижалари келтирилган. Кремнийли структураларда цирконий сатҳи паст тумпературали қиздирилишининг кинетикаси ўрганилган.

Вольт-фарад характеристикалар, DLTS ва ФС спектрларининг T=100 ÷ 400<sup>0</sup>C да ўлчашлари паст тумпературали ишлов бериш цирконий билан легирланган Si намуналарида кузатиладиган чуқур сатҳлар параметрлари-нинг сезиларли ўзгаришига олиб келмайди.

8-расмда (1-3 эгри чизиқлар) 200<sup>0</sup>C, 300<sup>0</sup>C ва 400<sup>0</sup>C да кейинчалик кескин совутиш билан паст тумпературали ишлов берилган n-Si<Zr> намуналар изотермик қиздирилишининг кинетикаси келтирилган. Олинган натижаларнинг таҳлили шуни кўрсатадики, паст тумпературали ишлов n-Si<Zr> да E<sub>c</sub>-0.42 эВ ва E<sub>v</sub>+0.30 эВ га тенг чуқур сатҳлар концентрация-сининг ўзгаришига олиб келади, қиздириш билан бу чуқур сатҳларнинг концентрацияси сезиларли даражада пасаяди. Паст тумпературали ишловнинг тумператураси ортиши билан кузатилаётган сатҳларнинг куйиб кетиши тезроқ бўлади.



ПТИ тумператураси, T<sup>0</sup>C: 1– 200, 2– 300, 3 – 400.

**8-расм. n-Si<Zr> намуналарининг изотермик куйиш кинетикаси**

Шундай қилиб, олинган натижалар таҳлили Si<Zr> намуналарига изохрон ҳамда изотермик паст температурали ишлов берилиши кремнийга цирконий атомларини диффузион усулида киритилган чуқур сатҳларнинг куйиб кетишига олиб келишини кўрсатади.

Аввалдан 1200 °C да 1 соат мобайнида, кейинчалик кескин совутиш билан ишлов берилган n-Si<Hf> намуналарга худди шундай ишлов бериш чуқур сатҳ энергетик спектрларини сезиларли даражада ўзгартиради. Юқори температурали ишлов n-Si<Hf>да  $E_c-0.36$  эВ га тенг янги чуқур сатҳларнинг ҳосил бўлишига олиб келиши аниқланди. 900 ÷ 1200 °C интервал оралиғида термик ишловдан ўтган намуналар DLTS спектрларининг таҳлили  $E_c-0.36$  эВ сатҳ ҳосил бўлишининг самарадорлиги ишлов бериш температураси ва юқори температурали ишловдан олдинги юзани тозалаш даражасига боғлиқлигини кўрсатди.

n-Si<Hf> намуналарида юқори температурали ишлов натижасида ҳосил бўлган  $E_c-0,36$  эВ га тенг сатҳнинг концентрацияси 1 соат давомида 250°C да паст температурали ишлов натижасида сезиларли даражада камаяди ва ишлов бериш давомийлигининг ортиши билан у тўлиғича куюди.

Олдиндан ўстириш жараёнида нодир ер элементлари (лантан ёки эрбий) билан легирланган кремнийга ва қўшимча равишда Zr, Ti ёки Hf киритиб экспериментал тадқиқотлар ўтказилди. Олинган натижаларга кўра, кремний панжарасида мавжуд ўстириш жараёнида нодир ер элементларга (лантан ёки эрбий) қўшимча равишда цирконий, титан ёки гафний атомларини киритиш орқали чуқур сатҳларнинг ҳосил бўлиш эффективлиги ошар экан. Шу билан бир қаторда Zr, Ti и Hf га тегишли чуқур сатҳларнинг термик стабиллиги ҳам ошар экан, шуни таъкидлаш лозимки, лантан ёки эрбий киришмалари бўлмаган намуналарда паст хароратли куйдириш 2-3 маротаба секин кечар экан.

Кремнийли МДЯ–структураларда Si-SiO<sub>2</sub> ўтиш қатламининг хусусиятларига γ-нурланишнинг таъсири тадқиқ қилинди. <sup>60</sup>Со гамма-квантлари билан МДЯ–структураларни нурлантириш дозасининг ортиши C-V-характеристикаларни манфий кучланишлар томонга силжишига олиб келади, бу эса Si-SiO<sub>2</sub> бўлиниш чегарасида радиацион нуқсонларнинг пайдо бўлиши ҳақида шохидлик беради. Нурланишнинг катта дозаларида кремнийнинг сиртида инверсиянинг стабил қатлами ҳосил бўлмайди, чунки сифим структуранинг майдоний электродида манфий силжишнинг ортиши билан камайиб боради.

## ХУЛОСА

Қийин эрувчи элементлари билан легирланган кремний ва кремнийли структураларда нуқсон ҳосил бўлиши жараёнларини ўрганиш асосида:

1. Биринчи марта Zr, Ti ва Hf киришмаларига эга кремний хусусиятларининг комплекс тадқиқоти натижасида кремнийга юқори хароратли диффузия йўли билан бундай киришмаларни киритиш бир қатор чуқур сатҳларнинг ҳосил бўлишига олиб келиши аниқланган.

2. Сиғим спектроскопияси ёрдамида биринчи марта кремнийда Zr, Ti ва Hf атомларининг улар кремнийга диффузион усули билан киритилганда ҳосил қиладиган чуқур сатҳларнинг энергетик спектри аниқланган ҳамда Si<Zr> да -  $E_c-0.22$  эВ,  $E_c-0.42$  эВ ва  $E_v+0.30$  эВ га тенг чуқур сатҳлар; Si<Ti> да -  $E_c-0.20$  эВ,  $E_c-0.27$  эВ,  $E_v+0.30$  эВга тенг чуқур сатҳлар; Si<Hf> да  $E_c-0.20$  эВ ва  $E_c-0.28$  эВ,  $E_v+0,35$  эВ га тенг чуқур сатҳлар ҳосил бўлиши кўрсатилган.

3. Кремнийдаги Zr, Ti ва Hf сатҳларининг технологик омилларга боғлиқ равишда ҳосил бўлиш самарадорлиги ўрганилган ва ушбу киришмалар сатҳларининг концентрацияси диффузия температурасининг ҳамда диффузиядан кейинги совутиш тезлигининг ортиши билан кўпайиши кўрсатилган.

4. Zr, Ti ва Hf ларни диффузион равишда кремнийга киритилиши термик нуқсонларнинг ҳосил бўлиш самарадорлигини 5-6 марта ва радиацион нуқсонларнинг ҳосил бўлиш самарадорлигини 3-4 марта пасайишига ва кремний параметрларининг стабиллашишига олиб келиши аниқланган.

5. Zr, Ti ва Hf лар билан ўстириш пайтида легирланган кремнийда чуқур сатҳлар кузатилмайди, аммо кейинги  $1000\div 1250^\circ\text{C}$  ли температура оралиғида юқори температурали ишлов бериш қийин эрувчи элементлар атомларининг фаоллашишига олиб келиши ва чуқур сатҳларнинг ҳосил бўлиши аниқланган.

6. Si панжарасида лантан ва эрбийнинг мавжудлиги кўшимча равишда киритилган цирконий, титан ва гафний билан боғлиқ чуқур сатҳларларнинг ҳосил бўлиш самарадорлигини орттириши биринчи марта топилган.

7. Zr, Ti ва Hf кириндиларнинг мавжудлиги кремнийли МДЯ - структураларнинг яримўтказгич соҳасининг таъқиқланган зонасининг кенлиги  $E_g$  бўйича юзавий ҳолатлари зичлигининг  $N_{ss}$  тақсимоти ўзгаришига олиб келиши аниқланган.

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

**ДАЛИЕВ ШАХРУХ ХОЖАКБАРОВИЧ**

**ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ Zr, Ti И Hf НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ  
СВОЙСТВА КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР**

**01.04.10 – физика полупроводников**

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

**Ташкент-2017**

**Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2017.1.PhD/FM33**

Диссертация выполнена в Национальном университете Узбекистана имени Мирзо Улугбека

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (fti-kengash.uz) и на Информационно-образовательном портале “ZiyoNet” (www.ziynet.uz).

**Научный руководитель:**

**Мамадалимов Абдугафур Тишабаевич**  
доктор физико-математических наук, академик

**Официальные оппоненты:**

**Камалов Амангелди Базарбаевич**  
доктор физико-математических наук, доцент

**Зикриллаев Нурулла Фатхуллаевич**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Ведущая организация:**

**Наманганский 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 2б. 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 2б. Административное здание Физико-технического института, зал конференций. Тел./Факс: (99871) 235-30-41.

Автореферат диссертации разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.  
(протокол рассылки № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2017 г.)

**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 ученых степеней,  
д.ф.-м.н., профессор

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** На сегодня в мире в области быстро развивающейся полупроводниковой микро- и оптоэлектроники одним из перспективных направлений является исследования свойств примесей, создающих различные дефектные центры в полупроводниках. В этом плане исследования направленные на изучение влияния тугоплавких примесей на электрофизические свойства кремниевых структур и разработке способов повышения термической стабильности и радиационной стойкости параметров кремниевых МДП-структур являются одними из основных задач.

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

В мире на сегодня изучение взаимодействия между примесными частицами и дефектами структуры полупроводника, влияния гетерогенности строения МДП-структуры на перераспределение примесей открывает возможность повышения стабильности рабочих параметров микросхем на основе МДП-структур являющихся базовыми элементами современной электроники. В этом плане целевые научные исследования, в том числе в нижеприведенных направлениях: исследование электрофизических свойств полупроводников, легированных тугоплавкими элементами и идентификация глубоких уровней, создаваемых этими примесями; изучение влияния атомов ТПЭ на процессы термического и радиационного дефектообразования в кремнии; исследования взаимодействия атомов ТПЭ с неконтролируемыми технологическими примесями; изучение влияния атомов тугоплавких элементов на параметры различных кремниевых структур. Научные исследования проводимые в этом направлении указывают на актуальность темы данной диссертации.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Постановлении Президента Республики Узбекистан ПП–1442 «О приоритетных направлениях развития индустрии Республики Узбекистан на 2011-2015 гг.» от 15 декабря 2010 года и ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организаций, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

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

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

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

Определенный вклад в развитие физики локальных центров полупроводниках и полупроводниковых структурах внесли ученые Узбекистана, среди которых академики Саидов М.С., Муминов Р.А., Мамадалимов А.Т. и другие. Свойства легированных компенсирующими примесями полупроводников были изучены Бахадырхановым М.К., Зайнабидиновым С.З., ими обнаружены эффекты температурного и ИК-гашения в компенсированном кремнии, легированном глубокими примесями. Абдурахмановым К.П. и др. были изучены процессы дефектообразования в кремнии, легированном различными примесями и определен энергетический спектр ряда примесей. Власовым С.И. были исследованы физические процессы, протекающие на межфазных границах кремниевых структур и установлено, что основным фактором, определяющим отличие свойств скрытой границы раздела от свойств объема полупроводника и диэлектрика, является наличие поверхностных электронных состояний, создающих энергетические уровни в запрещенной зоне полупроводника.

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

**Связь диссертационной работы с тематическими планами НИР.** Диссертационная работа выполнена в Национальном университете Узбекистана в соответствии с тематическими планами грантов ЦНТ РУз ФМ-2-038 «Исследование физических процессов в объеме и на границе раздела многослойных структур типа металл-диэлектрик-полупроводник на

основе кремния, легированного тугоплавкими элементами" (01.01.07 - 31.12.08гг.), ОТ-Ф2-081 «Изучение закономерностей дефектообразования в монокристаллическом кремнии с примесно-дефектными ассоциатами и динамических процессов формирования скрытых границ раздела полупроводник - диэлектрик» (01.07.07-31.12.11гг.); ЁФ-2-08 «Изучение влияния радиации на образование и отжиг дефектов в кремнии и кремниевых многослойных структурах с примесями редкоземельных элементов» (01.07.10-31.12.11гг.) и ЁФ-2-13 «Влияние примесей подгруппы титана на электрофизические свойства кремниевых структур» (01.01.16-31.12.17 гг.).

**Целью исследования** является комплексное исследование с помощью емкостной спектроскопии электрофизических свойств Si, легированного примесями некоторых тугоплавких элементов (ТПЭ), в частности, атомами Hf, Ti и Zr, их взаимодействия с другими электроактивными и электронейтральными примесями в кремнии, влияния этих примесей на свойства кремниевых структур типа металл-диэлектрик-полупроводник (МДП).

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

исследовать электрофизические свойства образцов Si, легированных тугоплавкими элементами – Hf, Ti, Zr как диффузионным путем, так и при выращивании из расплава;

идентифицировать глубокие уровни, создаваемые примесями гафния, титана и циркония и определить их энергетический спектр;

изучить влияние атомов ТПЭ на процессы термического дефектообразования в кремнии;

исследовать влияние атомов Zr, Ti и Hf на образование радиационных дефектов в кремнии, облученном  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$ ;

исследовать взаимодействие атомов тугоплавких элементов с технологическими примесями (кислородом углеродом), а также с дополнительно введенными электроактивными и электронейтральными примесями в кремнии;

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

**Объектом исследования** является монокристаллический кремний, выращенный методом Чохральского и бестигельной зонной плавки, а также Si, легированный тугоплавкими примесями Zr, Ti и Hf и МДП-структуры на их основе.

**Предметом исследования** являются спектры DLTS и ФЕ Si, легированного Hf, Ti и Zr, эффекты взаимодействия примесей тугоплавких элементов с неконтролируемыми примесями, а также физические процессы, протекающие в МДП-структурах с примесями тугоплавких элементов.

**Методы исследований.** Для проведения исследований использовались методы нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS), фотоемкости (ФЕ) и инфракрасного (ИК) поглощения.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

показано, что эффективность образования уровней Zr, Ti и Hf в кремнии зависит от технологических режимов (температуры и длительности диффузии, а также скорости постдиффузионного охлаждения образцов);

обнаружено, что в кремнии, легированном примесями ТПЭ в процессе выращивания, ГУ не наблюдаются, но последующая высокотемпературная обработка (ВТО) в интервале температур 1000÷1250°C приводит к активации атомов Zr, Ti и Hf и образованию глубоких уровней;

установлено, что диффузионное введение примесей ТПЭ приводит к снижению эффективности образования термических и радиационных дефектов и стабилизации параметров кремния;

впервые установлено, что наличие редкоземельных примесей (лантана или эрбия) в решетке Si увеличивает эффективность образования ГУ, связанных с дополнительно введенным цирконием, титаном или гафнием;

установлено, что присутствие примесей Zr, Ti и Hf в объеме подложки кремниевых МДП-структур, приводит к сдвигу ВЧ ВФХ в сторону отрицательных смещений по сравнению с контрольными образцами, что свидетельствует об увеличении плотности поверхностных состояний МДП-структур и образовании положительного заряда на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub>.

обнаружено, что наличие примесей ТПЭ приводит к изменению распределения плотности поверхностных состояний  $N_{ss}$  по ширине запрещенной зоны  $E_g$  полупроводника кремниевых МДП-структур.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

разработаны технология легирования объема и поверхностных слоев кремниевых МДП-структур примесями ТПЭ (Zr, Ti и Hf) и условия оптимизации параметров МДП-структур путем введения примесей ТПЭ;

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

**Достоверность результатов исследований** обосновывается применением экспериментальных методов, обладающих высокой чувствительностью и разрешающей способностью, а также хорошей воспроизводимостью результатов, полученных разными методами.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость результатов исследования заключается в том, что они позволяют выяснить закономерности дефектообразования в кремнии, легированном различными примесями.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что полученные результаты по повышению термической стабильности и радиационной стойкости параметров кремния путем введения ТПЭ могут быть использованы при изготовлении различных полупроводниковых приборов.

**Внедрение результатов исследования.** На основе изучения процессов дефектообразования в кремнии и кремниевых структурах, легированных тугоплавкими элементами: разработанная технология получения структуры с

модифицированной мелкозалегающей рабочей областью на основе системы силицид титана – кремний использована в АО «FOTON» Акционерной компании «Узэлтехсаноат» (Справка АК «Узэлтехсаноат» от 25 сентября 2017 года). Использование научных результатов позволило получить контактные области с низким последовательным сопротивлением к диодным структурам на основе кремния на АО «FOTON»;

разработанная технология легирования объема и поверхностных слоев кремниевых МДП- структур примесями тугоплавких элементов (Zr, Ti и Hf) использована при выполнении гранта ФА-ФЗ-Ф003 «Компенсирланган кремний датчиги асосида озик-овқат сақланадиган омбор температурасини ва намлигини узоқ масофадан назорат қилиб турадиган қурилмани яратиш» Института ядерной физики АН РУз и гранта А-3-57 “Наноструктурали кремний датчик асосида турли хил объектларда харорат ва намликни назорат қилувчи микропроцессорли асбобни ишлаб чиқиш” Ташкентского государственного технического университета (Справка Агентства по науке и технологиям от 20 сентября 2017 года). Использование научных результатов позволило повысить термостабильность параметров датчиков на основе компенсированного кремния.

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

**Публикации результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано 33 научных трудов, из них 9 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Текст диссертации изложен на 128 страницах, включая 37 рисунков, 3 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, изложены цель и задачи, показаны научная новизна, практическая значимость работы и представлены основные положения, выносимые на защиту.

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

Приведен анализ работ по изучению поведения различных дефектов в кремниевых структурах типа металл-диэлектрик-полупроводник и диодов Шоттки, также описаны особенности емкостной спектроскопии дефектов в полупроводниках и полупроводниковых структурах. Рассмотрены емкость р-п- перехода и перезарядка ГУ с изменением температуры и изложена сущность метода DLTS при постоянной емкости (CC-DLTS), которая заключается в измерении температурной зависимости разности напряжения на структуре в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  после окончания импульса заполнения с амплитудой  $U_f$  и длительностью  $t_f$ .

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

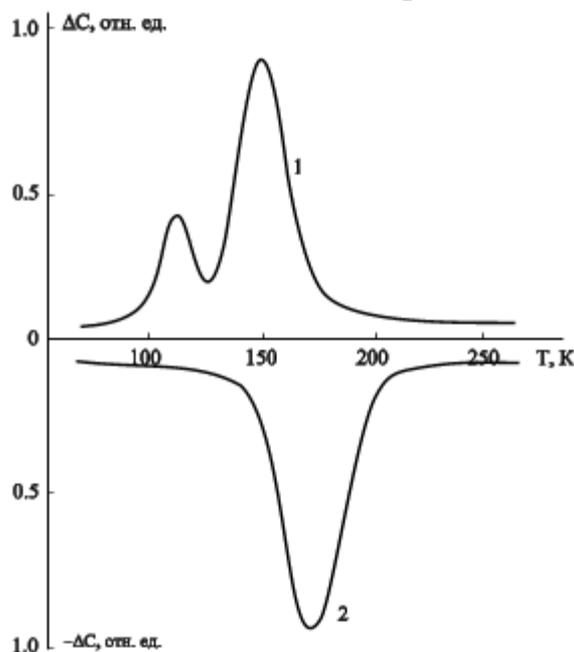
В конце главы подробно описываются технологии проведения термических обработок и изготовления диодных структур. Детально изложены особенности технологии легирования кремния примесями тугоплавких элементов Hf, Ti и Zr.

Вторая глава **«Эффекты влияния примесей подгруппы титана на электрофизические свойства кремния»** посвящена исследованию влияния тугоплавких элементов на свойства кремния. В данной главе приведены результаты комплексных исследований процессов дефектообразования в кремнии, легированном тугоплавкими элементами - Zr, Ti и Hf, а также изучения межпримесного взаимодействия на примере атомов гафния и лантана, атомов редкоземельных элементов и технологических примесей в кремнии, исследования влияния термических обработок на свойства кремния, легированного ТПЭ и РЗЭ.

Легирование кремния, легированного примесями Zr, Ti и Hf диффу-

зионным методом при  $1200^{\circ}\text{C}$  в течение 50 часов показало, что зависимости  $1/C^2 = f(V_{\text{обр}})$ , определенные из вольт-фарадных характеристик во всех исследованных диодах были линейными, что свидетельствует о равномерном распределении примесей Zr, Ti и Hf в объеме полупроводника. Концентрация ионизованных центров в слое объемного заряда в диодах как из n-Si, а также в p-Si с примесями Zr, Ti и Hf, определенная  $1/C^2 = f(V_{\text{обр}})$  при 300К, хорошо согласуется с концентрацией акцепторов в исходном кремнии.

Рассмотрен энергетический спектр дефектов в кремнии на примере титана. Из анализа спектров DLTS следует, что на этих спектрах в образцах n-Si<Ti> наблюдаются 2 пика с максимумами при  $T_M=120\text{K}$  и  $T_M=150\text{K}$  (рис.1, кривая 1). Пересчет спектров DLTS в зависимости Аррениуса показывает, что эти пики обусловлены перезарядкой ГУ с энергиями ионизации  $E_c-0.20$  эВ,  $E_c-0.27$  эВ. В образцах p-Si<Ti> обнаружен лишь один ГУ с энергией ионизацией  $E_v+0.30$  эВ и сечением захвата дырок  $\sigma_n=2.10^{-17}$  см<sup>2</sup>.



**Рис.1. Спектры DLTS в образцах n-Si<Ti> (1) и p-Si<Ti> (2)**

Анализ результатов показывает, что эффективность образования ГУ  $E_v+0.30$  эВ зависит от  $T_{\text{диф}}$  и  $\vartheta_{\text{охл}}$ . Определена также зависимость концентрации электроактивных атомов Ti, определенной из спектров DLTS, от  $T_{\text{диф}}$ . Анализ данных, полученных методами емкостной спектроскопии и НАА, показывает, что не весь Ti, введенный в Si путем диффузии проявляет электрическую активность, только около 20 % Ti, находящегося в объеме Si, электроактивны. Такое поведение Ti аналогично поведению и других переходных элементов в Si. Нами также изучено поведение атомов Ti, введенного в Si из расплава при выращивании ( $\text{Si}<\text{Ti}>_{\text{выр}}$ ). Исследованные образцы имели проводимость n-типа и  $\rho \approx 20 \div 100$  Ом·см. Из анализа

спектров DLTS образцов  $\text{Si}\langle\text{Ti}\rangle_{\text{выр}}$  установлено, что параметры образующихся ГУ аналогичны параметрам ГУ в диффузионно-легированных образцах  $\text{n-Si}\langle\text{Ti}\rangle_{\text{диф}}$ .

Проведена идентификация уровней Ti в Si в образцах  $\text{n-Si}\langle\text{Ti}\rangle$  из измерений спектров ФЕ. Типичный спектр ФЕ диода на  $\text{n-Si}\langle\text{Ti}\rangle$  (рис.2) состоит из двух ступенек разной величины.

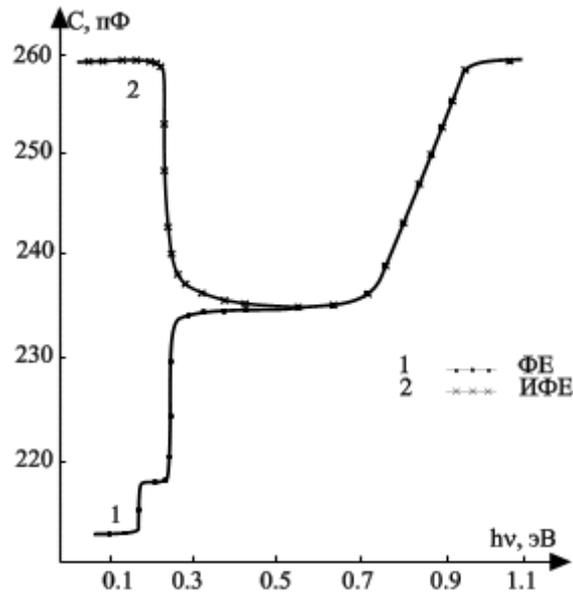


Рис.2. Спектры ФЕ (1) и ИФЕ (2) диода из  $\text{n-Si}\langle\text{Ti}\rangle$

Это свидетельствует о том, что Ti образует 2 ГУ с фиксированной энергией ионизации:  $E_c-0.20$  эВ,  $E_c-0.27$  эВ. В области  $h\nu > 0.6$  эВ происходит плавный рост емкости. В контрольных образцах из  $\text{n-Si}$  (без Ti), прошедших аналогичную ТО, были обнаружены только уровни  $E_c-0.20$  эВ, характерные для дефектов ТО, их концентрация была порядка  $N_{\text{ГУ}} = 10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

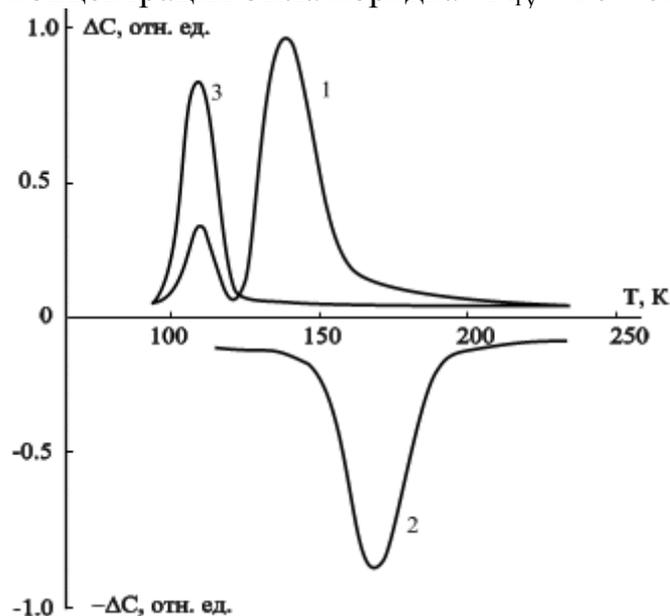


Рис.3. Спектры DLTS образцов  $\text{n-Si}\langle\text{Hf}\rangle$  (1),  $\text{p-Si}\langle\text{Hf}\rangle$  (2) и контрольный  $\text{n-Si}$  (3)

Процессы образования глубоких центров исследовались также в образцах кремния, диффузионно-легированного гафнием. На рис.3 показаны типичные спектры DLTS образцов n-Si<Hf>.

Обработка спектров DLTS и их анализ показывает, что в образцах n-Si<Hf> образуются два ГУ с энергиями ионизации  $E_c-0.20$  эВ и  $E_c-0.28$  эВ. В образцах p-Si<Hf> обнаружен один ГУ с энергией ионизации  $E_v+0.35$  эВ. Анализ спектров DLTS показал, что уровни с энергией ионизаций  $E_c-0.28$  эВ и  $E_v+0.35$  эВ связаны с атомами Hf в Si.

На спектрах ФЕ наблюдаются два пика с энергией ионизации  $E_c-0.20$  эВ и  $E_c-0.26$  эВ, а на спектрах индуцированной ФЕ наблюдается один ГУ с энергией ионизации  $E_v+0.34$  эВ. n-Si<Hf> и p-Si<Hf> представлены на рис.4.

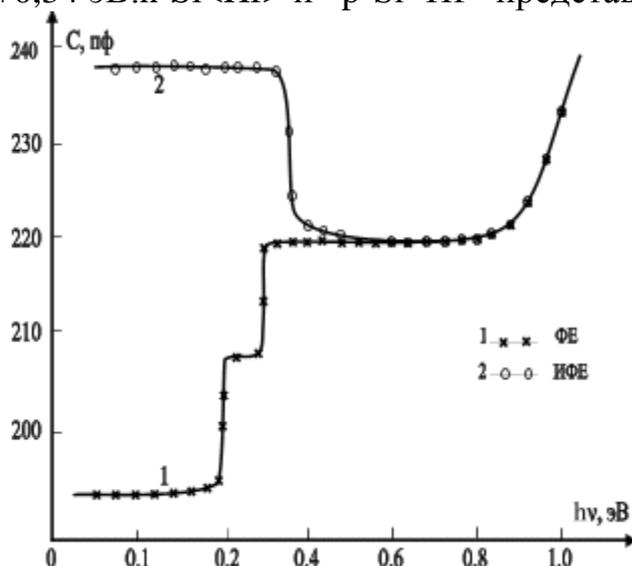


Рис.4. Спектры ФЕ (1) и ИФЕ (2) образцов n-Si<Hf>

Анализ и сопоставление данных показывают, что наличие атомов Hf в объеме Si приводит к уменьшению концентрации ГУ  $E_c-0.20$  эВ, обусловленного термообработкой. Наличие атомов Hf в объеме Si, также, как и атомов редкоземельных элементов в Si приводит к снижению эффективности термического дефектообразования: концентрация ГУ  $E_c-0.20$  эВ значительно ниже в образцах n-Si<Hf>, чем в n-Si<ВТО>.

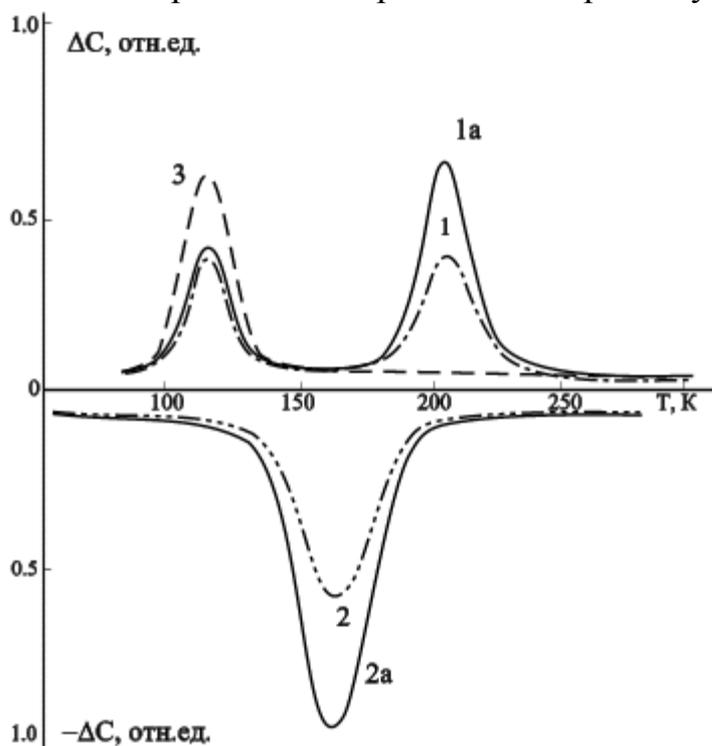
Исследовались также образцы, в которые Hf вводился в Si в процессе выращивания. Измерения спектров DLTS образцов n-Si<Hf> показали, что в заметной концентрации каких-либо ГУ не наблюдается, хотя по данным нейтронно-активационного анализа содержание атомов Hf довольно высокое  $\sim 2 \cdot 10^{16} \div 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Следовательно, атомы Hf, введенные при выращивании, находятся в объеме Si в электронейтральных состояниях. Исследования показали, что активировать их можно с помощью высокотемпературных обработок. При этом энергетический спектр ГУ аналогичен образцам, легированным Hf диффузионным путем. Отметим, что концентрации ГУ, связанных с атомами Hf в образцах Si<Hf><sub>диф</sub> на порядок больше, чем в образцах Si<Hf><sub>выр</sub>.

Другим тугоплавким элементом в кремнии, исследованным нами является цирконий в Si. В данном параграфе приводятся результаты изучения энергетического спектра дефектов в кремнии, легированном одним из этих элементов – цирконием, введенным в Si диффузионным методом. Исследования проводилось с помощью DLTS и ФЕ.

В качестве исследуемых образцов использовался монокристаллический кремний n- и p-типа проводимости с различными удельными сопротивлениями.

Легирование кремния цирконием производилось диффузионным методом из напыленного слоя Zr особой чистоты в интервале температур  $1000 \div 1250^\circ\text{C}$ . В качестве контрольных использовались образцы n- и p-Si, термообработанные при той же температуре и времени, что и введение Zr в кремний.

Результаты измерений показали, что во всех образцах n-Si после легирования цирконием наблюдается увеличение величины удельного сопротивления. В образцах же p-Si значения удельного сопротивления остаются практически неизменными. Для образцов Si, диффузионно-легированных цирконием, а также подвергнутых контрольной термообработке проводились измерения спектров DLTS и ФЕ. На рис.5 приведены спектры DLTS образцов n-Si и p-Si, легированных цирконием при  $1000^\circ\text{C}$  и  $1250^\circ\text{C}$  с последующей резкой закалкой путем сбрасывания в воду. Анализ измеренных спектров DLTS образцов n-Si<Zr> и p-Si<Zr> показывает, что присутствие циркония в Si приводит к образованию трех глубоких уровней



**Рис.5. Спектры DLTS образцов n-Si (1, 1a) и p-Si (2, 2a), легированных Zr при  $1000^\circ\text{C}$  (1, 2),  $1250^\circ\text{C}$  (1a, 2a) и контр. n-Si (3)**

с фиксированными энергиями ионизации  $E_c-0.22$  эВ,  $E_c-0.42$  эВ и  $E_v+0.30$  эВ, доминирующими являются два последних уровня. Обнаружено, что эффективность образования глубоких центров, связанных с атомами циркония увеличивается с увеличением температуры диффузии  $T_{\text{диф}}$  и скорости охлаждения после диффузии  $v_{\text{охл}}$ : чем больше  $T_{\text{диф}}$  и  $v_{\text{охл}}$ , тем больше концентрация глубоких уровней циркония. Измерения спектров ФЕ показали, что в исследованных образцах наблюдается релаксация емкости в области  $h\nu \sim 0.22, 0.42$  и  $0.30$  эВ.

Это свидетельствует о том, что термическая и оптическая энергии ионизации наблюдаемых уровней практически совпадают.

Параллельные измерения спектров DLTS и ФЕ в контрольных термообработанных образцах n-Si показали, что в них наблюдается лишь уровень с энергией ионизации  $E_c-0.22$  эВ, причем его концентрация на порядок выше, чем в образцах, легированных цирконием. Отсюда можно сделать вывод, что с атомами циркония в кремнии связаны лишь два последних уровня, а именно уровни с энергией ионизации  $E_c-0.42$  эВ и  $E_v+0.30$  эВ, а уровень  $E_c-0.22$  эВ является дефектом термообработки.

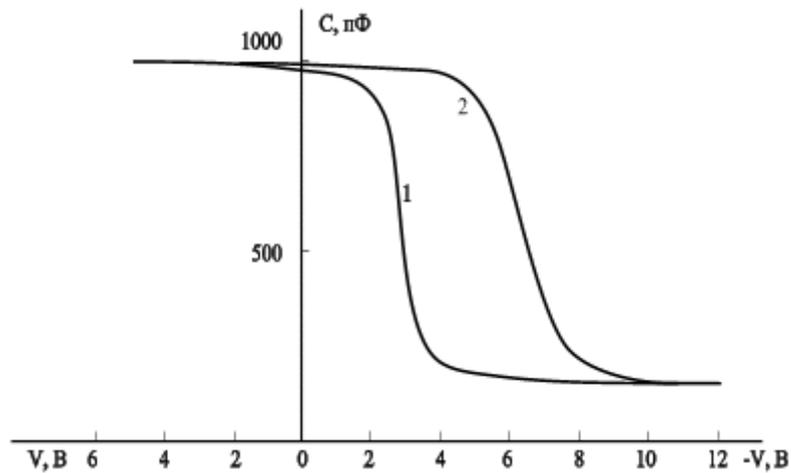
Эксперименты с низкотемпературными обработками (НТО) показали, что изотермический отжиг в интервале температур  $100 - 300$  °С приводит к уменьшению концентрации глубоких уровней  $E_c-0.42$  эВ и  $E_v+0.30$  эВ, а уровень  $E_c-0.22$  эВ стабилен к воздействию НТО.

В третьей главе «**Исследование эффектов влияния примесей подгруппы титана на параметры МДП-структур**» приведены результаты исследования влияния некоторых тугоплавких элементов на параметры МДП-структур.

Влияние атомов тугоплавких элементов на параметры МДП-структур рассмотрено подробно на примере титана. Приведены результаты измерений спектров СС-DLTS и ВФХ в МДП-структурах на подложках из n-Si, легированного титаном. Отметим, что каких-либо данных о влиянии на параметры МДП - структур атомов Ti, введенных в кремниевую подложку, до сих пор нет. Поэтому в данной работе делается попытка восполнить этот пробел и детально исследовать свойства кремниевых МДП-структур с примесью титана.

Легирование Si титаном осуществлялось при помощи диффузии при температуре  $1250$  °С в течение 10 часов из напыленного на поверхность кремния металлического Ti. Далее, как показано выше, изготавливались МДП-структуры. Измерения ВФХ МДП-структур на основе Si<Ti> показали, что они сдвинуты в сторону отрицательных смещений по сравнению с контрольными образцами. Это свидетельствует о том что, введение Ti в Si приводит к увеличению плотности ПС МДП - структур и образованию положительного заряда на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub>.

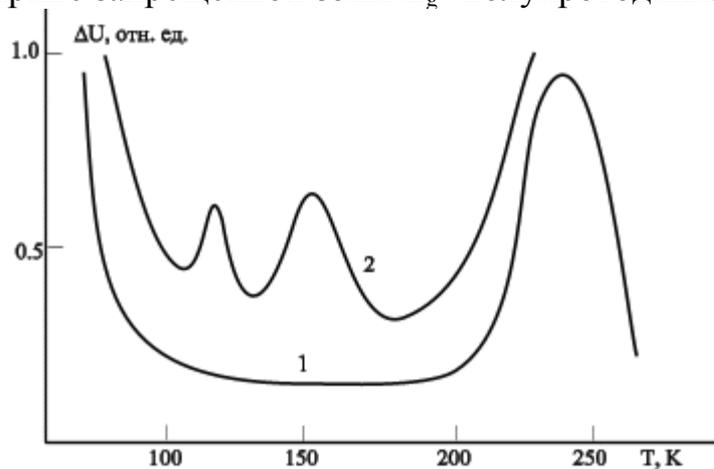
Измерения спектров СС-DLTS в МДП-структурах на основе Si<Ti> и контрольных МДП-структурах (без примеси титана) показали, что на спектрах легированных образцов наблюдаются 2 пика с максимумами при



**Рис.6. Высокочастотные C-V-характеристики МДП-структур на основе кремния, легированного титаном (2) и контрольных МДП-структур (1)**

температурах  $T_{\max} = 118$  К и  $T_{\max} = 153$  К, а в контрольных образцах такие пики не обнаружены (рис.7). Численные расчеты параметров дефектов, обусловленных этими пиками, показали, что они не отличаются от параметров соответствующих ГУ, наблюдавшихся нами ранее в Si, легированном титаном. Действительно, пик с максимумом при  $T = 118$  К соответствует ГУ с энергией ионизации  $E_c - 0.20$  эВ, а пик при  $T = 153$  К - ГУ  $E_c - 0.27$  эВ.

Приведено изменение распределения плотности поверхностных состояний  $N_{ss}$  по ширине запрещенной зоны  $E_g$  полупроводника кремниевых



**Рис.7. Спектры CC-DLTS в МДП-структурах на основе Si<Ti> (2) и контрольных МДП-структур без титана (1)**

МДП-структур с примесью Ti и без него. Спектр распределения зависимости  $N_{ss}$  от  $E_g$  имеет типичный U-образный характер. Распределение  $N_{ss}$  по  $E_g$  кремния для структур типа Al-SiO<sub>2</sub>-n-Si<Ti> показывает, что наличие Ti в подложке приводит к изменениям распределения  $N_{ss}$  по  $E_g$  и образованию

трех явно выраженных пиков в области энергий со значениями  $E_c - 0.20$  эВ,  $E_c - 0.27$  эВ и  $E_v + 0.30$  эВ. Для идентификации природы этих дефектов с определенными примесями в исследуемых МДП-структурах снимался окисный слой и на них изготавливались барьеры Шоттки.

Измерения спектров СС-DLTS на полученных барьерах показали, что во всех образцах наблюдается перезарядка двух ГУ в верхней половине запрещенной зоны Si с энергиями ионизации  $E_c - 0.20$  эВ и  $E_c - 0.27$  эВ.

Таким образом, присутствие примеси титана в кремниевой подложке МДП-структур приводит к увеличению  $N_{ss}$  и появлению трех четко выраженных пиков, связанных с атомами титана.

Рассмотрено также влияние примесей гафния и циркония на параметры МДП-структур. Измерения ВФХ МДП-структур на основе n-Si<Hf> и n-Si<Zr> показали, что они также сдвинуты в сторону положительных напряжений смещения по сравнению с контрольными образцами. Это свидетельствует о том что, введение Hf и Zr в Si приводит к уменьшению ППС МДП- структур и уменьшению величины положительного заряда на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> (относительно контрольных образцов).

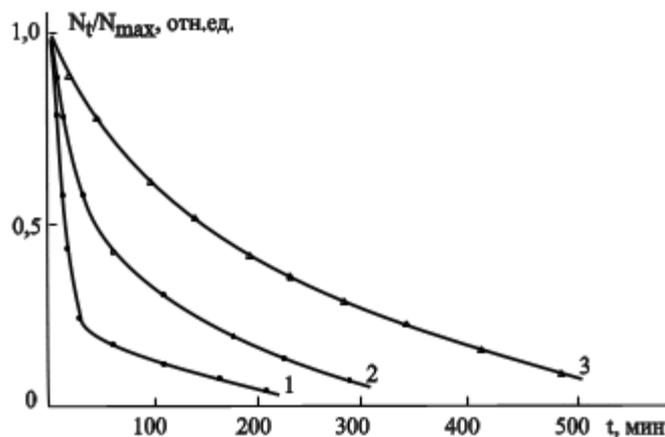
Измерения спектров СС-DLTS в МДП-структурах на основе Si<Hf> и контрольных МДП-структурах показали, что их спектры несколько различаются, так как при введении Hf в кремниевую подложку МДП-структур величина  $N_{ss}$  увеличивается, на спектрах DLTS каких-либо пиков в заметной концентрации не обнаружено.

Изменение распределения ППС  $N_{ss}$  по ширине запрещенной зоны  $E_g$  полупроводника кремниевых МДП-структур с примесью Hf и без него, показали что спектр распределения  $N_{ss}(E_g)$  имеет типичный U-образный характер).

В четвертой главе «Влияние примесей подгруппы титана на процессы термического и радиационного дефектообразования в кремниевых структурах» приведены результаты исследования влияния некоторых тугоплавких элементов на процессы образования и отжига различных дефектов в кремнии и кремниевых структурах. Изучена кинетика низкотемпературного отжига уровней циркония в кремниевых структурах. Измерения вольт-фарадных характеристик, спектров DLTS и ФЕ показали, что низкотемпературная обработка (НТО) при  $T=100 \div 400^\circ\text{C}$  не приводит к заметному изменению параметров ГУ, наблюдаемых в образцах Si, легированного цирконием.

На рис.8 (кривые 1-3) приведена кинетика изотермического отжига образцов n-Si<Zr>, подвергнутых низкотемпературной обработке (НТО) при  $200^\circ\text{C}$ ,  $300^\circ\text{C}$  и  $400^\circ\text{C}$  с последующей резкой закалкой. Анализ полученных результатов показывает, что НТО приводит к изменению концентрации глубоких уровней  $E_c-0.42$  эВ и  $E_v+0.30$  эВ в n-Si<Zr>: по мере отжига заметно снижается концентрация этих ГУ. С ростом температуры НТО отжиг наблюдаемых уровней происходит быстрее.

Таким образом, анализ полученных результатов показывает, что низкотемпературная обработка, как изохронная, так и изотермическая,



**Рис.8. Кинетика изотермического отжига образцов n-Si<Zr>: температура НТО, °С: 1– 200, 2– 300, 3 – 400**

образцов Si<Zr> приводит к отжигу уровней, обусловленных диффузионным введением атомов циркония в кремний. Аналогичная обработка образцов n-Si<Hf>, прошедших предварительную высокотемпературную обработку (ВТО) при 1200 °С в течение 1 часа с последующей резкой закалкой, существенно изменяет энергетический спектр ГУ. Обнаружено, что ВТО приводит к образованию нового ГУ  $E_c-0.36$  эВ в n-Si<Hf>. Анализ спектров DLTS образцов, прошедших ТО в интервале 900 ÷ 1200 °С показал, что эффективность образования уровня  $E_c-0.36$  эВ зависит от температуры обработки и степени очистки поверхности перед ВТО.

Установлено, что концентрация уровня  $E_c-0,36$  эВ, стимулированного ВТО в образцах n-Si<Hf>, в результате НТО при 250 °С в течение 1 часа заметно уменьшается и с дальнейшим ростом длительности обработки он полностью отжигается.

Были проведены эксперименты с предварительным легированием кремния примесями редкоземельных элементов (лантана или эрбия) в процессе выращивания из расплава и дополнительным введением Zr, Ti или Hf. Результаты измерений показали, что наличие редкоземельных примесей (лантана или эрбия) в решетке Si увеличивает эффективность образования ГУ, связанных с дополнительно введенным цирконием, титаном или гафнием. При этом повышалась также термическая стабильность глубоких уровней Zr, Ti и Hf – их низкотемпературный отжиг происходил в 2-3 раза медленнее, чем в образцах без примесей лантана или эрбия.

Исследовано влияние  $\gamma$ -облучения на свойства переходного слоя Si-SiO<sub>2</sub> в кремниевых МДП-структурах. Установлено, что увеличение дозы облучения гамма-квантами <sup>60</sup>Co МДП-структур приводит к смещению C-V-характеристик в сторону отрицательных напряжений, что свидетельствует о появлении радиационных дефектов на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub>. Показано,

что при больших дозах облучения стабильный слой инверсии на поверхности кремния не образуется, так как емкость уменьшается с увеличением отрицательного смещения на полевом электроде структуры.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты данной работы состоят в следующем:

1. Впервые проведено комплексное исследование свойств кремния с примесями Zr, Ti и Hf, установлено, что введение этих примесей путем высокотемпературной диффузии в кремний приводит к образованию ряда глубоких уровней.

2. Изучена эффективность образования уровней Zr, Ti и Hf в кремнии в зависимости от технологических факторов и показано, что концентрация уровней этих примесей увеличивается с ростом температуры диффузии и скорости охлаждения образцов после диффузии.

3. Впервые с помощью емкостной спектроскопии определен энергетический спектр ГУ, создаваемых атомами Zr, Ti и Hf в кремнии при их диффузионном введении и показано, что в Si<Zr> образуются глубокие уровни  $E_c-0.22$  эВ,  $E_c-0.42$  эВ и  $E_v+0.30$  эВ; в Si<Hf> образуются глубокие уровни  $E_c-0.20$  эВ и  $E_c-0.28$  эВ,  $E_v+0,35$  эВ; в Si<Ti> - ГУ  $E_c-0.20$  эВ,  $E_c-0.27$  эВ,  $E_v+0.30$  эВ.

4. Обнаружено, что диффузионное введение Zr, Ti и Hf приводит к снижению эффективности образования термических дефектов в 5-6 раз и радиационных дефектов в 3-4 раза и стабилизации параметров кремния.

5. Показано, что в кремнии, легированном Zr, Ti и Hf при выращивании, ГУ не наблюдаются, но последующая высокотемпературная обработка (ВТО) в интервале температур  $1000\div 1250^\circ\text{C}$  приводит к активации атомов ТПЭ и РЗЭ и образованию глубоких уровней.

6. Впервые установлено, что наличие лантана или эрбия в решетке Si увеличивает эффективность образования ГУ, связанных с дополнительно введенным цирконием, титаном и гафнием и стабилизирует их свойства.

7. Обнаружено, что присутствие примесей Zr, Ti и Hf в объеме подложки МДП-структур на основе Si, приводит к сдвигу ВЧ ВФХ в сторону отрицательных смещений по сравнению с контрольными образцами. Это свидетельствует об увеличении плотности поверхностных состояний МДП - структур и образовании положительного заряда на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub>.

8. Установлено, что наличие примесей Zr, Ti и Hf приводит к изменению распределения плотности ПС  $N_{ss}$  по ширине запрещенной зоны  $E_g$  полупроводника кремниевых МДП-структур.



**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**

**DALIEV SHAKHRUKH KHOJAKBAROVICH**

**THE INFLUENCE OF IMPURITIES IN Zr, Ti AND Hf ON  
ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF SILICON STRUCTURES**

**01.04.10 – Physics of semiconductors**

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

**TASHKENT – 2017**

**Theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD on physics and mathematical Sciences registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2017.1.DSc.FM.33**

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](http://fti-kengash.uz)) and on Information and educational portal "ZiyoNet" ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)).

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

**Official opponents:** **Kamalov Amangeldi Bazarbaevich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

**Zikrillaev Nurulla Fatkhullaevich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Leading organisation:** **Namangan 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](mailto: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. Bakhramov**  
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.** Today in the world of fast-paced semiconductor micro - and optoelectronics one of the promising directions is the study of the properties of impurities that create a variety of defective centers in semiconductors. In this respect, research aimed at studying the influence of refractory impurities on the electrophysical properties of silicon structures and the development of measures to improve the thermal stability and radiation resistance parameters of silicon MIS-structures are one of the main tasks.

Studying the interaction between impurity particles and structural defects in the semiconductor, the influence of heterogeneity of structure of a MIS-structure on the redistribution of impurities opens up the possibility of increasing the stability of the operating parameters of the circuits based on MIS-structures are the basic elements of modern electronics. In this respect, the task of scientific research, including in the following areas: the study of electrophysical properties of semiconductors alloyed with refractory elements and identification of deep levels generated by these impurities; the study of the influence of atoms of refractory elements in the processes of thermal and radiation defect formation in silicon; studies of the interaction atmospheric elements with uncontrolled technological impurities; study of influence of atoms of refractory elements on the parameters of the various silicon structures. Research carried out in this direction indicate the relevance of the topic of this thesis.

**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".

**Problem development status.** To date, the attention of scientists and developers focused on the study of the physical processes in silicon and silicon structures, as well as the development of methods of increase of stability of their parameters, scientists from the US and Japan, Milnes A., Struthers, J. D., Weber E. R., Y. Tokumari to improve the photosensitivity is used, the processes of alloying frontier silicon layers with non-traditional impurities (Ti, Ni, Gd, Sm etc.) in low concentrations, followed by thermal oxidation and the application of metal (Al,Cu,W) of the electrodes.

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

**Relevance of the dissertation research to the plans of scientific-research works.** The dissertation work performed at the National University of Uzbekistan in accordance with thematic plans grants tsnt RUz FM-2-038 "Study of physical processes in the bulk and at the interface of multilayer structures of the type metal-

insulator-semiconductor based on silicon, alloyed with refractory elements" (01.01.07 - 31.12.08.),–F2-081 "the Study of patterns of defect formation in the monocrystalline silicon of the impurity-defect associates and the dynamic processes of the formation of the hidden interface semiconductor - dielectric" (01.07.07–31.12.11.); EF-2-08 "Study of influence of radiation on the formation and annealing of defects in silicon and silicon multilayer structures with impurities of rare earth elements" (01.07.10-31.12.11 gg.) and EF-2-13 "the Influence of impurities of the titanium subgroup on electrophysical properties of silicon structures" (01.01.16-31.12.17.).

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

**The object of research** is monocrystalline silicon grown by the Czochralski method and floating zone Si zone melting, the impurity doped refractory Zr, Ti and Hf and MIS-structures based on them.

**The subject of research** – are the DLTS and PhC spectra and Si, doped Zr, Ti and Hf, effects of interaction between impurities refractory elements with uncontrolled impurities, the physical processes in MIS-structures with impurities of refractory elements.

**Research methods.** For research we used methods of nonstationary capacitance spectroscopy of deep levels, photocapitance and IR absorption.

**Scientific novelty of research** consist in the following: it is shown that the efficiency of the education levels of Zr, Ti, Hf in Si depends on technological regimes (temperature and duration of diffusion, and the speed postdiffusion cooling the samples);

discovered that silicon, doped with impurities of refractory elements in the grown, deep levels are not observed, but subsequent high-temperature treatment in the temperature range 1000÷1250°C leads to the activation of atoms of Zr, Ti, Hf, and the formation of deep levels.

it is established that the introduction of diffusion of impurities refractory elementov leads to a decrease in the efficiency of formation of thermal and radiation defects and stabilization of parameters of silicon;

for the first time found that the presence of rare earth impurities (lanthanum or holmium) in the lattice of Si increases the effectiveness of education deep levels, connected with additionally introduced by the hafnium, titanium or zirconium;

it is established that the presence of impurities Zr, Ti and Hf in the amount of the substrate silicon MIS structures, leads to a shift of the HF C-V curves toward negative displacements in comparison with control samples, which indicates an increase in the density of surface States of MIS structures and the formation of positive charge at the interface Si-SiO<sub>2</sub>.

**Practical results of research work** are as follows: developed technology of alloying the volume and surface layers of silicon MIS structures with impurities of refractory elements (Zr, Ti and Hf) and the conditions optimization of parameters of MIS structures by introduction of impurities;

developed ways to improve the thermal stability and radiation resistance parameters of silicon MIS-structures by introducing impurities of refractory elements.

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

**Scientific and practical value of the research results.** The scientific significance of the research results is that they allow you to figure out the patterns of defect formation in silicon, doped with various impurities.

The practical significance of the study lies in the fact that the results obtained to improve the thermal stability and radiation resistance parameters of silicon by introduction of refractory elements can be used in the manufacture of various semiconductor devices.

**Implementation of the research results.** Based on the study of processes of defect formation in silicon and silicon structures doped with refractory elements:

developed technology for producing structures with modified shallow working area on the basis of silicide of titanium – silicon is used in JSC "FOTON" Joint-stock company "Uzeltchanoat" (reference AK "Uzeltchanoat" dated 25 September 2017). The use of scientific results allowed to obtain the contact region with low series resistance to the diode structures based on silicon JSC "FOTON";

developed technology of alloying the volume and surface layers of silicon MIS structures of impurities of refractory elements (Zr, Ti and Hf) used in the performance of the grant FA-F3-Φ003 Institute of nuclear physics, Academy of Sciences of Uzbekistan and grant A-3-57 of Tashkent state technical University (information Agency for science and technology from 20 September 2017). The use of scientific results helped to increase the thermal stability of the sensor parameters on the basis of the compensated silicon.

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

**Publication of research results.** On the topic of the thesis the main contents set out in 33 scientific publications, including monographs, 9 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.** Dissertation consists of introduction, four chapters, conclusion and a list of references. The dissertation contains 128 pages of printed text including figures and tables.

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

**I бўлим (I часть, part I)**

1. Далиев Х.С., Утамурадова Ш.Б., Бозорова О.А., Далиев Ш.Х. Изучение свойств кремния, легированного гафнием при диффузии. «Доклады АН РУз», 2005, № 5, стр. 21-23 **(01.00.00. №7)**.
2. Utamuradova Sh. B., Daliev Kh. S., Kalandarov E. K., Daliev Sh. Kh. Features of the Behavior of Lanthanum and Hafnium Atoms in Silicon. Technical Physics Letters, 2006, Vol. 32, No. 6, pp. 469–470 **(№ 2 JIF, IF: 0.771)**.
3. Далиев Ш.Х., Рахмонов Ж.С., Утамурадова Ш.Б. Низкотемпературный отжиг уровней циркония в кремнии.- ДАН РУз, 2009, №6, с.45-47 **(01.00.00. №7)**.
4. Далиев Ш.Х. ИК-спектроскопия кремния, легированного лантаном и никелем. Узб.физ.журн., (Uzbek Journal of Physics ), Vol. 18 (№6), 2016, с. 388-391 **(01.00.00.№5)**.
5. Далиев Ш.Х. Исследование влияния титана и гафния на свойства объема и границы раздела Si-SiO<sub>2</sub> многослойных структур. Узб.физ.журн., (Uzbek Journal of Physics ), Vol. 19 (№1), 2017, с. 24-28 **(01.00.00.№5)**.
6. Daliev Sh.Kh. The influence of titanium on the properties of the volume and interface of Si-SiO<sub>2</sub> of silicon MIS-structures Science and world, International scientific journal, № 3 (43), 2017, Vol. I, p. 21-23 **(№ 5 GIF, IF: 0.325)**.
7. Daliev Sh.Kh. The deep centers in the silicon doped with zirconium. Science and world, International scientific journal, № 4 (44), 2017, Vol. I, p. 17-19 **(№ 5 GIF, IF: 0.325)**.
8. Daliev Sh. Kh., Vlasov S.I. Nonequilibrium processes in MIS-structures on the basis of silicon, doped with hafnium. Journal of Scientific and Engineering Research (JSAER), 2017, 4(4), p.11-13 **(№ 23 GIF, IF: 0.543)**.
9. Daliev Sh.Kh. Deep Levels of Zirconium in Silicon and Silicon Structures. World Journal of Engineering Research and Technology (WJERT), 2017, Vol. 3, Issue 6, p. 89 -94. **(№ 23 GIF, IF: 4.326)**.

**II бўлим (II часть, part II)**

10. Далиев Х.С., Утамурадова Ш.Б., Бозорова О.А., Далиев Ш.Х. Изучение свойств кремния, легированного гафнием при выращивании.- Естественные и технические науки, РАН, 2009, № 2(40), с.25-27.
11. Утамурадова Ш.Б., Рахмонов Ж.С., Далиев Ш.Х. Дефектообразование в кремнии, легированном цирконием. - Естественные и технические науки, РАН, 2009, № 2(40), с.31-33.

12. Далиев Ш.Х. Неравновесные процессы в объеме и на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> кремниевых МДП-структур с примесью титана. - Естественные и технические науки, РАН, 2009, № 6(44), с.53-55.
13. Власов С.И., Далиев Ш.Х. Влияние гафния на генерационные характеристики кремниевых многослойных структур. - Естественные и технические науки, РАН, 2010, № 6(50), с.52-54.
14. Далиев Ш.Х. Неравновесные процессы при легировании кремниевой подложки МДП-структур цирконием. Естественные и технические науки, РАН, 2012, № 5(61), с. 64-65,
15. Власов С.И., Далиев Ш.Х. Влияние атомов титана на параметры МДП-структур. Труды X-й Всероссийской научной конференции студентов–физиков и молодых ученых (ВНКСФ-10), г. Москва, 2004, ч.2, с.1171-1172.
16. Далиев Х.С, Далиев Ш.Х. Спектроскопия дефектов в кремнии, легированном гафнием и никелем. Труды IV-международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», Санкт-Петербург, июль, 2004, с.372-373.
17. Daliev Kh.S., Utamuradova Sh.B., Daliev Sh.Kh. Capacitance transient spectroscopy of radiation defects on the interface Si-SiO<sub>2</sub> of silicon MIS-structures. Тезисы докладов VIII-международной конференции «Физика твердого тела», август 2004 г., Алма-ата, с.86-87.
18. Далиев Ш.Х. Роль гафния в процессах дефектообразования в кремнии. VI-Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике, г. Санкт-Петербург, 2004, стр. 107.
19. Далиев Ш.Х. Дефектообразование в кремнии, легированном гафнием. Труды XI-Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных (ВНКСФ-11), г. Екатеринбург, 2005, стр. 554-555.
20. Власов С.И., Далиев Ш.Х. Исследование влияния  $\gamma$ -облучения на свойства переходного слоя Si-SiO<sub>2</sub>. Труды Международной научно-методической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников», г. Андижан, 2005, стр. 45-46.
21. Далиев Ш.Х. Влияние термообработки на свойства кремния с примесью гафния. Сборник тезисов XIII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «ЛОМОНОСОВ», г. Москва, МГУ, 2006, стр. 166-167.
22. Sh.B.Utamuradova, Kh.S.Daliev, S.I.Vlasov, Sh.Kh.Daliev. Effect of  $\gamma$ -irradiation on the behaviour of silicon doped with hafnium. The sixth International conference “Modern problems of nuclear physics”, Tashkent, 2006, p. 174-175.
23. Далиев Ш.Х. Емкостная спектроскопия дефектов в кремниевых МДП-структурах с примесью гафния. Материалы Международной научно-технической школы-конференции МИРЭА-2006, 5-9 декабря 2006 г., г. Москва, стр. 288-290.

24. Vlasov S.I., Daliev Sh.Kh. Radiation defects at the Si-SiO<sub>2</sub> Interface of MIS-Structures Based on Silicon Doped Zirconium. - VII Международная конф. «Современные проблемы ядерной физики», Ташкент, 2009 . сентябрь, с.87-88.
25. Далиев Ш.Х., Власов С.И. Исследование генерационных процессов в объеме и на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> кремниевых МДП-структур с примесями титана и гафния. Матер. 2-Междунар.конф. «Неравновесн. процессы в п\п и п\п структурах», Ташкент, 2009, с.35-37.
26. Далиев Ш.Х. Влияние примесей редкоземельных элементов на свойства системы Si-SiO<sub>2</sub> с термическим окислом, облученной гамма-квантами. Труды Международной научно-технической конференции «INTERMATIC-2009», Москва, 7 - 11 декабря 2009 г., с.177-179.
27. Власов С.И. Далиев Ш.Х. Изучение релаксационных явлений в кремниевых многослойных структурах с помощью емкостной спектроскопии. Труды XXII Междунар. Конф. «Релаксационные явлений в полупроводниках» в г. Воронеж, 2010, с.96-97.
28. Далиев Ш.Х., Арипджанова Х.А. Изучение воздействия лазерного излучения на свойства кремния, легированного гафнием. Матер. Международной конференции «Актуальные проблемы молекулярной спектроскопии конденсированных сред» Самарканд, сентябрь, 2016 г., с.40-41.
29. Daliev Sh.Kh., Bekmuratov M.B., Aripdjanova Kh.A. Study of relaxation processes in multilayer structures by non-stationary capacitance spectroscopy. Symposium proceedings IPS 2016 «New Trends of Development Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements and Prospects», 10-11 November 2016, Tashkent, Uzbekistan, p.240-241.
30. Daliev Sh. Kh. The study of the physical processes in the bulk and at the interface of mis structures based on silicon doped with impurities of the titanium subgroup Symposium proceedings IPS 2016 «New Trends of Development Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements and Prospects», 10-11 November 2016, Tashkent, Uzbekistan, p.169-170.
31. Далиев Ш.Х. Влияние гамма-облучения на поведение кремния, легированного гафнием. Матер. Международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», Ташкент, 13-14 июня 2017, с.112-113.
32. Далиев Ш.Х., Арипджанова Х.А., Хакимжонов С. Дефектообразование в кремниевых МДП-структурах с примесью циркония. Матер. Респ.научн.конф. «Неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах», Ташкент. 1-2 февр, 2017 г., С.89-90.
33. Sh.Kh.Daliev. Capacitive Spectroscopy of Defects in Semiconductors with Impurity of Zirconium. XXIII International School-Seminar "Spectroscopy of Molecules and Crystals" 20 September 2017, in Kyiv, Ukraine, p.211-212.

Автореферат «Тил ва адабиёт таълими» журнали таҳририятида ўзбек, рус ва инглиз (резюме) тилларида таҳрирдан ўтказилди (13.10.2017 йил).

Босишга рухсат этилди: 14.10.2017 йил  
Бичими 60x84/16, «Times New Roman»  
Гарнитурда рақамли босма усулида босилди.  
Шартли босма табоғи 3,0 . Адади 150. Буюртма № 66.  
Тошкент ахборот технологиялар университети  
“Aloqachi” нашриёт-матбаа марказида чоп этилди.  
Тошкент ш., Амир Темур кўчаси, 108-уй.

