

**ФАРҒОНА ПОЛИТЕХНИКА ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ФИЗИКА -
МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

НАМАНГАН МУҲАНДИСЛИК-ТЕХНОЛОГИЯ ИНСТИТУТИ

МИРЗАРАЙИМОВ ЖАҲОНГИР ЗОКИРЖАНОВИЧ

***Cu* ВА *Ir* АТОМЛАРИ БИЛАН МИКРО НОБИРЖИНСЛИ
ЛЕГИРЛАНГАН КРЕМНИЙНИНГ ЭЛЕКТРОФИЗИК ВА
РЕКОМБИНАЦИЯ ХОССАЛАРИ**

01.04.07 – Конденсирланган ҳолат физикаси

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

Фарғона-2022

УДК: 538.911, 935, 958, 975

**Физика-математика фанлари бўйича 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**

Мирзарайимов Жаҳонгир Зокиржанович

Cu ва *Ir* атомлари билан микро нобиржинсли легирланган кремнийнинг
электрофизик ва рекомбинация хоссалари..... 3

Мирзарайимов Жаҳонгир Зокиржанович

Электрофизические и рекомбинационные свойства кремния, микронеодно-
родно легированного атомами *Cu* и *Ir* 23

Mirzarayimov Jahongir Zokirjonovich

Electrophysical and recombination properties of silicon microinhomogeneously
doped with *Cu* and *Ir* atoms 43

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works..... 47

**ФАРҒОНА ПОЛИТЕХНИКА ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ФИЗИКА-
МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

НАМАНГАН МУҲАНДИСЛИК-ТЕХНОЛОГИЯ ИНСТИТУТИ

МИРЗАРАЙИМОВ ЖАҲОНГИР ЗОКИРЖАНОВИЧ

***Cu* ВА *Ir* АТОМЛАРИ БИЛАН МИКРО НОБИРЖИНСЛИ
ЛЕГИРЛАНГАН КРЕМНИЙНИНГ ЭЛЕКТРОФИЗИК ВА
РЕКОМБИНАЦИЯ ХОССАЛАРИ**

01.04.07 – Конденсирланган ҳолат физикаси

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

Фарғона-2022

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (Doctor of Philosophy) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2022.2.PhD/FM377 рақам билан қайд этилган.

Диссертация Наманган Муҳандислик-технология институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида (www.ferpi.uz) ва «ZiyoNet» ахборот-таълим порталида (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар: Махмудов Шерзод Ахмадович
Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD),
доцент

Расмий оппонентлар: Нуритдинов Иззатилла
Физика-математика фанлари доктори, профессор

Аскарлов Бахтиёр
Физика-математика фанлари доктори, доцент

Етакчи ташкилот: Ўзбекистон Миллий университети ҳузурида
Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника
илмий-тадқиқот институти

Диссертациянинг ҳимояси PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 рақамли Илмий Кенгашнинг 2022 йил "22" 12 соат "14-00" даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 150107, Ўзбекистон, Фарғона шаҳри. Фарғона кўчаси, 86 уй. Тел: (99873) 241-12-06, Факс: (99873) 241-12-06, e-mail: ferpi_info@edu.uz, Фарғона политехника институти мажлислар зали).

Диссертация билан Фарғона политехника институти Ахборот технологияларини жорий этиш бўйича танишиш мумкин. (139 рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 150100, Фарғона шаҳри. Фарғона кўчаси. 86 уй. Тел: (+99873) 241-13-03).

Диссертация автореферати 2022 йил "10" сентябрь кuni тарқатилди.
(2022 йил "09" сентябрь даги 008-А рақамли реестр баённомаси).



Н.Х.Юлдашев
Илмий даража берувчи
Илмий Кенгаш раиси, ф-м.ф.д., профессор

Б.З.Полвонов
Илмий даража берувчи
Илмий Кенгаш котиби, физика-математика
фанлари бўйича фалсафа доктори, доцент

К.Э. Онарқулов
Илмий даража берувчи
Илмий Кенгаш ҳузуридаги илмий семинар раиси,
ф-м.ф.д. профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда замонавий микроэлектроника соҳалари турли хил асбоб-ускуналарни тайёрлаш учун яримўтказгичли кремний монокристалли кенг қўлланилади. Ҳозирги кунда фан ва техниканинг ривожланиши ихчам ва ташқи таъсирларга чидамли ҳамда ўта сезгир бўлган ярим ўтказгичли асбоблар яратишни талаб қилмоқда. Бир қатор мамлакатларда бу борада янги структурали монокристаллини шакллантиришга бағишланган илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда. Бу борада кремний монокристаллини юқори ҳароратли диффузия технологияси билан намунада бир вақтнинг ўзида киритма+кислород ва вакансия + киритма пайдо бўладиган чуқур энергияли сатҳлар ҳосил қилувчи киритмалар киритиш орқали хоссалари турғун материаллар олиш бўйича кенг қўламли ишлар олиб бориш муҳим аҳамият касб этади.

Жаҳонда яримўтказгичнинг асосий материали ҳисобланган кремнийда чуқур энергетик сатҳ бериб унинг хоссаларини кенг оралиғда бошқаришга имкон берувчи киритмалар билан легирлаб, термо- ва радиациявий таъсирларни ўрганиш бўйича жуда кенг қўлланми ишлар олиб борилмоқда. Хусусан, кремний структурасида компенсирловчи киритма концентрациясининг кўпайиши билан чуқур энергетик сатҳ ва тутиб қолувчи сатҳлар вужудга келиши ҳамда уларнинг кинетик ҳодисалардаги ролининг ортиб бориши ҳисобига асосий бўлмаган заряд ташувчиларнинг яшаш вақтини камайиб бориши ёки ортиши айtilган. Бироқ чуқур энергетик сатҳ билан бойитилган кремний хоссаларини батафсил тадқиқ этилишига қарамай, шу вақтгача жумладан куйидаги илмий муаммолар ҳал этилмаган. Материалнинг электрофизик ва рекомбинацион хоссаларини киритмалар киритилиши ҳисобига ўзгаришининг ҳамма механизмларини тушунтирувчи ягона концепцияни ишлаб чиқиш; ушбу механизмлар бир вақтнинг ўзида рўй беришида кремнийнинг электрофизик ва рекомбинацион хоссаларининг турғунлигини таъминловчи тез диффузияланадиган киритмаларни излаб топиш. Берилган хоссали материални ташқи таъсирлар (диффузион совутиш, термик ишлов бериш ва нурланиш) шароитида олиш ярим ўтказгичли электрониканинг энг долзарб масаласи ҳисобланади.

Республикамизда амалий ва фундаментал илмий тадқиқотларнинг долзарб устувор йўналишларига, хусусан, кремний монокристаллини, ташқи таъсирларга чидамли, ҳарорат ва ёруғликка сезгирлигини ошириш борасидаги инновацион ишланмалар яратишга алоҳида эътибор берилмоқда. 2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегиясида, жумладан «Иқтисодиётни электр энергияси билан узлуксиз таъминлаш ҳамда “Яшил иқтисодиёт” технологияларини барча соҳаларга фаол жорий этиш, иқтисодиётнинг энергия самарадорлигини 20 фоизга ошириш» бўйича вазифалари белгиланган. Ушбу вазифаларни амалга оширишда, хусусан, Ядро энергетикаси, халқ хўжалигининг барча соҳаларида ҳажмий ва паст ўлчамли кристаллар оптик ва фотоэлектрик қурилмаларининг самаравийлигини, ишчи

параметрларини орттириш методлари ҳамда механизмларини яратиш муҳим ҳисобланади.

Мазкур диссертация ишида олиб борилган тадқиқотлар Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2021 йил 19 мартдаги «Физика соҳасидаги таълим сифатини ошириш ва илмий тадқиқотларни ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида» ги ПҚ-5032-сон, 2017 йил 30 ноябрдаги «Илмий ва инновацион фаолиятни интеграциялаш тизимининг самарадорлигини ошириш бўйича чора-тадбирлар тўғрисида» ПҚ-3416-сон, 2020 йил 10 июлдаги «Иқтисодиётнинг энергия самарадорлигини ошириш ва мавжуд ресурсларни жалб этиш орқали иқтисодиёт тармоқларининг ёқилғи-энергетика маҳсулотларига қарамлигини камайтиришга доир қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида» ПҚ-4779-сон, 2021 йил 9 апрелдаги «Ўзбекистон Республикасида қайта тикланувчи ва водород энергетикасини ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида» ПҚ-5063-сон қарорларида белгиланган вазифаларни бажаришга маълум даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг Республика фан ва технологияларни ривожланишининг устувор йўналишларига мос келиши. Диссертация иши республика фан ва технологиялар ривожланишининг III: “Энергетика, энергоресурс тежамкорлиги, транспорт, машина ва асбобсозлик, замонавий электроника, микроэлектроника, оптик ва электрон асбобсозлигини ривожланиши” ва IV: “Қайта тикланадиган энергия манбаларидан фойдаланиш усуллари ишлаб чиқиш, нанотехнология, фотоника ва бошқа замонавий технологиялар асосида янги технологиялар ва қурилмалар ишлаб чиқиш” устувор йўналишлари доирасида бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Илмий адабиётларда $Si <Cu>$ ва $Si <Ir>$ намуналарнинг электрофизик ва рекомбинацион хусусиятлари жуда яхши ўрганилган ва қуйидагилар аниқланган: кремнийдаги мис киритмаси 1273 К ҳароратларда юқори диффузия коэффициентига эга $\sim 2 \cdot 10^{-5}$ см²/с; кремнийдаги мис атомларининг аксарияти ($\sim 99,9\%$) электр нофаол ҳолатда бўлади. Компенсацияланган $n-Si <P, Cu>$ ва $p-Si <P, Cu>$ намуналарда В киритмаси иштирокисиз юқори солиштирма қаршилик ($100 \div 10^5$ Ом·см)ни таъминловчи бир нечта акцептор марказлари топилган. Кремнийга иридий атомлари киритилган намуналарда қуйидаги электрофизик хоссалари аниқланган: иридий ҳам кремнийда тез диффузияланувчи киритмалар (1273 К ва $\sim 2 \cdot 10^{-7}$ см²/с да) каторига киради ва юқори диффузия коэффициентига эга; иридий атомларининг катта қисми (99,9 %) кремнийда электр фаол ҳолатда бўлади; иридийнинг акцептор ва донор марказлари кенг диапазонда компенсирланган (В атоми иштирокисиз) кремний намунасини олиш имконини беради.

Сўнги 20 йил мобайнида россиялик олимлар, жумладан: А.А.Лебедев, В.Ф.Банний, Л.С.Смирнов, С.П.Соловьев, ва В.В. Козловскийлар томонидан кремний намуналарининг электрофизик параметрлари жадал ўрганилган. Америкалик олимлар А.А.Истратов, Э.Р. Веберлар кремнийнинг ёруғликка сезгирлик хоссаларини тадқиқ этишган.

Бугунги кунда Ўзбекистонлик олимлар М.С.Саидов, Р.А.Мўминов, М.К.Бахадирханов, С.Зайнабидинов, А.Т.Мамадалимов, Н.А.Султонов, М.Каримов, ва Ш.Махкамовлар ва бошқа кўплаб олимлар томонидан кўплаб монокристалл ва поликристалл яримўтказгич намуналарида ЧЭСли марказларнинг хоссаларини системали ўрганишган. Бироқ, ҳозирги кунга қадар термик ва радиациявий ишлов бериш усули билан мис ва иридий атомлари билан легирланган кремний намуналарини тайёрлаш технологияси, электрофизик ва рекомбинациявий хусусиятларини ўрганиш бўйича етарлича тадқиқотлар ўтказилмаган .

Диссертация мавзусининг диссертация бажарилаётган олий таълим муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.

Диссертация тадқиқоти Наманган муҳандислик-технология институти ва Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ядро физикаси институти ўртасидаги ҳамкорлик шартномасига асосан бажарилди. Тадқиқотнинг асосий тажрибалари Ядро физика институти "Қаттиқ жисмлар структуралари ўзгариши" лабораториясида амалга оширилди ва натижалар таҳлили Наманган муҳандислик-технология институтининг Физика кафедрасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади олдиндан нейтрон билан нурлантирилган ҳамда мис ва иридий атомлари билан легирланган ядровий-трансмутацияланган кремнийнинг электрофизик ва рекомбинацион хоссаларига микро нобиржинслиликнинг таъсирини ўрганишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

мис ва иридий билан турли концентрацияда легирланган кремний намуналарини олиш;

n- ва *p*-типи кремний намуналаридаги асосий бўлмаган заряд ташувчиларнинг яшаш вақтига мис ва иридий атомлари концентрациясининг таъсирини ўрганиш;

$Si\langle B,P,Cu \rangle$ ва $Si\langle B,P,Ir \rangle$ намуналарда термик ва радиациявий ишлов беришда содир бўладиган жараёнлар механизмларини аниқлаш;

паст ҳароратли тоблашнинг $Si\langle B,P,Cu \rangle$ ва $Si\langle B,P,Ir \rangle$ намуналарнинг электрофизик хоссаларига таъсирини ўрганиш;

$Si\langle B,P,Cu \rangle$ ва $Si\langle B,P,Ir \rangle$ намуналарида γ -нурланиш таъсирида радиациявий нуқсонлар ҳосил бўлишининг самарадорлигига мис ва иридий атомларининг таъсирини ўрганиш;

$Si\langle B,P,Cu \rangle$ ва $Si\langle B,P,Ir \rangle$ намуналар асосида радиацияга чидамли яримўтказгичли қайд қилгичларни яратиш ва уларни амалиётда қўллаш имкониятларини кўриб чиқиш.

Тадқиқот объекти. Тез диффузияланувчи мис ва иридий киритмалари билан легирланган ҳамда олдиндан нейтрон билан нурлантирилган кремний.

Тадқиқотнинг предмети. Олдиндан нурлантирилган кремний намунасининг электрофизик, рекомбинацион хоссалари, тез диффузияланувчи мис ва иридий киритмалари билан легирланган кремнийга термик ҳамда радиациявий ишлов бериш жараёнлари.

Тадқиқот усуллари: ушбу ишда Холл коэффиценти усули билан намуналарнинг солиштирма қаршилиги, ҳаракатчанлиги, концентрацияси ва

стационар фотоўтказувчанлик методи билан заряд ташувчиларнинг яшаш вақти аниқланган. Мис ва иридий киритмалари ВУП-4 ускунасида вакуумда пуркаш усули билан ва кейин СУОЛ 125 печида юқори 1150 °С ҳароратда диффузия қилиш орқали киритилган. Чуқур энергетик сатҳларни ўлчаш учун Шоттки диоди асосида ишловчи DLTS асбоби ёрдамида ностационар сифимли спектроскопия методидан фойдаланилди. Атом куч микроскопи ёрдамида n-Si<P,P,Cu>, n-Si<P,P,Ir> намуналарнинг сирт юзаси текширилди.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

n-Si<P,P,Cu>, n-Si<P,P,Ir> намуналар 10^{16} - 10^{18} нейтр./см² оралиғида нейтрон билан нурлантирилган кремнийдаги мис ҳамда иридий киритмаларнинг электр фаол атомларининг концентрацияси, нурлантирилмаган кремнийдагига нисбатан 1,5 баробар кўплиги аниқланган;

олдиндан 10^{16} - 10^{18} нейтр./см² оралиғида нейтрон билан нурлантирилган ва мис киритма атомлари билан легирланган кремний намуналарида асосий бўлмаган заряд ташувчилар яшаш вақти 10^{-5} с гача ошганлиги, нурлантирилмаган Si<P,Cu> намуналарда эса 10^{-7} с эканлиги, иридий киритма атомлари билан легирланган кремний намуналарида асосий бўлмаган заряд ташувчилар яшаш вақти 10^{-4} с гача ортиши, нурлантирилмаган Si<P,Ir> намуналарда эса 10^{-5} с эканлиги аниқланган;

мис атомлари билан легирланган кремнийдаги асосий бўлмаган заряд ташувчиларини яшаш вақтининг қиймати кислородли ($>10^{17}$ см⁻³) намуналарда 10^{-5} с гача ортиши ва кислородсиз намуналарда 10^{-8} с гача камайиши ҳамда иридий билан легирланган намуналарда 10^{-5} с гача ортиши ва уларнинг кислородга боғлиқ эмаслиги аниқланган;

юқори 1150 °С ҳароратларда киритмалар киритилган Si<B,P,Cu>, Si<B,P,Ir> кремнийдан ташқи таъсирларга чидамли қайд қилгичлар олиш технологияси ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари. n-типли олдиндан нейтрон билан нурлантирилган ва мис киритмаси билан легирланган кремний асосида 273÷498 К ҳарорат оралиғида ишлайдиган иссиқликни сезувчи n⁺-n-n⁺- структурали намуналар тайёрлаш таклиф қилинди.

Юқори ҳароратда киритма киритилган ташқи таъсирларга чидамли Si<B,P,Cu>, Si<B,P,Ir> асосида қайдқилгич ишлаб чиқариш технологияси яратилди.

n-типли ташқи таъсирларга чидамли Si<B,P,Cu>, Si<B,P,Ir> кремнийдан юқори сезгирли фото- ва терморезисторлар ясаш мумкинлиги кўрсатилди.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги замонавий, юқори аниқликдаги усул ва ускуналарнинг қўлланилганлиги ҳамда назарий ва амалий тадқиқотлар билан илмий асосланганлиги, намуналарга ишлов беришнинг яхши маълум ва асосланган технологик усуллари билан фойдаланилганлиги билан, шунингдек улар умумий физикавий қонуниятларга мувофиқлиги билан асосланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот ишининг илмий аҳамияти кремнийга юқори ҳароратларда мис (Si<B,P,Cu>) ва

иридий ($p\text{-Si}\langle B,P,Ir\rangle$) атомларини диффузия қилиш ва бундай намуналарни ташқи омилларга чидамликни оширувчи мавжуд учта механизмни бир вақтнинг ўзида қўлланадиган намуналар тайёрланиб, ундан олинган натижалар тез диффузияланувчи киритмалар билан легирланган намуналарда юз берадиган ходисаларнинг механизмини очиб беради, бу эса хароратга ва радиацияга барқарор ярим ўтказгич асбоблар(фотодатчик,термодатчик ва радиацион датчиклар) яратишга физикавий асос бўлади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Яримўтказгич хоссасига эга ($Si\langle B,P,Cu\rangle$), ($Si\langle B,P,Ir\rangle$) структуралардан ташкил топган элементларининг электрофизик хусусиятларини ва уларни тайёрлаш усулини ўрганишда олинган натижалар асосида:

олдиндан нурлантирилган мис ва иридий атомлари билан легирланган кремний намуналарда нурлантирилмаган намуналарга нисбатан харорат ва радиацияга барқарорлигининг ортишига, иридий намуналарида эса камайиши бўйича олиб борилган натижаларидан Ўзбекистон Миллий университети хузуридаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти томонидан 2017-2020 йилларда бажарилган ОТ-Ф2-11 “d-элементлар қириндилари билан легирланган кремнийнинг сирт қатламлари ва ҳажмида наноўлчамли нуқсонларнинг шаклланиш қонуниятларини тадқиқ этиш” мавзусидаги фундаментал лойиҳани бажаришда фойдаланилган. (ЎЗМУ хузуридаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти томонидан 2021 йилнинг 17-декабрдаги №01ИК/1-113 рақамли маълуматномаси). Мазкур тадқиқот натижалардан фойдаланиш d-элементлар қириндилари билан легирланган кремний олиш технологиясини оптималлаштиришга олиб келган, ҳарорат ва радиацияга барқарорлиги 2 баробар ортиши аниқланган. Бундан ташқари кремнийнинг сирт қатламлари ва ҳажмида наноўлчамли нуқсонларнинг концентрацияси 2-3 баробар камайишига олиб келган;

олдиндан нурлантирилган ва мис киритма атомлари билан легирланган кремний намуналарида асосий бўлмаган заряд ташувчиларнинг яшаш вақти ўзгариши бўйича олиб борилган натижаларидан Андижон машинасозлик институти Ф-2-001 рақамли «Радиация таъсирида GaAs/Ge/ZnSe яримўтказгичли қаттиқ қоришмасида фотосезгирлик ва заряд ташувчиларнинг ўтиши» мавзусидаги лойиҳасида қўлланилган. (Андижон машинасозлик институти томонидан 2021 йилнинг 17-декабрдаги №38-05/1788 сонли маълумотномаси.). Натижада кислородли ($> 10^{17}\text{см}^{-3}$) ва кислородсиз мис атомлари билан легирланган кремний асосий бўлмаган заряд ташувчиларининг яшаш вақти қиймати мос равишда ортиши ҳамда камайиши аниқлаш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертациянинг тадқиқот натижалари 6 та халқаро ва 4 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 16 та илмий иш чоп этилган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари

асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 6 та мақола, жумладан, 3 таси хорижий ва 3 таси республика журналларида нашр қилинган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг ҳажми 115 бетни ташкил этган, жумладан 30 та расми ва 15 та жадвали рўйхатини ўз ичига олади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг Республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, мавзу бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи ва муаммонинг ўрганилганлик даражаси келтирилган. Тадқиқотнинг мақсади, вазифалари, объекти ва предмети тавсифланган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг назарий ва амалий аҳамияти очиб берилган. Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар берилган.

Диссертациянинг «**Кремнийда радиациявий нуқсонлар**» деб номланган биринчи бобида ҳозирги замон адабиётларида келтирилган маълумот ва натижалар таҳлил қилинган.

Ушбу бобда киритмали ва радиациявий нуқсонлар, рекомбинация хусусиятлари, ҳамда олдиндан радиациявий нуқсонлар ва киритма атомлар билан компенсацияланган кремнийдаги радиацион ҳодисалар, чуқур энергетик сатҳга эга бўлган кремнийда радиациянинг таъсирини таҳлил қилинган.

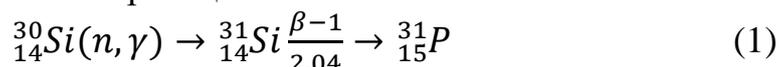
Ярим ўтказгичли материалларда заряд ташувчиларнинг яшаш вақти (τ), ҳосил бўлиш жараёни, чуқур энергетик сатҳлар, рекомбинациядан кейинги τ ни ўзгариши ва дунё олимлари томонидан кремний намунасини асосида таёрланган термо қайд килгичларнинг айрим физик параметрлари таҳлили келтирилган.

Булардан келиб чиққан ҳолда диссертация ишининг мақсад ва вазифалари белгиланган.

Диссертациянинг «**Мис ва иридий билан легирланган кремнийнинг электрофизик ва рекомбинациявий хоссалари**» деб номланган иккинчи бобида, тадқиқотларни ўтказишда компенсирланган кремний олиш учун фосфор (P) ва бор (B) билан легирланган n- ва p-типдаги намуналардан фойдаланилди. Намуналар Чохральский усули билан ўстирилган. Биз кремнийдаги кислород микдори $(5 \div 10) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ га тенг ва дислокацияларнинг зичлиги 10^4 см^{-2} , солиштирма қаршилиги $\rho \approx 3 \div 100 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ оралиғида бўлган n- ва p-тур намуналардан фойдаланган. Бундан ташқари нейтрон билан легирланган (p-Si <B, P>) p-тип кремнийдан ҳам фойдаланилди.

Радиациявий компенсирланган n- ва p- тип кремний олиш учун, 10 МВт қувватли, нейтронлари оқимининг зичлиги $\sim (0,002 \div 8) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ бўлган ВВР-СМ реакторининг икки горизонтал ва вертикал каналларида $\sim 320 \text{ К}$

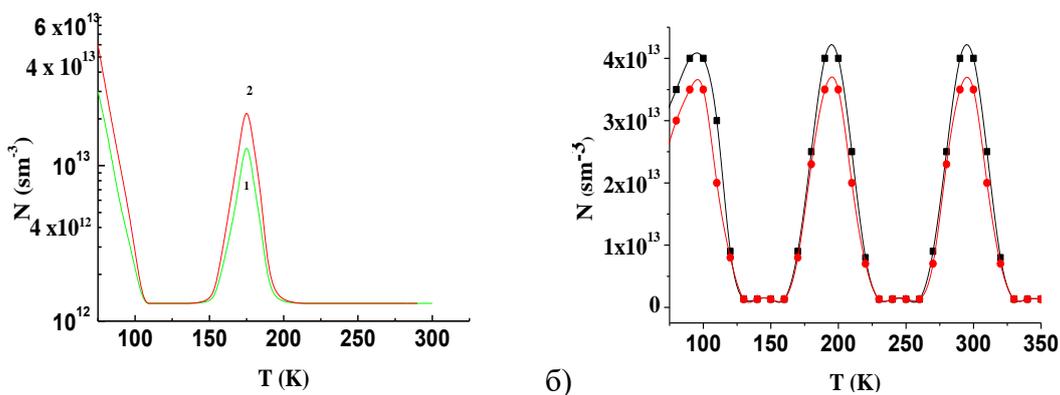
хароратда ўтказилди. Компенсирланган p – типдаги кремний олиш учун, ^{30}Si секин нейтрон таъсирида ^{31}P айланиш реакциясига асосланган.



Киритилган фосфор концентрациясини $N_p=1,7 \cdot 10^{-4} \cdot \Phi$ формула орқали ҳисоблаш мумкин. Бу ерда Φ -секин нейтронларнинг оқим зичлиги, $\text{см}^{-2}\text{сек}^{-1}$.

Намуналар нурлантирилгандан кейин СУОЛ 125 горизонтал печида ~ 1150 °C ҳароратда 30 минут қиздирилиб ~ 30 (250) град/мин. тезликда хона ҳароратига тушгунча совитилди. Юзасидаги оксид қатламини олиш учун HF кислотасида $30 \div 150$ секунд химик ишлов бериб ушлаб турилди. Сўнгра намунани дистилланган сувда қайнатилди ва тозалаб ювиб ташланди.

Диссертациянинг “**Мис ва иридий билан легирланган кремнийнинг электрофизик ва рекомбинациявий хоссаларига ташқи таъсирларни ўрганиш**” деб номланган учинчи бобида тайёр II-тип $n\text{-Si}\langle P, P, \text{Cu} \rangle$ намуналарида 1150 °C ҳароратли термодиффузия қилингандан сўнг DLTS спектрларида иккита максимум кузатилади (1- (а) расм). $E_1=E_c-(0,15 \pm 0,02)$ эВ ($\sigma_n = 5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$) ва $E_2=E_c-(0,22 \pm 0,02)$ эВ ($\sigma_n=6 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$), $n\text{-Si}\langle P, P, \text{Ir} \rangle$ II-тип намуналарида 1150 °C ҳароратли термодиффузиядан сўнг учта максимум кузатилади $E_1=E_c-(0,17 \pm 0,02)$; $E_2=E_c-(0,33 \pm 0,02)$; $E_3=E_c-(0,54 \pm 0,02)$ (1-(б) расм).



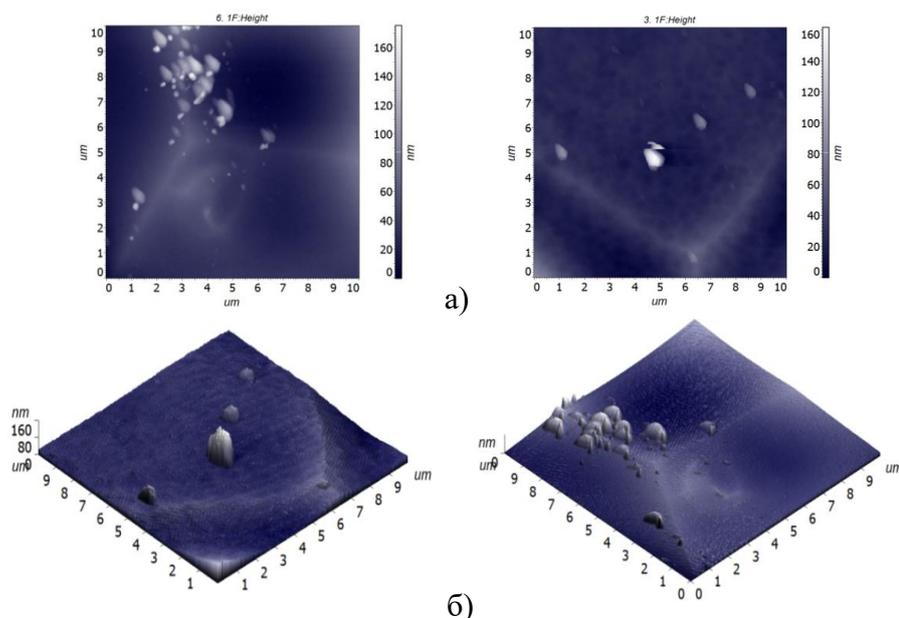
1-расм. Намуналарнинг DLTS спектрлари а) $n\text{-Si}\langle P, B, \text{Cu} \rangle$, 1- II тип $E_1=E_c-(0,15 \pm 0,02)$ эВ; $E_2=E_c-(0,22 \pm 0,02)$ эВ; 2-I тип $E_1=E_c-(0,15 \pm 0,02)$ эВ; (Термодиффузия 1150 °C). б) $n\text{-Si}\langle P, B, \text{Ir} \rangle$, 1-II тип $E_1 = E_c-(0,17 \pm 0,02)$ эВ; $E_2 = E_c-(0,33 \pm 0,02)$ эВ; $E_3 = E_c-(0,54 \pm 0,02)$ эВ; (Термодиффузия 1150 °C).

Шуни таъкидлаш керакки, аниқланган энергетик сатҳлар концентрацияси $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ дан катта бўлмайди, аммо унинг қиймати диффузия ҳарорати ва диффузиядан сўнг совутиш тезлигига боғлиқ бўлади. $n\text{-Si}\langle P, P, \text{Cu} \rangle$ I-тип намуналарида сатҳлар концентрацияси II-тип намуналаридан 5-10 марта кичик бўлади.

Кўрсатилган энергетик сатҳлар олинган назорат намуналарда аниқланмаган. Бу шуни билдирадики, бундай марказларнинг ҳосил бўлиши масалан, мис ва иридийнинг назоратсиз аралашмалари ҳамда иридий ваканцияларига боғлиқ бўлиши мумкин. Мис ва иридий билан легирланган оддий кремний намуналарга нисбатан нейтрон билан легирланган намуналарда

мис ва иридий киритмаларининг концентрацияси кўпроқ бўлиши кузатилди. Шундан сўнг, мис ва иридий билан легирланган кремнийнинг тузилиши, ўлчамлари ва аралашма нуқсонлари тақсимои ўрганилди.

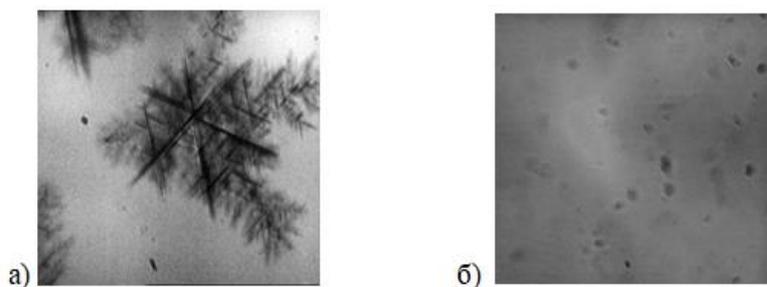
Намуналар $n\text{-Si}\langle P,P,Cu\rangle$ ва $n\text{-Si}\langle P,P,Ir\rangle$ сиртининг рельефи морфологиясини атом қувватли микроскон АКМ ёрдамида олинган намуналар 2-расмда тасвирланган. $n\text{-Si}\langle P,P,Cu\rangle$ сиртида баландлиги $h\approx 160$ нм кенглиги $d\approx 150$ нм бўлган майдонлар (2(а)-расм) ва $n\text{-Si}\langle P,P,Ir\rangle$ сиртида баландлиги $h\approx 10$ нм кенглиги $d\approx 30$ нм бўлган майдонлар (2(б)-расм) шаклланганлиги аниқланди.



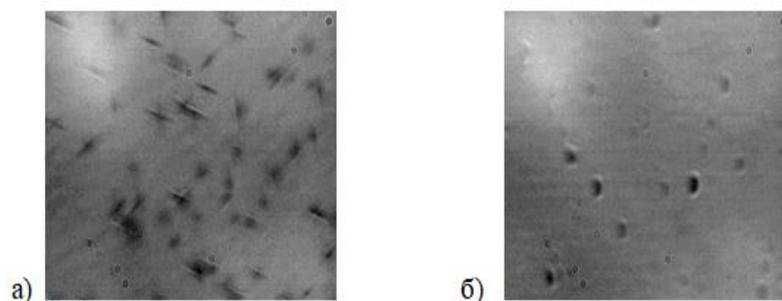
2-расм. Атом спектрал микроскопи ёрдамида $n\text{-Si}\langle P,P,Cu\rangle$ ва $n\text{-Si}\langle P,P,Ir\rangle$ намуналардан олинган икки ўлчовли (а) ва уч ўлчовли (б). II-тур яний тез совитилган намуналарининг тасвири.

Атом спектрал микроскон ёрдамида олинган маълумотлар шуни кўрсатадики, қаттиқ эритма $n\text{-Si}\langle P,P,Cu\rangle$ ва $n\text{-Si}\langle P,P,Ir\rangle$ лардаги мис ва иридий нано-оралиқлари геометрик гумбаз шаклига эга (2-а,б расм). Бу оролчаларнинг натурал ўлчами $30\div 160$ нм, асоси эса доира шаклга эга бўлиб, уни дўнглик-деб аталади. Мис ва иридий наноструктураларида бундай шаклларнинг пайдо бўлиши одатда дўнглик-фазалари конфигурациясидаги эластик кучланишларнинг кучли релаксацияси билан тушунтирилади.

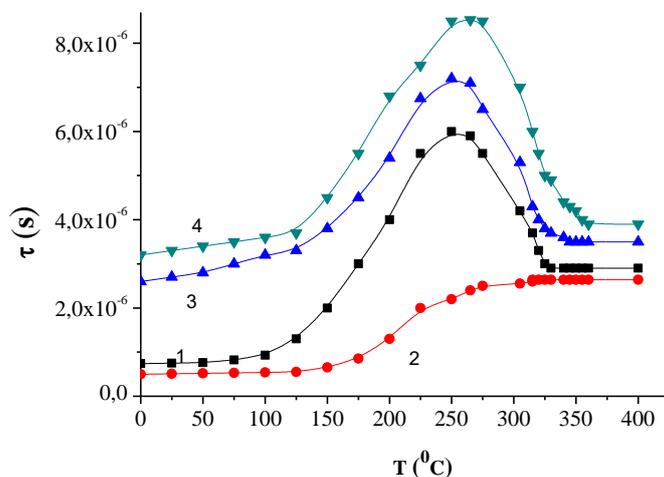
Намуналарининг $Si\langle Cu\rangle$ микросуратлари 3-расмда келтирилган, қайсики ўзида бир нечта олти ва тўрт баргсимон мис атомлари кластерларнинг ўзаро боғланишини намоён этадиган юлдузсимон нуқсонлар ва $Si\langle Ir\rangle$ намуналарининг микросуратларида игнасимон нуқсонлар кўринишида бўлиши 4-расмда тасвирланган. Мис кластерлари ўлчами $10\div 35$ мкм гача, иридий кластерлари ўлчамлари эса $1\div 5$ мкм гача бўлиши ва кристалл хажми бўйлаб занжир кўринишида жойлашгани аниқланди.



3-расм. Олдиндан нейтрон билан легирланган кремнийга мис киритмалари киритилгандан кейин тез (а) ва секин (б) совитилган ҳолатида олинган микросуратлари, (10 мкм қадамли микрометрик шкалада) термодиффузия ҳарорати 1150 °С.



4-расм. Олдиндан нейтрон билан легирланган кремнийга иридий киритмалари киритилгандан кейин тез (а) ва секин (б) совитилган ҳолатида олинган микросуратлари, (10 мкм қадамли микрометрик шкалада) термодиффузия ҳарорати 1150 °С



5-расм. n-типли кремний намуналар изохрон қиздириш орқали асосий бўлмаган заряд ташувчилар яшаш вақтини совутиш тезлигига боғлиқлиги.

1 - $n\text{-Si}\langle P,P \rangle$ НБЛК;

2 - $n\text{-Si}\langle P,Cu \rangle$ мис билан легирланган кремний;

3 - $n\text{-Si}\langle P,P,Cu \rangle$ олдиндан нейтрон билан легирланган кремнийга мис киритма киритилган;

4 - $n\text{-Si}\langle P,P,Ir \rangle$ олдиндан нейтрон билан легирланган кремнийга иридий киритма киритилган ҳолларда асосий бўлмаган заряд ташувчилар яшаш вақтининг температурага боғлиқлиги.

Олдиндан нейтрон билан нурлантирилган n-типли кремнийга мис ва иридий киритмаларини термодиффузия қилингандан сўнг намуналарнинг асосий бўлмаган заряд ташувчилар яшаш вақтини ҳароратга боғлиқлиги 5-расмда кўрсатилган.

Намумаларнинг совутиш тезлигига қараб икки турга ажратилган I (тез совитилган, 250 град/мин) ва II типдаги (секин совитилган, 30 град/мин) кремнийда асосий бўлмаган заряд ташувчилар яшаш вақтига мис ва иридий таъсирини ўрганишдан олинган натижалар 1-жадвалда келтирилган. Оддий намунага нисбатан нурлантирилган намуналарга мис киритмаси киритилса, заряд ташувчиларни яшаш вақти 10 баробар ортиши аниқланди, иридий киритмаси киритилса эса 100 баробар ортгани аниқланди.

1-жадвал

Мис ва иридий билан легирланган I ва II типдаги n- ва p-типли кремний намуналарида асосий бўлмаган заряд ташувчилар яшаш вақтлари

Намуна типи	T _{диф} = 1050 °C		T _{диф} = 1100 °C		T _{диф} = 1150 °C	
	I типт, с.	II типт, с.	I типт, с.	II типт, с.	I типт, с.	II типт, с.
n-Si<P>	9·10 ⁻⁷	7,4·10 ⁻⁷	1·10 ⁻⁶	5,4·10 ⁻⁷	7·10 ⁻⁷	4,3·10 ⁻⁷
n-Si<P,P>	6·10 ⁻⁷	5·10 ⁻⁷	3·10 ⁻⁶	2,4·10 ⁻⁷	3,7·10 ⁻⁷	2,3·10 ⁻⁷
n-Si<P,Cu>	9·10 ⁻⁷	2,6·10 ⁻⁶	1,6·10 ⁻⁶	3,8·10 ⁻⁶	5,3·10 ⁻⁶	4,6·10 ⁻⁶
n-Si<P,P,Cu>	1,5·10 ⁻⁶	3,2·10 ⁻⁶	2,8·10 ⁻⁶	5,1·10 ⁻⁶	7,2·10 ⁻⁶	7,8·10 ⁻⁶
n-Si<P,Ir>	3,3·10 ⁻⁵	3,8·10 ⁻⁵	4,7·10 ⁻⁵	6,7·10 ⁻⁵	7,6·10 ⁻⁵	8,8·10 ⁻⁵
n-Si<P,P,Ir>	3,6·10 ⁻⁵	4,3·10 ⁻⁵	5,7·10 ⁻⁵	7,3·10 ⁻⁵	8,6·10 ⁻⁵	9,8·10 ⁻⁵
p-Si	4,7·10 ⁻⁷	8,8·10 ⁻⁷	1,18·10 ⁻⁶	1,3·10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	1,6·10 ⁻⁶
p-Si<B,P>	5,8·10 ⁻⁷	9,6·10 ⁻⁷	1,3·10 ⁻⁶	1,6·10 ⁻⁶	1,7·10 ⁻⁶	2,3·10 ⁻⁶
p-Si<B,Cu>	2,6·10 ⁻⁶	2,2·10 ⁻⁶	3·10 ⁻⁶	3·10 ⁻⁶	4,8·10 ⁻⁶	4,7·10 ⁻⁶
p-Si<B,P,Cu>	4,5·10 ⁻⁶	4,8·10 ⁻⁶	6,4·10 ⁻⁶	6,2·10 ⁻⁶	7,6·10 ⁻⁶	8,8·10 ⁻⁶
p-Si<B,Ir>	2,3·10 ⁻⁵	3,5·10 ⁻⁵	4,2·10 ⁻⁵	5,8·10 ⁻⁵	6,6·10 ⁻⁵	8,8·10 ⁻⁵
p-Si<B,P,Ir>	3,1·10 ⁻⁵	4,1·10 ⁻⁵	4,8·10 ⁻⁵	6,2·10 ⁻⁵	7,2·10 ⁻⁵	9,3·10 ⁻⁵

Мис ва иридий билан легирланган кремний намуналарнинг радиация таъсирида электрофизик, рекомбинацион хусусиятларининг ўзгаришини билиш мақсадида уларни γ-нурлари билан турли дозаларда нурлантирилди.

Қилинган тажрибалар асосида заряд ташувчиларнинг яшаш вақтларининг ўзгаришини $p - Si < B, P >$, $p - Si < B, P, Cu >$ ва $p - Si < B, P, Ir >$ намуналардаги γ- нурланиш дозасига боғлиқлиги кўриб чиқилди ҳамда эгри чизиклар заряд ташувчиларнинг яшаш вақтини ўзгаришини радиация (нурланиш) коэффиценти K_{τ} катталиқ қийматларини ҳисобланди.

Тажрибаларда келтирилган соҳалар радиация коэффиценти K_{τ} катталиги $\frac{\Delta \tau}{\Delta F}$ дозасига боғлиқлиги аниқланди. Бошланғич нурланиш босқичида $\sim 4 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$ дозасигача легирлаган ва кремнийда заряд ташувчиларнинг яшаш вақтининг ўзгариши қуйидаги формулалар билан аниқланди.

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + K_{\tau} F \quad \text{ёки} \quad \tau = \frac{\tau_0}{1 + \tau_0 K_{\tau} F}$$

бу ерда τ - ва τ_0 – заряд ташувчиларнинг нурланишдан олдинги ва кейинги яшаш вақти, F – γ -нурланишнинг флуенси, K_{τ} - заряд ташувчиларнинг яшаш вақтида γ -нурланишнинг ўзгариш коэффициенти, K_{τ} нинг қийматлари 2-жадвалда келтириб ўтилган.

2-жадвал.

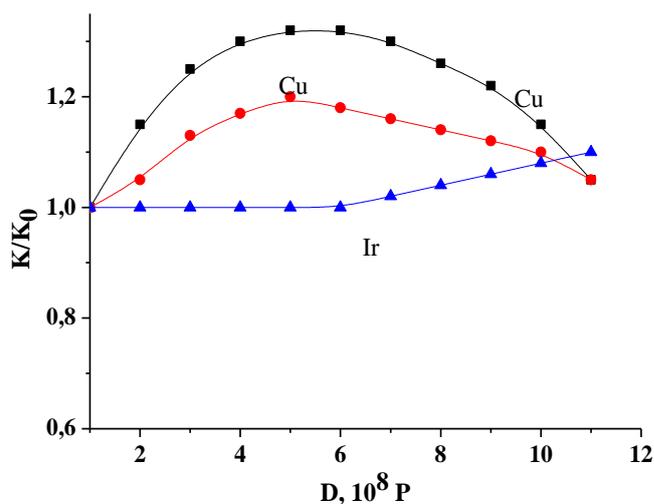
Легирланган р-типли ва назорат кремний намуналарининг γ - нурланишдан олдинги ва кейинги параметрлари

Намунани	R Ом·см	T _{диф}	Совутиш тезлиги, град/мин	N, см ⁻³		τ_0 , с	K _{τ} , см ² /с
				N _{обш.}	N _{акт.}		
p-Si<B,P>	10	1075	250	5·10 ¹⁷	2·10 ¹³	1,2·10 ⁻⁷	9,5·10 ⁻¹²
p-Si<B,P,Ir>	10.1				≤10 ¹²	5·10 ⁻⁵	5,4·10 ⁻¹²
p-Si<B,P,Cu>	9.8				4,6·10 ⁻⁶	7,8·10 ⁻¹²	
p-Si<P, Ir>	9,1	1100	250	9·10 ¹⁷	10 ¹⁴	3,2·10 ⁻⁷	1,2·10 ⁻¹²
p-Si<P,Cu>	8				8·10 ¹³	4,5·10 ⁻⁶	1,9·10 ⁻¹²
p-Si<B,P,Ir>	13				2·10 ¹⁴	3,2·10 ⁻⁷	6,4·10 ⁻¹²
p-Si<B,P,Cu>	12.8				10 ¹⁴	4,5·10 ⁻⁶	9,8·10 ⁻¹²
p-Si<B,P>	11	1150	250	1,2·10 ¹⁸	6·10 ¹³	1,6·10 ⁻⁶	4,5·10 ⁻¹²
p-Si<P,Ir>	9,8				5,9·10 ⁻⁷	2,9·10 ⁻¹³	
p-Si<P,Cu>	9,6				10 ¹⁴	6,8·10 ⁻⁶	3,3·10 ⁻¹³
p-Si<B,P,Ir>	15.8				4·10 ¹⁴	3,2·10 ⁻⁷	5,4·10 ⁻¹³
p-Si<B,P,Cu>	13.2				3·10 ¹⁴	4,5·10 ⁻⁶	8,8·10 ⁻¹³
p-Si<B,Ir>	25	1200	250	1,8·10 ¹⁸	7·10 ¹⁴	7,3·10 ⁻⁵	1,5·10 ⁻¹³
p-Si<B,Cu>	16				4·10 ¹⁴	9,2·10 ⁻⁶	2,7·10 ⁻¹³
p-Si<B,P,Ir>	3500				1,5·10 ¹	3,2·10 ⁻⁷	7,4·10 ⁻¹³
p-Si<B,P,Cu>	250				8·10 ¹⁴	4,5·10 ⁻⁶	2,8·10 ⁻¹⁴

Кремнийдаги *Si* ва *Ir* аралашма маркасларининг ҳосил бўлишига нурланишнинг таъсирини аниқлаш учун намуналар 10⁹ Р дозагача (40÷50°С дан ошмаган ҳароратда) γ -нурланиш берилди. Нурланиш дозаси ортиши билан фотосезгирлик – K ни маълум интервалида легирланган кремнийдаги нисбий ўзгариши маълум флюенсларда γ -квантга нисбатан турлича бўлши 8-расмдан кўриниб турибди. Яъни кремнийдаги аралашмаларнинг эрувчанлиги ва диффузия коэффициенти қанча катта бўлса, K нинг ортиши шунча кучли бўлиши, кейинчалик эса аксинча камайиши кузатилди. Фотосезгирлик – K нинг қийматининг ортиши қуйидагича тушунтирилади: аралашмаларнинг кремнийга диффузияси вақтида рекомбинация маркаслари бир вақтда киритилади ва кремнийнинг дастлабки микро-ўтказувчанлиги ортади.

Қуйидаги *p-Si<B,P,Cu>*, *p-Si<B,P,Cu>* ва *p-Si<B,P,Ir>* намуналарда нурланиш дозаси янада ортирилса ва дастлабки ҳолат билан тақосланса, *Si* ва *Ir* катта диффузия коэффициентиغا эга. Эрувчанлиги туфайли нурланиш вақтида легирланган кремнийда электр фаол аралашмаларнинг маркаслари ортади. Ўтказувчанлик бўйича микро бир жинсли эмаслиги камаяди, яъни

юқори ва кичик Ом ли соҳалар орасидаги тўсиқ камаяди ва рекомбинацион марказлар ортади, натижада намунадаги фотосезгирлик камаяди.



8-расм. Олдиндан нейтрон билан легирланган кремнийга мис ва иридий атомлари киритилган намунанинг нурланиш дозаси ортиши билан фотосезгирлигининг γ -нурланиш флюенсига нисбатан ўзгариши келтирилган.

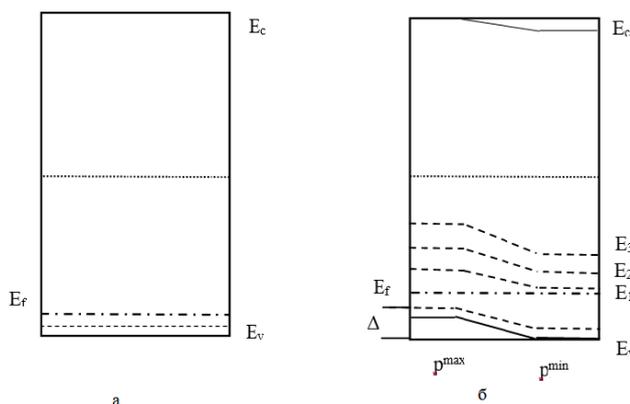
Диссертациянинг “Мис ва иридий атомлари билан легирланган кремний асосида датчиклар олиш”. деб номланган тўртинчи бобида Кремнийнинг 1150°C ҳароратда диффузия қилингандан сўнг потенциал тўсиқ, $p\text{-Si}\langle B \rangle$, $p\text{-Si}\langle B, P \rangle$ намуналарида деярли ўзгармаганлиги кузатилди. Радиация билан нурлантирилган $p\text{-Si}\langle B, P, Ir \rangle$ ва $p\text{-Si}\langle B, P, Cu \rangle$ намуналарда эса оддий намунага нисбатан иридийда киритмаси билан бойитилган кремнийда потенциал тўсиқ 3 мартагача ортди. Мис киришмаси киритилган кремний намунада эса 2.5 баробар кўтарилиши кузатилди. Ҳаракатчанлик эса сезиларли даражада камайиши кўрилди.

Тез нейтронлар билан нурлантирилгандан сўнг потенциал тўсиқ $p\text{-Si}\langle B \rangle$, $p\text{-Si}\langle B, P \rangle$ намуналарида деярли ўзгармаганлиги кузатилди. Радиациявий нурлантирилган $p\text{-Si}\langle B, P, Ir \rangle$ ва $p\text{-Si}\langle B, P, Cu \rangle$ намуналарда эса оддий намунага нисбатан иридийда киритмаси билан бойитилган кремнийда потенциал тўсиқ 4-5 мартагача ортди. Мис киришмаси киритилган кремний намунада эса 2 баробар кўтарилиши кузатилди. Ҳаракатчанлик эса сезиларли даражада камайиши кўрилди. Кремнийнинг бу параметрлари 3-жадвалда келтириб ўтилган.

Легирланган кремнийни ядро реакциялари ($p\text{-Si}\langle B, P \rangle$), мис ($p\text{-Si}\langle B, P, Cu \rangle$) киритмасини киритиш орқали юқори қаршиликли, радиация ва ҳароратга чидамли намуналар олиш ҳамда улар асосида тайёрланган резисторлар қаршилигини бошқариш усулини ишлаб чиқиш. Яъни $p_{\text{мах}}$ - ва $p_{\text{мин}}$ - соҳаларда компенсация даражасининг фарқи туфайли нурланиш бу соҳалар орасидаги потенциал тўсиқ ($\Delta_0 \rightarrow \Delta$) нинг ортишига олиб келади, бир нечта энергетик сатҳлар ҳосил бўлади, яний $E_1 = E_V + 0.28$ эВ, $E_2 = E_V + 0.35$ эВ ва $E_4 = E_V + 0.4$ эВ (9-а ва 9-б-расм) ва намуна ўтказувчанлик бўйича биржинсли бўлмаган ҳолатга келади.

Кремний намунасининг легирлашдан олдинги ва кейинги параметрлари келтириб ўтилган

№	Параметрлари	$p\text{-Si}$	$p\text{-Si}<B,P>$	$p\text{-Si}<B,P,Ir>$	$p\text{-Si}<B,P,Cu>$
1150 °C ҳароратда диффузия қилингандан сўнг					
1	ρ (Ом·см)	10.1	10.1	15.8	13.2
2	N (см ⁻³)	$1.21 \cdot 10^{15}$	$1.23 \cdot 10^{15}$	$1.31 \cdot 10^{16}$	$1.34 \cdot 10^{16}$
3	μ (см ² /В·с)	355	365	280	310
4	Δ (мэВ) юқори Потенциал тўсиқ	4.5	4.15	14	10
тез нейтронлар 10^9 см ⁻² билан нурлантиришдан сўнг					
1	ρ (Ом·см)	5.1	14.8	35.4	20.72
2	N (см ⁻³)	$8.1 \cdot 10^{14}$	$1.2 \cdot 10^{15}$	$6.8 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{15}$
3	μ (см ² /В·с)	345	352	260	301
4	Δ (мэВ) юқори Потенциал тўсиқ	6.75	4.5	30	9.4

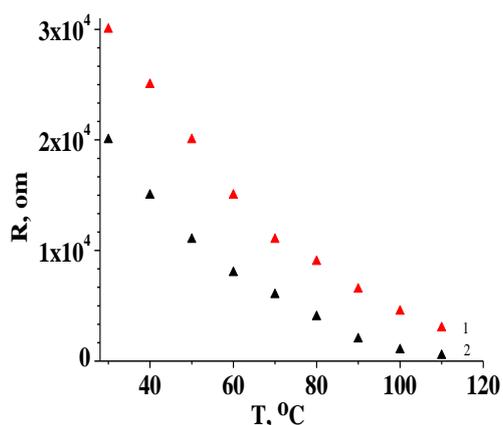


9-расм. Бир жинсли бўлмаган p -типли кремнийдаги p_{\max} - ва p_{\min} – энергетик сатхларнинг нейтронлар билан нурлантиришдан олдин ва кейинги моделлари кўриниши. $E_1=E_v+0.28$ эВ, $E_2=E_v+0.35$ эВ ва $E_4=E_v+0.4$ эВ қийматларга эга ҳолатлар учун.

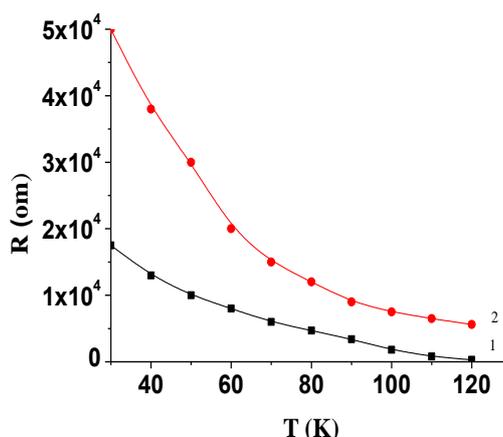
Маълумки, кремнийга мис ва иридий атомларини диффузиясида бир вақтнинг ўзида киритмалар кремний тўла ҳажмида электр фаол ва электр нофаол марказлар ҳосил қилади. Мис атомларининг кўп қисми электр фаол бўлмаган, иридийда аксинча электр фаол бўлган ҳолда бўлади. Кремнийни мис ва иридий атомлари билан легирланганда солиштирма қаршилиги 3-10 Ом·см бўлган, хона ҳароратида ўтказувчанлик зонасининг пастки қисмида бўлган Фермик соҳаси $E_c-(0.42-0.52)$ эВ n -типли кремний монокристалли ишлатилган бўлиб, уни мис ва иридий билан легирлаш 1150 °C 5 соат давомида термик диффузия қилиш усулидан фойдаланилди. Тадқиқот намуналарининг ўлчамлари 5 x 5 x 0,5 мм³ ни ташкил қилади ва $n^+ \text{-} n \text{-} n^+$ структуралар эса 1050 °C ҳароратда 120 мин вақт давомида фосфорни термодиффузия қилиш усули билан ҳосил қилинган.

Компенсацияланган намуналар фотоэлектрик параметрлари $-R_T/R_c$ нисбатнинг ўзгариши асосида назорат қилинган. Бу ерда R_T - ёритилмагандаги қаршилик бирлиги Ом, R_c - ёритилгандаги қаршилик бирлиги Ом. Ёруғлик ва ёритилганлик қаршиликлар $E = 200$ люкс энергияда ўлчанди.

Мис атомлари билан легирланган кремнийни тадқиқот қилиш натижаларидан 305-370 К ҳарорат оралиғида ишлайдиган бир хил хусусиятга эга бўлган фото ва термодатчиклар яратиш имконини берса, иридий билан легирланган кремнийларда 550-600 К ҳарорат оралиғида ишлайдиган бир хил хусусиятга эга бўлган фото ва термодатчиклар яратиш имконини беради. Олинган натижалар 10 ва 11-расмларда келтириб ўтилган.



10-расм. Мис атоми билан легирланган кремнийдан тайёрланган фоторезисторлар қаршилигининг ($n^+ - n - n^+$ структуралар) ҳароратга боғланиши: 1– қоронғида; 2 - ёруғликда ($E = 200$ люкс).



11-расм. Иридий атоми билан легирланган кремнийдан тайёрланган фоторезисторлар қаршилигининг ($n^+ - n - n^+$ структуралар) ҳароратга боғланиши 1–қоронғида; 2-ёруғликда ($E = 200$ люкс).

Мис ва иридий атоми билан легирланган солиштирма қаршилиги $\rho_0 = 10$ Ом·см бўлган кремний намуналарни фотоэлектрик параметрларини турғунлаштириш учун 20 мин вақт давомида 597 К ҳароратда легирланган намуналарнинг термик ишлов берилган R_T/R_c ўзгариши натижаларини термик қиздиришга боғлиқлиги 4-а÷б-жадвалда келтирилган.

4а-жадвал

Мис атомлари билан легирланган ва термик ишлов берилган намуналарнинг R_T/R_c ўзгариши натижаларини термик қиздиришга боғлиқлиги келтирилган.

	R_T/R_c нисбий ўзгариш кўплиги			
Термик тобланишдан олдин	1,2	1,1	1,12	1,3
Термик тобланишдан кейин	11,2	9,7	11,1	12

Жадвалдаги натижалардан кўриниб турибдики, термик ишлов берилгандан сўнг, электр қаршиликнинг ўзгариши каррали ўсади ва мис билан легирланган намуналарда 10 мартагача ўзгаришни ортиши кузатилади.

Иридий атомлари билан легирланган ва термик ишлов берилган намуналарнинг R_T/R_c ўзгариши натижаларини термик қиздиришга боғлиқлиги келтирилган.

	R_T/R_c нисбий ўзгариш кўплиги			
Термик тобланишдан олдин	2	4.5	9.5	11.5
Термик тобланишдан кейин	80.5	120.5	160.2	145.6

Жадвалдаги натижалардан кўришиб турибдики, термик ишлов берилгандан сўнг, электр қаршиликнинг ўзгариши каррали ўсади ва иридий билан легирланган намуналарда 40 мартагача ўзгаришнинг ортиши кузатилади.

Ушбу бўлимда манфий қийматли қаршиликни термик коэффицентига (ҚТК) эга бўлган термодатчиклар сифатига компенсацияланган кремний ишлатиш имкониятлари кўриб чиқилган. Тақиқланган зонада ЧЭС ҳосил қилишда Au ва Fe каби аралашмалар билан легирланган кремнийда манфий қийматли ҚТК ларининг ҳосил қилиш мумкинлиги кўплаб ишларда кўрсатилган. ҚТК манфий бўлган терморезисторлар қаршиликни ҳароратга боғланиши экспоненциал бўлади. Шу билан биргаликда номаълум қаршиликнинг қиймати жуда кенг чегараларда ($1-10^6$ Ом) ўзгариши мумкин. Терморезисторнинг асосий параметрлари ва хусусиятлари қуйидагилар билан аниқланади:

1. R_n - термисторларнинг 25°C ҳароратдаги қаршилиги.
2. α - қаршиликнинг ҳарорат коэффиценти (ҚТК).
3. В коэффицентнинг – манфий ҳарорат диапозонида термодиффузиянинг ҳарорат сезгирлигини аниқловчи катталик. Бу коэффицент яримўтказгич материалларининг физик хусусиятларига боғлиқ бўлиб, қуйидаги формула орқали ҳисобланади:

$$B = \frac{2.3 \cdot \lg\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}$$

Бу ерда $R_1 - T_1$ ҳароратда ўлчанган терморезисторнинг қаршилиги.

$R_2 - T_2$ ҳароратда ўлчанган терморезисторнинг қаршилиги

Термодатчикларнинг асосий статистик хусусияти бу ҳароратнинг тавсифномаси $R = f(T)$ – қурилманинг қолган хусусиятларини амалга ошириб беради. Қаршиликларнинг термик коэффиценти манфий қийматли термодатчикларда бу боғланишни қуйидаги математик ифода билан яхши таҳлил қилиш мумкин:

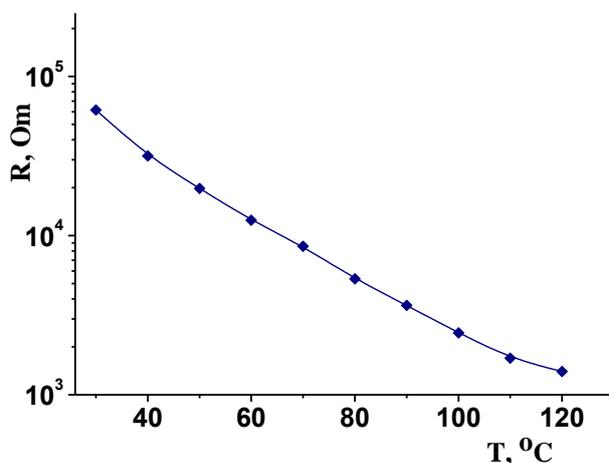
$$R = R_0 \exp(\alpha T)$$

Бу ерда α - T ҳароратда қаршиликнинг термик коэффиценти; R_0 - доимий катталик.

Термодатчиклар қаршилигининг ҳарорат ўзгаришига сезгирлиги қаршиликнинг термик коэффиценти билан аниқланади.

$$\alpha = -\frac{\frac{1}{R}}{\frac{dR}{dT}}$$

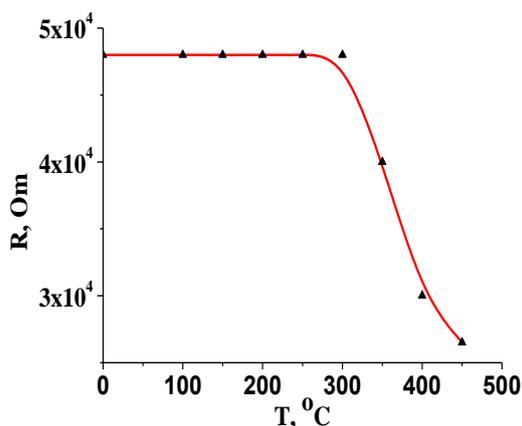
Ишчи диапазони (273÷330) К бўлган сирт ҳароратини ўзгартириш учун манфий ҚТК га эга бўлган кремний асосида, олтин билан легирланган термодатчиклар ишлаб чиқарилди. Бундай термодатчикларнинг термик коэффиценти 273 К да -8% / К дан 330 К да $-(2\div 3)\%$ / К гача ўзгаради. Термодатчикларни тайёрлашда намуна материали сифатида $\rho_{исх.} \approx 200$ Ом·см бўлган $n-Si\langle P \rangle$ ишлатилган. $n-Si\langle P \rangle$ намуна мис билан легирланганда материалнинг хона ҳароратидаги қаршилигини қиймати $\rho_0 = 70$ кОм·см тенг бўлди. Ушбу материалларга омик контактни таъминловчи $Cu \sim 90$ °С температурада кимёвий усул билан ўстирилди. Компенсацияланган кремний $n-Si\langle P, P, Cu \rangle$ асосида тайёрланган, термодатчикларнинг термик хусусиятлари 12-расмда кўрсатилган. Қаршилиқнинг термик коэффиценти материал қаршилиги (ρ) ни ҳарорат (T) га боғланиш билан аниқланган.



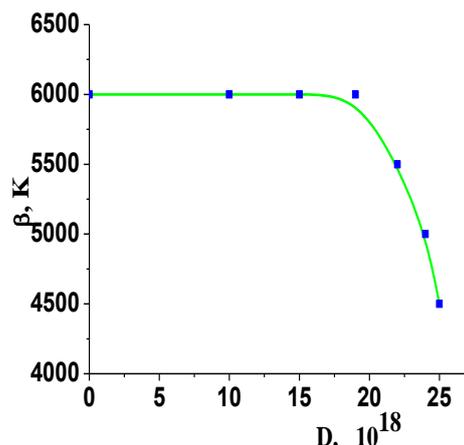
12.-расм I-типли $n-Si\langle P, P, Cu \rangle$ асосида тайёрланган термодатчикнинг термик характеристикаси

Шу билан бирга $\alpha_{293} = -7,85\%$ /град ва $\alpha_{343} = -5,73\%$ /град бўлганда $V=6743$ К га тенг бўлди. Адабиётларда атомларнинг алоҳида аралашмалари билан легирланган компенсацияланган кремний асосида юқори сезгир ва юқори самарали термодатчикларни олиш технологиясини ишлаб чиқишга бағишланган кўплаб ишлар мавжуд ва маълум. Масалан, солиштирма қаршилиги $\rho=5\div 100$ кОм·см ва $V=6000\div 7400$ К дан юқори бўлмаган кремний олиш усули ишлаб чиқилган. Олинган натижаларимизни адабиётларда берилган натижалар билан таққослаб чиқиб, биз мис билан компенсирланган $n-Si\langle P, P, Cu \rangle$ намунадан тайёрланган терморезисторлар $30\div 300$ °С оралиғида ишлаши мумкин деган хулосага келдик.

Мис билан легирланган кремний асосидаги термодатчик параметрларига термодиффузия таъсири ўрганилди. Олинган натижалар 13 расмда келтирилган. 13-расмда кўриниб турибдики, ҳароратни ~ 300 °С чиқганда термодатчик қаршилиги сезиларли даражада ўзгармайди. Бу эса ўз навбатида термодатчик 300 °С гача ишлаши мумкинлигидан далолат беради.



13-расм I - типдаги $n\text{-Si}\langle P,P,Cu\rangle$ намунадан олинган электрон термодатчик қаршилигига киздириш температурасининг боғлиқлиги



14-расм. I - типдаги $n\text{-Si}\langle P,P,Cu\rangle$ намунадан олинган электрон термодатчигининг ҳарорат сезгирлиги γ – нурланиш дозасига боғлиқлиги.

Паралелл равишда $n\text{-Si}\langle P,P,Cu\rangle$ намуна асосда тайёрланган термодатчикларнинг қаршиликлари радиацияга чидамлиги тадқиқ қилинган. Намуналарнинг $n\text{-Si}\langle P,P,Cu\rangle$ термо сезгирлигининг γ -нурланиш дозасига боғлиқлиги 14-расмда келтирилган. Намуналарга $\sim 10^7 \div 10^9$ P интервалда интенсивлиги $\sim 6,5 \cdot 10^2$ P·с⁻¹ бўлган γ -нурланиш билан радиациявий ишлов берилган. Намунанинг нурланишдаги ҳарорати ~ 50 °C дан ошмади.

Тадқиқот натижалари $n\text{-Si}\langle P,P,Cu\rangle$ компенсацияланган кремний намуналари асосидаги таёрланган термоқайд қилгичлар параметрлари γ -нурларининг $\sim 2 \cdot 10^9$ P дозагача сезиларли ўзгармаслигини кўрсатди.

ХУЛОСА

1. Биринчи марта олдиндан нейтрон билан легирланган кремнийдаги мис ва иридий киритмалари концентрацияси оддий кремний намунасига нисбатан кўп бўлиши кузатилди. Бу нурланиш натижасида ҳосил бўлган вакансиялар ҳисобига ҳосил бўлади.

2. Биринчи марта $n\text{-Si}\langle P,P,Ir\rangle$ ва $n\text{-Si}\langle P,P,Cu\rangle$ намуналарда емирилиш тезлиги $n\text{-Si}\langle P,Ir\rangle$ ва $n\text{-Si}\langle P,Cu\rangle$ намуналарга нисбатан секин эканлиги аниқланди. Буни юқори ва кичик омли қаршиликли соҳалар орасидаги потенциал тўсиқнинг катталиши билан тушунтирилди.

3. Олдиндан нейтрон билан нурлантирилган мис атомлари билан легирланган кремний намуналарида нурлантирилмаган намуналарга нисбатан ҳарорат ва радиацияга чидамлилиги ортиши кузатилди. Иридий намуналарида эса камайиши аниқланган. Бу эса нурлантириш натижасида қўшимча вакансиялар пайдо бўлиши билан тушунтирилади.

4. Биринчи марта кремний ҳажмида иридий атомлари кластерлари ҳосил қилинган игнасимон нуқсон аралашмали кичик ўлчамли композициялар ҳосил бўлиши ва уларнинг иридий диффузия йўналишига перпендикуляр бўлган

текисликка қарама-қарши бўлиб тақсимланди. Диффузия ҳароратига қараб нуқсон аралашмали кичик ўлчамли композициялар ҳажмини 5 мкм дан 30 мкм гача ортиши аниқланди.

5. Илк маротаба мис атомлари билан легирланган кремнийдаги асосий бўлмаган заряд ташувчиларининг яшаш вақти қиймати кислородли намуналарда ($> 10^{17} \text{см}^{-3}$) 10^{-5} с гача ортиши ва кислородсиз намуналарда 10^{-8} с гача камайди. Иридий билан легирланган намуналарда 10^{-5} с гача ортиши ва уларнинг кислородга боғлиқ эмаслиги аниқланди. Бу ҳодиса мис ва кислорд атомлари ўзаро бирлашиб ҳосил қилган қуйи энергияли ёпишқоқлик сатхларнинг ўзгариши билан тушунтирилади.

6. γ -квантининг $\sim 10^9$ Р дозасин тасирида $p\text{-Si}\langle P, Cu \rangle$ ва $n\text{-Si}\langle B, P, Ir \rangle$ намуналарда кремнийнинг электрофизик ва рекомбинацион ҳоссаларининг радиацияга чидамлилигининг ошиши кузатилди. Радиацион фодетекторларни ишлаб чиқаришнинг янги усулини яратиш имконини беради.

7. Олдиндан нейтрон билан нурлантирилган кремнийга мис ва иридий атомлари билан легирланган намуналар асосида $300 \div 570$ К ҳарорат оралиғида ва 10^9 Р радиацияга чидамли фотодатчиклар, фоторезисторлар ва термодачиклар ясаш мумкинлигини кўрсатади.

8. Олдиндан нейтрон билан легирланган кремнийга мис ва иридий атомлари билан термик ишлов берилгандан сўнг электр қаршилиқнинг ўзгариши кузатилди, мис билан легирланган намуналарда 10 мартагача, иридий билан легирланган намуналарда эса 40 мартагача ортиши кузатилди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК ПРИ ФЕРГАНСКОМ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ**

**НАМАНГАНСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ**

МИРЗАРАЙИМОВ ЖАХОНГИР ЗОКИРЖАНОВИЧ

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И РЕКОМБИНАЦИОННЫЕ
СВОЙСТВА КРЕМНИЯ, МИКРОНЕОДНОРОДНО ЛЕГИРОВАННОГО
АТОМАМИ Cu И Ir**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

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

Фергана-2022

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером B2022.2.PhD/FM377.

Диссертация выполнена в Наманганском инженерно-технологическом институте.

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

Научный руководитель:

Махмудов Шерзод Ахмадович

доктор философия по физико-математических наук (PhD), доцент

Официальные оппоненты:

Нуритдинов Иззатилла

доктор физико-математических наук, профессор

Аскарлов Бахтиёр

доктор физико-математических наук, доцент

Ведущая организация:

Научно-исследовательском институт Физика полупроводников и микроэлектроники при национальный университет Узбекистана

Защита диссертации состоится «21» 12 2022 года в 19:00 часов на заседании Научного совета PhD.03.27.02.2020.FM.106.01 при Ферганском политехническом институте (Адрес: 150100, Узбекистан, г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел.: (+99873) 241-13-03; факс: (+99873) 241-12-06; e-mail: ferpi_info@edu.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в отделе внедрения информационных технологий Ферганского политехнического института (регистрационный номер 139). (Адрес: 150100, г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел.: (+99873) 241-13-03).

Автореферат диссертации разослан «10» 12 2022 года.
(протокол рассылки № 008-Н от «09» 12 2022 г.)



[Handwritten signature]

Н.Х.Юлдашев

Председатель Научного совета по присуждению ученой степени доктора философии, д.ф-м.н., профессор.

[Handwritten signature]

Б.З.Полвонов

Ученый секретарь Научного совета по присуждению ученой степени доктора философии, доктор философии по физико-математическим наукам, доцент.

[Handwritten signature]

К.Э. Онаркулов

Председатель научного семинара при научном совете по присуждению ученой степени доктора философии, д.ф-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации.

В мире в областях современной микроэлектроники широко используется полупроводниковый монокристаллический кремний для изготовления различного оборудования. В настоящее время развитие науки и техники требует создания полупроводниковых приборов, которые были бы компактными и чрезвычайно чувствительными к внешним воздействиям. В ряде стран в связи с этим проводятся научные исследования, которые посвящены формированию нового структурного монокристалла. В связи с этим важно провести масштабную работу по получению материалов, свойства которых стабильны, путем введения монокристаллического кремния с использованием технологии высокотемпературной диффузии, генерирующей глубокие энергетические уровни, при которых в образце появляются одновременный примесь + кислород и вакансии + примесь.

В мире интенсивно ведутся изучения центров глубокие энергетические уровни, создающими примесями, термо- и радиационными дефектами, которые существенно определяют основные свойства полупроводников. В частности показано, что с ростом концентрации компенсирующей смеси в структуре кремния, снижается время жизни неосновных носителей заряда за счет появления глубокие энергетические уровни и уровней прилипания, а также увеличения их роли в кинетических явлениях. Однако, несмотря на подробные исследования свойств обогащенного глубокие энергетические уровни кремния, до сих пор не решены следующие научные проблемы: разработка единой концепции, объясняющей всех механизмов изменения электрофизических и рекомбинационных свойств материала за счет введенных в него примесей; поиск быстро диффундирующих примесей для обеспечения стабильности электрофизических и рекомбинационных свойств кремния при одновременной реализации этих механизмов. Получение кремния, материала с заданными свойствами в условиях внешних воздействий (диффузионное охлаждение, термическая обработка и облучение) считается самой актуальной задачей полупроводниковой электроники.

В нашей республике особое внимание уделяется актуальным приоритетным направлениям практических и фундаментальных научных исследований, в частности, созданию инновационных разработок в области увеличения монокристаллов кремния, устойчивого к внешним воздействиям, чувствительных к температуре и свету. В Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы, среди прочего, поставлены задачи «непрерывного снабжения экономики электроэнергией и активного внедрения технологий «Зеленой экономики» во все отрасли, повышения энергоэффективности экономики на 20 процентов» определяются. При реализации этих задач, в частности, важно создание методов и механизмов повышения эффективности и рабочих параметров крупно- и малокристаллических оптических и фотоэлектрических устройств во всех областях атомной энергетики и народного хозяйства..

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач предусмотренных в Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-5032 «О мерах по повышению качества образования и совершенствованию научных исследований в области физики» от 19 март 2021 года, № ПП-3899 «О мерах по повышению эффективности системы интеграции научной и инновационной деятельности» от 6 августа 2018 года и в постановлениях Президента РУз № ПП-4779 «О дополнительных мерах по сокращению зависимости отраслей экономики от топливно-энергетической продукции путем повышения энергоэффективности экономики и задействования имеющихся ресурсов» от 10 июля 2020 года, № ПП-5063 «О мерах по развитию возобновляемой и водородной энергетики в республике Узбекистан» от 9 апреля 2021 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и техники III и IV: «Развитие энергетики, энергосбережения, транспорта, машин и оборудования, современной электроники, микроэлектроники и электронного оборудования» и «Развитие возобновляемых источников энергии, разработка новых технологий и устройств на основе нано технологий, фотоники и других современных технологий».

Степень изученности проблемы. В научной литературе хорошо изучены электрофизические и рекомбинационные свойства Si <Cu> и Si <Ir> и были определены следующие: высокие коэффициенты диффузии примеси меди в кремнии $\sim 2 \cdot 10^{-5}$ см²/с при 1273 К; большинство атомов меди в кремнии находятся в электрически неактивном состоянии (~99,9%). В компенсированном n-Si<P,Cu> и p-Si<P,Cu> без участия примеси B были найдены несколько акцепторных центров, обеспечивающих высокое сопротивление (от 100 до 10⁵ Ом·см). Были определены следующие электрофизические свойства образцов Si <Ir>: иридий тоже относится к быстро диффундирующим примесям в кремнии (при 1273 К $\sim 2 \cdot 10^{-7}$ см²/с), имеет относительно большой коэффициент диффузии; большая часть атомов иридия (99,9%) в кремнии бывает в электроактивном состоянии; акцепторные и донорные центры иридия дают возможность получения (без участия атомов B) компенсированного кремнийя в широком диапазоне.

В последние 20 лет интенсивно были изучены электрофизические параметры кремниевых образцов российскими учёными В.Ф.Банной, Л.С. Смирновым, С.П. Соловьевым, и В.В. Козловским. Американские ученые А.А.Истратов, Э.Р. Вебер проводили исследования над светочувствительными свойствами кремния.

В Узбекистане ученые М.С. Саидов, Р.А. Муминов, М.К. Бахадирханов, С.Зайнабидинов, А.Т.Мамадалимов, Н.А.Султонов, М.Каримов и Ш.Махкамов а также их ученики систематически изучали свойства центров с ГЭУ во многих монокристаллических и поликристаллических полупроводниковых образцах. Однако, до настоящего времени не достаточно проведены исследования на

образцах кремния, легированного атомами меди и иридия методом термической и радиационной обработки, по технологии изготовления и изучению их электрофизических и рекомбинационных свойств.

Связь диссертационной работы с тематическими планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках договора о сотрудничестве между Наманганским инженерно-технологическим институтом и Институтом ядерной физики (ИЯФ) Академии наук Республики Узбекистан по плану научных исследований. Основные эксперименты были проведены в ИЯФ, а анализ полученных результатов был выполнен в Наманганском инженерно-технологическом институте.

Целью исследования является заключается в изучении влияния микронеоднородностей на электрофизические и рекомбинационные свойства ядерно-трансмутированного кремния, предварительно облученного нейтронами и легированного медью и иридием.

Задачи исследования:

получение образцов кремния, легированного медью и иридием разной концентрации;

изучение влияния концентрации атомов меди и иридия на время жизни неосновных носителей заряда в n- и p-типа образцах кремния;

определение физических механизмов процессов, происходящих при термической и радиационной обработке образцов Si <B,P,Cu> и Si <B,P, Ir>;

изучение влияния низкотемпературного отжига на электрофизические свойства образцов Si <B,P,Cu> и Si <B,P,Ir>;

изучение влияния меди и иридия на эффективность образования радиационных дефектов в образцах Si <B,P,Cu> и Si<B,P,Ir> при γ -облучении;

разработка радиационно-стойких полупроводниковых датчиков на основе образцов Si <B,P,Cu> и Si <B,P,Ir> и рассмотрение возможности их применения на практике.

Объект исследования. Кремний, легированный быстро диффузионными примесями меди и иридия, а также предварительно нейтронно облученный кремний.

Предмет исследования. Электрофизические, рекомбинационные свойства предварительно облученного образца кремния, процессы термической и радиационной обработки кремния, легированного быстро диффундирующими примесями меди и иридия.

Методы исследований. В данной работе методом коэффициента Холла определены удельное сопротивление, подвижность, концентрация и методом нестационарной фотопроводимости определены время жизни носителей заряда. Включения меди и иридия вводились методом вакуумного напыления на установке ВУП-4 и последующей высокотемпературной (1150 °C) диффузии в печи СУОЛ 125. Для измерения глубоких уровней энергии использовался метод нестационарной емкостной спектроскопии с помощью прибора DLTS на базе диода Шоттки. Для исследования морфологии рельефа поверхности

образцах $n\text{-Si}\langle\text{B,P,Cu}\rangle$ и $n\text{-Si}\langle\text{B,P,Ir}\rangle$ использовался прибор атомно силовой микроскоп АСМ.

Научная новизна:

Впервые определено, что концентрация электрически активных атомов входов меди и иридия в кремнии, облученном нейтронами в диапазоне $10^{16}\text{-}10^{18}$ нейтр./см², была в 1,5 раз больше, чем в необлученном кремнии.

Впервые было обнаружено, что в образцах кремния, заранее облученных нейтронами в диапазоне $10^{16}\text{-}10^{18}$ нейтр./см² и легированных атомами меди, время жизни не основных носителей заряда увеличилось на 10^{-5} сек, а в не облученных образцах $\text{Si}\langle\text{P,Cu}\rangle$ она оказалась равной 10^{-7} сек. Что в образцах кремния, заранее облученных нейтронами в легированных атомами иридия, время жизни не основных носителей заряда увеличилось на 10^{-4} сек, а в не облученных образцах $\text{Si}\langle\text{P,Ir}\rangle$ она оказалась равной 10^{-5} сек.

Так же впервые обнаружено время жизни неосновных носителей заряда в кремнии, легированного атомами меди, увеличилось до 10^{-5} с в образцах с кислородом ($>10^{17}\text{см}^{-3}$). В образцах без кислорода снизилось до 10^{-8} с. В образцах кремния легированных иридием, увеличение до 10^{-5} с. в которых легирован атомами иридия, было обнаружено, что время жизни носителей заряда не зависит от кислорода.

Впервые разработана технология получения датчиков, устойчивых к внешним воздействиям из образца кремния $\text{Si}\langle\text{B,P,Cu}\rangle$, $\text{Si}\langle\text{B,P,Ir}\rangle$, легированного при высоких температурах $1150\text{ }^\circ\text{C}$.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

предложен способ изготовления термочувствительных $n^+n\text{-}n^+$ структур на основе n -типа предварительно облученного нейтронами кремния и легированного примесями меди, которые определяют температуру в интервале $273\div 498\text{ K}$;

разработана технология получения датчиков устойчивых к внешним воздействиям на основе $n\text{-}(\text{Si}\langle\text{B,P,Cu}\rangle)$, $n\text{-}(\text{Si}\langle\text{B,P,Ir}\rangle)$, куда введены атомы примесей при высоких температурах;

показана возможность создания высокочувствительных фото- и терморезисторов из $n\text{-}(\text{Si}\langle\text{B,P,Cu}\rangle)$, $n\text{-}(\text{Si}\langle\text{B,P,Ir}\rangle)$, устойчивых к внешним воздействиям.

Надежность результатов исследования обосновываются использованием передовых экспериментальных методов, хорошей воспроизводимостью результатов и соответствием выводов общезначимыми представлениями о полупроводниках, а также их соответствием общим физическим законам и точным наблюдениям.

Научная и практическая значимость результатов исследований.

Научная значимость исследовательской работы заключается в диффузии атомов меди ($\text{Si}\langle\text{B,P,Cu}\rangle$) и иридия ($p\text{-Si}\langle\text{B,P,Ir}\rangle$) в кремний при высоких температурах и одновременном применении существующих трех механизмов, повышающих стойкость таких образцов к внешним факторам, и полученные от этого результаты раскрывают механизм, на котором будет физическая основа.

Внедрение результатов исследований. На основании результатов, полученных при исследовании электрофизических характеристик элементов с полупроводниковыми свойствами (Si<B,P,Cu>), (Si<B,P,Ir>) и способа их приготовления:

ОТ-Ф2-11, выполненной НИИ физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана по результатам результатов повышения температурной и радиационной стойкости в образцах кремния, легированных предварительно облученными атомами меди и иридия, по сравнению с необлученных образцов, а в случае иридиевых образцов – снижение. Он был использован при реализации фундаментального проекта по теме «Исследование закономерностей формирования наноразмерных дефектов в поверхностных слоях и объеме кремния, легированного d- элементы». (Информация № 01ИК/1-113 от 17.12.2021 НИИ физики полупроводников и микроэлектроники УзМУ). Использование результатов данного исследования привело к оптимизации технологии получения кремния, легированного шлаком d-элементов, было определено, что устойчивость к температуре и радиации увеличилась в 2 раза. Кроме того, в 2-3 раза уменьшилась концентрация наноразмерных дефектов в поверхностных слоях и объеме кремния;

Результаты изменения времени пребывания неосновных носителей заряда в предварительно облученных образцах кремния, легированных атомами меди, были использованы в проекте Андижанского машиностроительного института № Ф-2-001 «Фото чувствительность и перенос носителей заряда в Полупроводниковая твердая смесь GaAs/Ge/ZnSe под действием радиации». (справка Андижанского машиностроительного института № 38-05/1788 от 17.12.2021 г.). В результате было обнаружено, что кислородсодержащий ($>10^{17}$ см⁻³) и неоксигенированный кремний, легированный атомами меди, позволяет соответственно увеличивать и уменьшать величину времени пребывания неосновных носителей заряда.

Апробация результатов исследования. Научные результаты диссертации были представлены и обсуждены на 6 международных и 4 республиканских научных конференциях.

Публикация результатов исследования. Всего по теме диссертации опубликовано 16 научных работ, из которых 6 статей опубликованы в научных изданиях, в том числе в 3 зарубежных и 3 республиканских журналах, в которых рекомендованы к публикации основные научные результаты докторских диссертаций Высшей аттестационной комиссии Республики Узбекистан.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной 15 таблиц, 30 рисунков и объемом в 115 страниц.

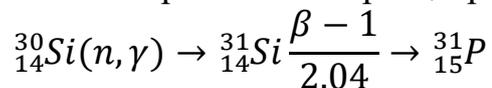
ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, выявлены объект, предмет и методы исследования, определено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий в Республике Узбекистан, дана научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также о структуре диссертации.

В первой главе диссертации «**Радиационные дефекты в кремнии**» анализируются результаты, представленные в литературе. В этой главе рассматриваются примесные и радиационные дефекты, свойства рекомбинации, радиационные явления в кремнии, ранее компенсированные радиационными дефектами, а также влияние излучения на кремний с глубоким уровнем энергии. Процесс появления времени жизни носителей заряда (τ) в полу проводящих материалах глубоких энергетических уровней, изменения τ после рекомбинации, а также приведены некоторые физические параметры термодатчиков изготовленные на основе образца кремния дружим учёными мира. Исходя из этого, определены цели и задачи диссертации.

Во второй главе диссертации, «**Электрофизические и рекомбинационные свойства кремния, легированного медью и иридием**», используются образцы n- и p-типа, легированные фосфором (P) и бором (B), для получения компенсированного кремния. Образцы выращены по методу Чохральского. Использовались образцы кремния n- и p-типа с содержанием кислорода $(5 \div 10) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, плотностью дислокаций 10^4 см^{-2} и удельным сопротивлением $r \approx 3 \div 100 \text{ Омсм}$ также использовали кремний p-типа (p-Si <B, P>), облученный нейтронами.

Для получения радиационно-компенсированного кремния n- и p-типа облучение проводилось в двух горизонтальных и вертикальных каналах ВВР-Реактор СМ нейтронными потоками $(0,002 \div 8) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{сек}^{-1}$ при мощности 10 МВт и температуре $\sim 320 \text{ К}$. Реакция фосфорной конверсии ^{30}Si под действием медленных нейтронов в компенсированные образцы p-типа.



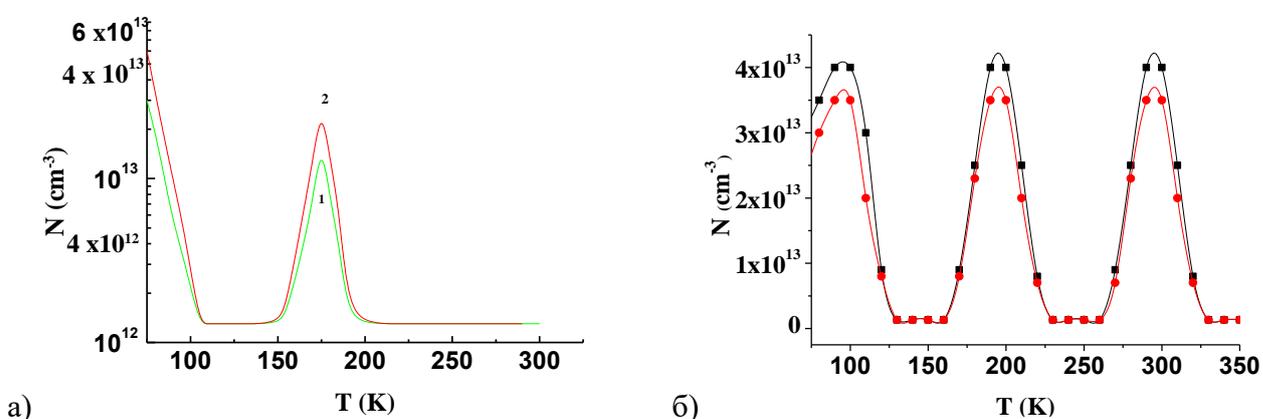
Добавленную концентрацию фосфора можно рассчитать по формуле $N_P = 1,7 \cdot 10^{-4} \cdot \Phi$. Где Φ - поток медленных нейтронов, $\text{см}^{-2} \text{сек}^{-1}$.

После облучения образцы нагревали в горизонтальной печи СУОЛ-125 при температуре $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30 минут со скоростью 30 (250) град/мин. быстро охлаждают до комнатной температуры. Его химически обрабатывали в HF кислоте в течение $30 \div 150$ секунд для получения оксидного слоя на поверхности. Затем образцы кипятили в дистиллированной воде и промывали. На установке Холла измеряли электрофизические параметры, рекомбинационные свойства исследован методом нестационарной фотопроводимости, на установке DLTS проводили анализ глубоких уровней

энергии, на приборе АСМ исследован морфологии рельефа поверхности образцах $n\text{-Si}\langle P,P,Cu\rangle$ и $n\text{-Si}\langle P,P,Ir\rangle$.

В третьей главе диссертации «Исследование внешних воздействий на электрофизические и рекомбинационные свойства кремния, легированного медью и иридием», наблюдаются два максимума в спектрах DLTS $n\text{-Si}\langle P,P,Cu\rangle$ образцов II типа (рис. 1) наблюдаются два максимума $E_1=E_c-(0,15\pm 0,02)$ эВ ($\sigma_n=5 \cdot 10^{-14}$ см²) и $E_2=E_c-(0,22\pm 0,02)$ эВ ($\sigma_n=6 \cdot 10^{-15}$ см²) после термодиффузии при температуре 1150 °С, в $n\text{-Si}\langle P,P,Ir\rangle$ образцах I и II

типа наблюдаются три максимума $E_1 =E_c-(0,17\pm 0,02)$; $E_2=E_c-(0,33\pm 0,02)$; $E_3=E_c-(0,54\pm 0,02)$ при температуре 1150 °С. Следует отметить, что концентрация обнаруженных энергетических уровней составляет не более $5 \cdot 10^{13}$ см⁻³ и зависит от температуры диффузии и скоростей после диффузионного охлаждения. В $n\text{-Si}\langle P,P,Cu\rangle$ образцах I типа концентрация этих уровней в 5–10 раз меньше, чем в образцах II типа.



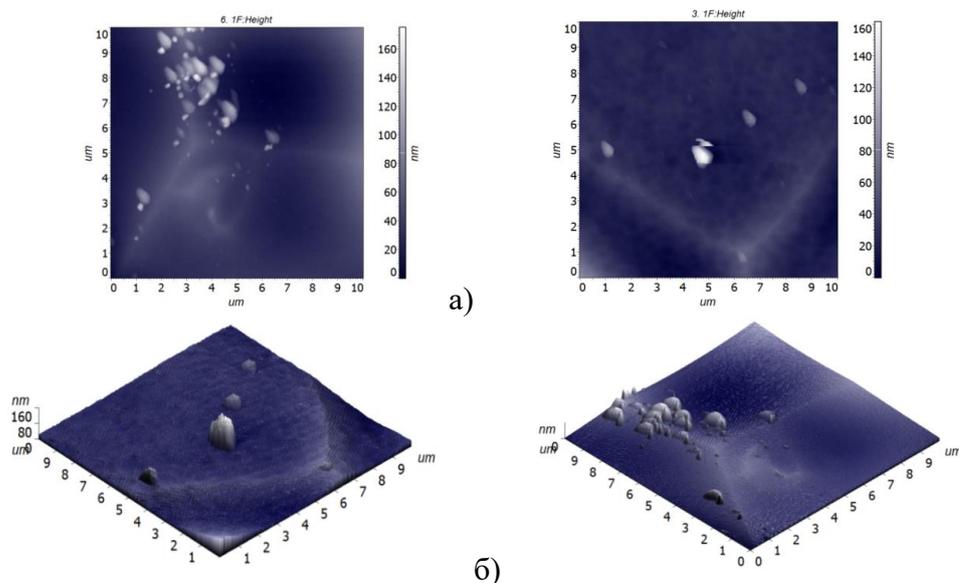
а) 1-рисунок. Спектры DLTS образцов а) $n\text{-Si}\langle P,P,Cu\rangle$, 1-II тип $E_1=E_c-(0,15\pm 0,02)$ эВ; $E_2 =E_c-(0,22 \pm 0,02)$ эВ; 2- I тип $E_1 =E_c-(0,15 \pm 0,02)$ эВ; (Температура диффузии 1150 °С). б) $n\text{-Si}\langle P,P,Ir\rangle$, 1-II тип $E_1=E_c-(0,17\pm 0,02)$ эВ; $E_2=E_c-(0,33\pm 0,02)$ эВ; $E_3=E_c-(0,54\pm 0,02)$ эВ; (Температура диффузии 1150 °С).

Указанные энергетические уровни не обнаружены в контрольных образцах. Это означает, что возникновение этих центров возможно связано с комплексами типа медь–неконтролируемая примесь и иридий-вакансия и иридий– неконтролируемая примесь.

Далее изучены структура, и распределение примесных дефектов в кремнии, легированном медью и иридием. Результаты исследования морфологии рельефа поверхности образцах $n\text{-Si}\langle P,P,Cu\rangle$ и $n\text{-Si}\langle P,P,Ir\rangle$, полученные с использованием АСМ, приведены на рис. 2. В поверхностной области $n\text{-Si}\langle P,P,Cu\rangle$ (рис. 2, а) формируются островки высотой $h \approx 160$ нм и шириной $d \approx 150$ нм и в поверхностной области $n\text{-Si}\langle P,P,Ir\rangle$, (рис. 2, в) формируются островки высотой $h \approx 40$ нм и шириной $d \approx 30$ нм.

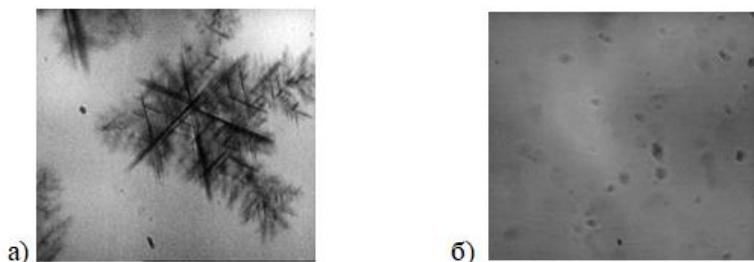
Данные, полученные с использованием АСМ, показывают, что нано островки меди и иридия в твердом растворе $n\text{-Si}\langle P,P,Cu\rangle$ и $n\text{-Si}\langle P,P,Ir\rangle$ имеют геометрическую форму купола, т. е. так называемые *dome* — островки с характерным латеральным размером 30...160 нм с круглым основанием (см.

рис. 2, а и б). Появление таких фазных бугорков в нано структурах меди и иридия, обычно связано с релаксацией упругого напряжения.



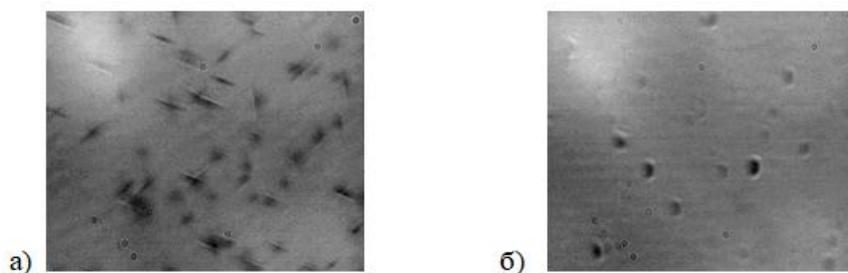
2-рисунок. Двухмерные (а) и трехмерные (б) изображения полученные с помощью Атомно силового микроскопа с образцов $n\text{-Si}\langle P,P,Cu\rangle$ и $n\text{-Si}\langle P,P,Ir\rangle$.

Микрофотографии образцов $\text{Si}\langle\text{Cu}\rangle$ в которых наблюдаются звездообразные дефекты, представляющие собой многочисленные взаимосвязанные кластеры атомов меди вида шести- и четырех-лепестковых розеток, приведены на рис. 3. и $\text{Si}\langle\text{Ir}\rangle$ в которых наблюдаются иглообразные дефекты. Размеры медных кластеров достигают 10...35 мкм, размеры кластеров иридия достигают 1...5 мкм, они распределены по объему кристалла в виде цепочек.



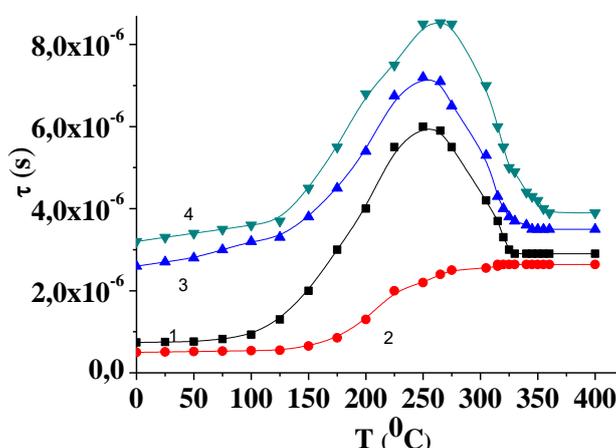
3-рисунок. Снимки предварительно нейтронно облученного кремния после введения атомов меди: быстро охлажденные (а) и медленно охлажденные (б) на (10 мкм - шаг микрометрической шкалы). Температура диффузии 1150°C

Эксперименты показывают, что вид и характер распределения этих структурных дефектов в легированном кремнии играют определяющую роль в формировании электрофизических свойств легированного кремния при внешних воздействиях. Например, с уменьшением размеров кластеров повышается температурная и радиационная стабильность электрофизических параметров $\text{Si}\langle\text{Cu}\rangle$, а $\text{Si}\langle\text{Ir}\rangle$ наоборот.



4-рисунки. Снимки предварительно нейтронно облучения кремния после введения атомов иридия быстро охлажденные (а) и медленно охлажденные (б) на (10 мкм шаг микрометрической шкалы). Температуры диффузии 1150°C

Зависимость времени жизни неосновных носителей заряда от температуры отжига после термодиффузии в предварительно нейтронно облученном и легированном медью и иридиями n-типа кремния показана в 5 рисунке.



6-рисунок. Образцы кремния n-типа зависят от скорости охлаждения неосновных носителей заряда от времени изохронного нагрева.

- 1)- n-Si <P, P> НЛК; 2) -n-Si <P, Cu> кремний, легированный медью;
- 3)-n-Si <P,P,Cu> меди в кремний, предварительно нейтронно облученных;
- 4)-n-Si <P,P,Ir> Температурная зависимость времени пребывания неосновных носителей заряда при введении иридия в кремний, предварительно нейтронно облученных.

Результаты исследования влияния меди и иридия на срок службы неосновных носителей заряда в кремнии типа I (быстрое охлаждение, 250 град/мин) и типа II (медленное охлаждение, 30 град/мин), которые разделены на два типа в зависимости от скорости охлаждения образцов, которые приведены в таблицах 1. Было обнаружено, что срок службы носителей заряда увеличивается в 10 раз, если вводимая медь добавляется к облучаемому образцу, по сравнению с нормальным образцом, и в 100 раз, если добавляется вводимый иридий.

Таблица 1.

Время жизни неосновных носителей заряда в кремнии *p*- и *n*-типа I и II типа легированного медью и иридием

Тип образца	Т _{диф} = 1050 °С		Т _{диф} = 1100 °С		Т _{диф} = 1150 °С	
	I тип τ, с.	II тип τ, с.	I тип τ, с.	II тип τ, с.	I тип τ, с.	II тип τ, с.
n-Si<P>	9·10 ⁻⁷	7,4·10 ⁻⁷	1·10 ⁻⁶	5,4·10 ⁻⁷	7·10 ⁻⁷	4,3·10 ⁻⁷
n-Si<P,P>	6·10 ⁻⁷	5·10 ⁻⁷	3·10 ⁻⁶	2,4·10 ⁻⁷	3,7·10 ⁻⁷	2,3·10 ⁻⁷
n-Si<P,Cu>	9·10 ⁻⁷	2,6·10 ⁻⁶	1,6·10 ⁻⁶	3,8·10 ⁻⁶	5,3·10 ⁻⁶	4,6·10 ⁻⁶
n-Si<P,P,Cu>	1,5·10 ⁻⁶	3,2·10 ⁻⁶	2,8·10 ⁻⁶	5,1·10 ⁻⁶	7,2·10 ⁻⁶	7,8·10 ⁻⁶
n-Si<P,Ir>	3,3·10 ⁻⁵	3,8·10 ⁻⁵	4,7·10 ⁻⁵	6,7·10 ⁻⁵	7,6·10 ⁻⁵	8,8·10 ⁻⁵
n-Si<P,P,Ir>	3,6·10 ⁻⁵	4,3·10 ⁻⁵	5,7·10 ⁻⁵	7,3·10 ⁻⁵	8,6·10 ⁻⁵	9,8·10 ⁻⁵
p-Si	4,7·10 ⁻⁷	8,8·10 ⁻⁷	1,18·10 ⁻⁶	1,3·10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	1,6·10 ⁻⁶
p-Si<B,P>	5,8·10 ⁻⁷	9,6·10 ⁻⁷	1,3·10 ⁻⁶	1,6·10 ⁻⁶	1,7·10 ⁻⁶	2,3·10 ⁻⁶
p-Si<B,Cu>	2,6·10 ⁻⁶	2,2·10 ⁻⁶	3·10 ⁻⁶	3·10 ⁻⁶	4,8·10 ⁻⁶	4,7·10 ⁻⁶
p-Si<B,P,Cu>	4,5·10 ⁻⁶	4,8·10 ⁻⁶	6,4·10 ⁻⁶	6,2·10 ⁻⁶	7,6·10 ⁻⁶	8,8·10 ⁻⁶
p-Si<B,Ir>	2,3·10 ⁻⁵	3,5·10 ⁻⁵	4,2·10 ⁻⁵	5,8·10 ⁻⁵	6,6·10 ⁻⁵	8,8·10 ⁻⁵
p-Si<B,P,Ir>	3,1·10 ⁻⁵	4,1·10 ⁻⁵	4,8·10 ⁻⁵	6,2·10 ⁻⁵	7,2·10 ⁻⁵	9,3·10 ⁻⁵

Приведена зависимость вероятности рекомбинации $1/\tau$ заряда от дозы γ -облучения в легированных и контрольных образцах. Также, показано зависимость изменения времени жизни носителей заряда от дозы γ -облучения в образцах p-Si<B,P>, p-Si<B,P,Cu> и p-Si<B,P,Ir> из наклона кривых определялась величина коэффициента радиационного изменения времени жизни носителей заряда (K_τ).

В эксперименте величина K_τ определяется наклоном участков дозных зависимостей $[\Delta(1/\tau)]/\Delta\Phi$. На начальном этапе облучения до дозы $\sim 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ изменение времени жизни носителей заряда в легированном и контрольном кремнии удовлетворительно описывается следующими выражениями (рис.7):

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + K_\tau F \quad \text{т.э.} \quad \tau = \frac{\tau_0}{1 + \tau_0 K_\tau F}$$

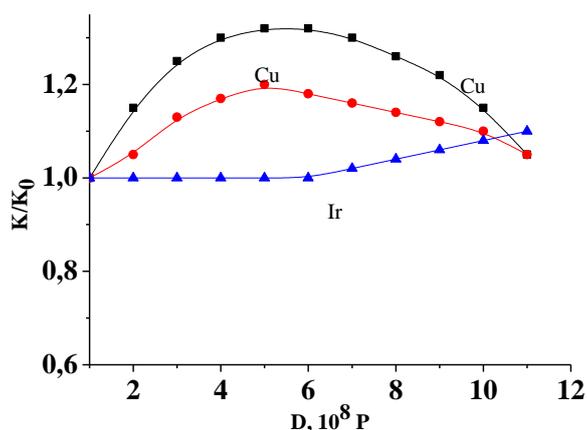
где τ_0 , τ - время жизни носителей заряда до и после облучения, соответственно, Φ - флюенс γ -радиации, K_τ - коэффициент радиационного изменения времени жизни носителей заряда, значения которого приведены в табл.2.

Таблица 2.

Параметры легированного и контрольного кремния р-типа до и после легирования

Тип образца	Р Ом·см	Т _{диф}	Скорость охлаждения, град/мин	N, см ⁻³		τ _о , с	К _τ , см ² /с		
				N _{обш.}	N _{акт.}				
p-Si<B,P>	10	1075	250	5·10 ¹⁷	2·10 ¹³	1,2·10 ⁻⁷	9,5·10 ⁻¹²		
p-Si<B,P,Ir>	10.1							≤10 ¹²	5,4·10 ⁻¹²
p-Si<B,P,Cu>	9.8							4,6·10 ⁻⁶	7,8·10 ⁻¹²
p-Si<B,P>	10	1175	250	9·10 ¹⁷	10 ¹⁴	1,4·10 ⁻⁶	9,1·10 ⁻¹²		
p-Si<P, Ir>	9,1							3,2·10 ⁻⁷	1,2·10 ⁻¹²
p-Si<P,Cu>	8							4,5·10 ⁻⁶	1,9·10 ⁻¹²
p-Si<B,P,Ir>	13							2·10 ¹⁴	6,4·10 ⁻¹²
p-Si<B,P,Cu>	12.8							10 ¹⁴	9,8·10 ⁻¹²
p-Si<B,P>	11	1275	250	1,2·10 ¹⁸	6·10 ¹³	1,6·10 ⁻⁶	4,5·10 ⁻¹²		
p-Si<P,Ir>	9,8							5,9·10 ⁻⁷	2,9·10 ⁻¹³
p-Si<P,Cu>	9,6							10 ¹⁴	3,3·10 ⁻¹³
p-Si<B,P,Ir>	15.8							4·10 ¹⁴	5,4·10 ⁻¹³
p-Si<B,P,Cu>	13.2							3·10 ¹⁴	8,8·10 ⁻¹³
p-Si<B,Ir>	25	1285	250	1,8·10 ¹⁸	7·10 ¹⁴	7,3·10 ⁻⁵	1,5·10 ⁻¹³		
p-Si<B,Cu>	16							4·10 ¹⁴	2,7·10 ⁻¹³
p-Si<B,P,Ir>	3500							1,5·10 ¹⁵	7,4·10 ⁻¹³
p-Si<B,P,Cu>	250							8·10 ¹⁴	2,8·10 ⁻¹⁴

Для выяснения влияния радиационного воздействия на поведение центров примесей (Cu, Ir) в кремнии, образцы облучались γ-квантами до дозы 10⁹ Р (при температуре не больше 40-50 °С), результаты которых приведены на рис.8.



8-рисунок. Изменение светочувствительности к потоку γ-излучения наблюдалось при увеличении дозы облучения образца, в котором атомы меди и иридия были предварительно добавлены в облученный нейтронами кремний.

Как видно из рисунка с ростом дозы облучения по-разному повышается относительное изменение удельной интегральной фото чувствительность-К в

легированном кремнии до определенного флюенса γ -квантов, т.е. чем больше растворимость и коэффициент диффузии примесей в кремнии, тем сильнее повышается K , а в дальнейшем – наоборот, уменьшается. Увеличение K объясняется следующим образом. При диффузии примесей в кремний одновременно вводятся рекомбинационные центры и повышается исходная микро неоднородность по проводимости кремния.

Дальнейший рост дозы облучения в образцах $p\text{-Si}\langle B,P,Cu\rangle$ и $p\text{-Si}\langle B,P,Ir\rangle$, на наш взгляд, благодаря большому коэффициенту диффузии и растворимости Cu и Ir с ростом времени облучения увеличивает количество электрически активных центров примесей в легированном кремнии. Микронеоднородность по проводимости снижается, т.е барьер между высокоомными и низкоомными областями понижается и роль рекомбинационных центров увеличивается.

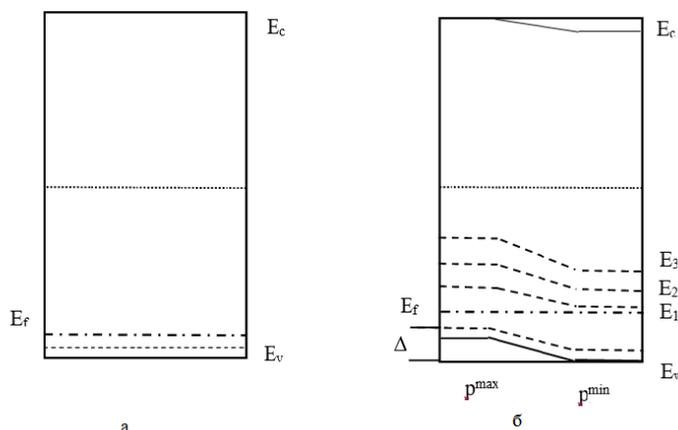
В четвертой главе диссертации «Получение сенсоров на основе кремния, легированного атомами меди и иридия», После диффузии кремния при температуре $1150\text{ }^\circ\text{C}$ потенциальный барьер почти не изменился в образцах $p\text{-Si}\langle B\rangle$, $p\text{-Si}\langle B,P\rangle$. В облученных образцах $p\text{-Si}\langle B,P,Ir\rangle$ и $p\text{-Si}\langle B,P,Cu\rangle$ потенциальный барьер в кремнии, обогащенном внедрением иридия, увеличился в 3 раза по сравнению с обычным образцом. В образце кремния, легированного медью и наблюдалось 2,5- кратное увеличение. Подвижность значительно снижена. После облучения быстрыми нейтронами потенциальный барьер в образцах $p\text{-Si}\langle B\rangle$, $p\text{-Si}\langle B,P\rangle$ практически не изменился. В облученных образцах $p\text{-Si}\langle B,P,Ir\rangle$ и $p\text{-Si}\langle B,P,Cu\rangle$ потенциальный барьер в кремнии, обогащенном иридием, увеличился в 4-5 раз по сравнению с обычным образцом. В кремниевом образце, где произошло растрескивание медной корки, наблюдалось увеличение в 2 раза. Подвижность значительно снижена. Эти параметры кремния приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Приведены параметры кремния до и после легирования.

№	Параметры	$p\text{-Si}\langle B\rangle$	$p\text{-Si}\langle B,P\rangle$	$p\text{-Si}\langle B,P,Ir\rangle$	$p\text{-Si}\langle B,P,Cu\rangle$
После диффузии при температуре $1150\text{ }^\circ\text{C}$.					
1	ρ (ом·см)	10.1	10.1	15.8	13.2
2	N (см ⁻³)	$1.21\cdot 10^{15}$	$1.23\cdot 10^{15}$	$1.31\cdot 10^{16}$	$1.34\cdot 10^{16}$
3	μ (см ² /В·с)	355	365	280	310
4	Δ (мэВ) высокий потенциальный барьер	4.5	4.15	14	10
После облучения быстрыми нейтронами до флуоресценции 10^9 см^{-2}					
1	ρ (ом·см)	5.1	14.8	35.4	20.72
2	N (см ⁻³)	$8.1\cdot 10^{14}$	$1.2\cdot 10^{15}$	$6.8\cdot 10^{15}$	$1\cdot 10^{15}$
3	μ (см ² /В·с)	345	352	260	301
4	Δ (мэВ) высокий потенциальный барьер	6.75	4.5	30	9.4

Ядерные реакции легированного кремния (p-Si <B, P>), введение меди (p-Si <B, P, Cu>) для получения высокоомных, радиационно и термостойких образцов и на их основе разработки метод контроля сопротивления резисторов. То есть из-за разницы в уровне компенсации в полях p^{\max} - и p^{\min} - излучение приводит к увеличению потенциального барьера ($\Delta_0 \rightarrow \Delta$) между этими полями, образуется несколько уровней энергии, т.е. $E_1 = E_V + 0,28$ эВ, $E_2 = E_V + 0,35$ эВ и $E_4 = E_V + 0,4$ эВ (рис. 9 а и б), и образец становится неоднородным по проводимости. Известно, что диффузия атомов меди и иридия во весь объем кремния одновременно образует электрически активные и электрически неактивные центры включений в кремнии.



9-рисунок. Показаны уровни энергии p^{\max} и p^{\min} в неоднородном кремнии p-типа до и после облучения нейтронами. Для случаев со значениями $E_1 = E_V + 0.28$ эВ, $E_2 = E_V + 0.35$ эВ и $E_4 = E_V + 0.4$

Большинство атомов меди электрически неактивны, тогда как в иридии они электрически активны. При легировании кремния атомами меди и иридия использовался монокристаллический кремний n-типа $E_c - (0,42 - 0,52)$ эВ с удельным сопротивлением 3-10 Ом·см в нижней части зоны проводимости при комнатной температуре. при 1150 °С в течение 5 часов методом термодиффузии. Размеры исследуемых образцов составляли $5 \cdot 5 \cdot 0,5$ мм³, а структуры $n^+ - n - n^+$ формировались термодиффузией фосфора при температуре 1050 °С в течение 120 мин.

Компенсированные образцы контролировались по изменению фотоэлектрических параметров отношения - R_T/R_C . Здесь R_T - темновое сопротивление (Ом), R_C - сопротивления при освещении (Ом). Свет и светосопротивление измеряли при энергии $E = 200$ люкс.

Результаты исследования показали что в кремния легированного атомами меди, позволяют создать фото- и термопары с одинаковыми свойствами, работающие в диапазоне температур 305÷370 К, а в кремнии легированного иридием позволяют создать фото- и термодинамики с такими же свойствами, работающие в диапазоне 550÷600 К. Полученные результаты показаны на рисунках 10 и 11.

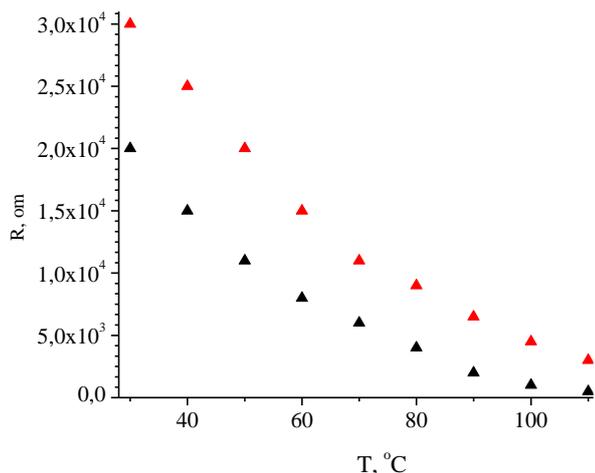


Рисунок 10 График температурной зависимости фоторезисторов (структуры $n^+ - n - n^+$) из кремния, легированного атомом меди: 1– в темноте; 2- в свету ($E = 200$ люкс).

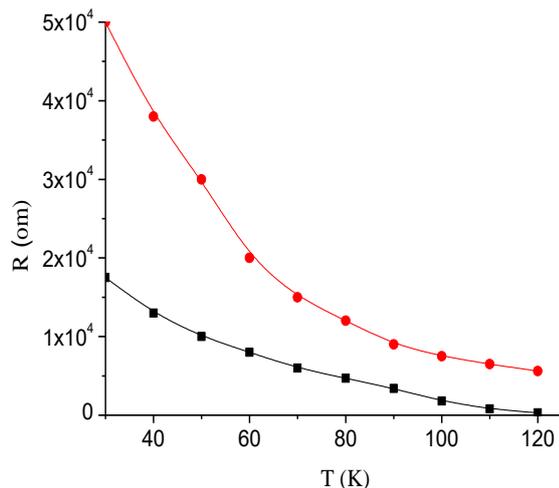


Рисунок 11 График температурной зависимости фоторезисторов (структуры $n^+ - n - n^+$) из кремния, легированного атомом иридия: 1– в темноте; 2 - в свету ($E = 200$ люкс).

Удельное сопротивление образцов кремния, легированных медью и иридием при $\rho_0 = 10$ Ом·см, зависит от термического нагрева термообработанных R_T/R_C , изменения легированных образцов при температуре 597 К в течение 20 мин для стабилизации фотоэлектрических параметров приведены в таблицах 4 а÷б.

Таблица 4а.

Показано, что результаты изменения R_T/R_C после термообработки легированных образцов зависят от термического нагрева

	Относительная изменчивость R_T/R_C			
	Перед термическим отверждением	1,2	1,1	1,12
После термического отверждения	11,2	9,7	11,1	12

Из таблицы видно, что изменение электросопротивления после термообработки увеличивается в несколько раз, а в легированных медью образцах - до 10 раз.

Таблица 4б.

Показано, что результаты изменения R_T/R_C после термообработки легированных образцов зависят от термического нагрева

	Относительная изменчивость R_T/R_C			
	Перед термическим отверждением	2	4.5	9.5
После термического отверждения	80.5	120.5	160.2	145.6

Как видно из таблицы, изменение электросопротивления экспоненциально увеличивается после термообработки, причем в образцах, легированных иридием, наблюдается увеличение до 40 раз.

В этом разделе обсуждаются возможности использования компенсированных термопар с отрицательным коэффициентом теплового сопротивления ТКС. Возможность образования отрицательно коэффициентных ТКС в кремнии, легированном такими соединениями, как Au и Fe, при образовании ГЭУ в ограниченной зоне. Температурная зависимость сопротивления термисторов с отрицательной величиной ТКС носит экспоненциальный характер. Однако значение неизвестного сопротивления может изменяться в очень широком диапазоне (1-10⁶ Ом). Основные параметры и характеристики термистора определяются:

1. R_n - сопротивление термисторов при 25 °С.
2. α - температурный коэффициент сопротивления (ТКС).
3. Коэффициент В - это величина, определяющая температурную чувствительность термопары в отрицательном диапазоне температур. Этот коэффициент зависит от физических свойств полупроводниковых материалов и рассчитывается по следующей формуле:

$$B = \frac{2.3 \cdot \lg\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}$$

Где R₁ - сопротивление термистора, измеренное при температуре T₁.

R₂ - сопротивление термистора, измеренное при температуре T₂.

Основная статистическая особенность термопар заключается в том, что описание этой температуры R = f (T) - реализует остальные характеристики устройства. В термопарах с отрицательным коэффициентом теплового сопротивления эту зависимость можно хорошо проанализировать с помощью следующего математического выражения:

$$R = R_0 \exp(\alpha T)$$

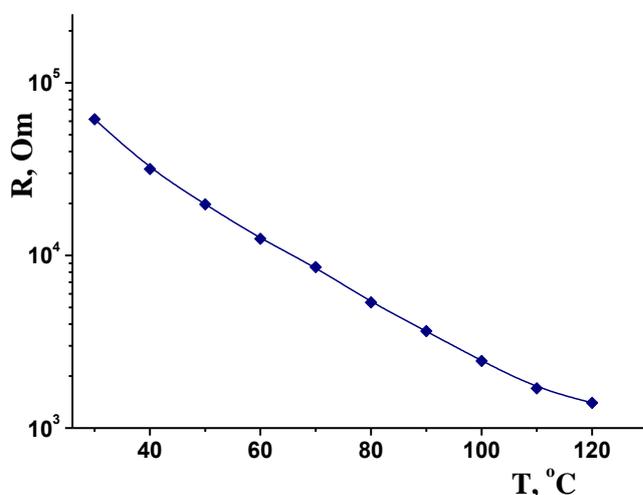
Где α - тепловой коэффициент сопротивления при температуре T; R₀ - постоянный размер.

Чувствительность сопротивления термопар к перепадам температуры определяется термическим коэффициентом сопротивления.

$$\alpha = - \frac{\frac{1}{R}}{\frac{dR}{dT}}$$

Изготовлены термопары из золотого сплава на основе кремния с отрицательной ТКС для изменения температуры поверхности в рабочем диапазоне (273 ÷ 330) К. Тепловой коэффициент таких термопар варьируется от -8% / К при 273 К до - (2 ÷ 3)% / К при 330 К. Материалом образца, использованного при изготовлении термопар, был n-Si<P> ρ_{исх.} ≈ 200 Ом·см. n-Si<P> При легировании этого образца медью значение сопротивления материала при комнатной температуре получается ρ₀ = 70 кОм·см. В этих

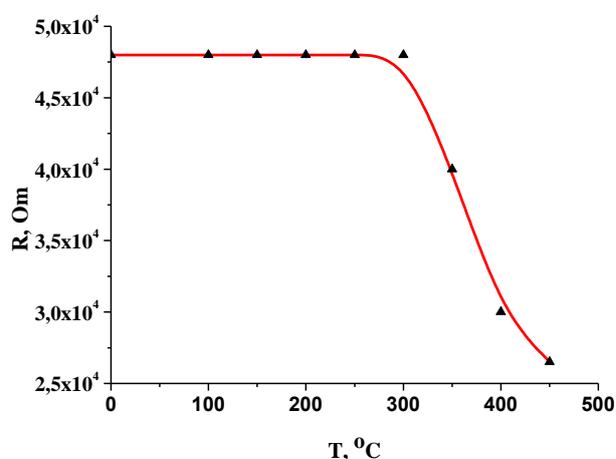
материалах Cu осаждён химическим методом, который обеспечивает омический контакт при температуре ~ 90 °С. Компенсированный кремний изготавливается на основе n-Si<P,P,Cu>, тепловые свойства термодатчиков показаны на рисунке 12.



12-рисунок. Тепловые характеристики термодатчиков на основе I-типа n-Si<P,P,Cu>

Коэффициент термического сопротивления определяется отношением сопротивления материала (ρ) к температуре (T). Однако, когда $\alpha_{293} = -7,85$ %/град $\alpha_{343} = -5,73$ %/, $B = 6743$ К. Известно, что в литературе имеется много работ, посвященных развитию технологии получения высокочувствительных и высокоэффективных термопар на основе компенсированного кремния, легированного отдельными смесями атомов.

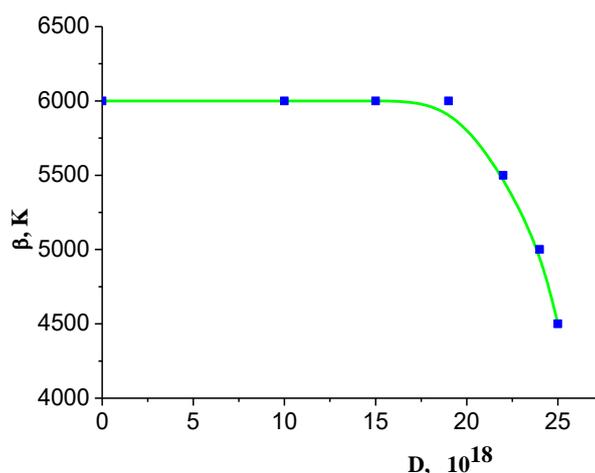
Разработан способ получения кремния с низким сопротивлением $\rho = 5 \div 100$ кОм·см и $B = 6000 \div 7400$ К. Сравнивая наши результаты с результатами, приведенными в литературе, мы пришли к выводу, что термисторы из медно-компенсированного образца n-Si<P,Cu> могут работать в диапазоне $30 \div 300$ °С.



13-рисунок. График зависимости сопротивления от температуры нагрева электронно-резистивной термодатчиков из образца I типа n-Si<P,P,Cu>

Эффект термодиффузии применен к параметрам термодатчика на основе кремния, легированного медью. Как видно на Рисунке 13, термодинамические параметры существенно не изменяются при снижении температуры до ~ 300 °С. Это, в свою очередь, указывает на то, что термопара может работать до 300 °С. Параллельно изучалась радиационная стойкость термопар на основе $n\text{-Si}\langle\text{P,P,Cu}\rangle$.

На рисунке 14 показана зависимость термической чувствительности $n\text{-Si}\langle\text{P,P,Cu}\rangle$ от дозы облучения ^{60}Co γ . Образцы облучали γ -излучением ^{60}Co с интенсивностью $\sim 6.5 \cdot 10^2 \text{ P} \cdot \text{с}^{-1}$ в диапазоне $\sim 10^7 \div 10^9 \text{ P}$. Температура облучения образца не превышала ~ 50 °С.



14-рисунок. Температурная чувствительность электронно-резистивных термодатчиков из образца I типа $n\text{-Si}\langle\text{P,P,Cu}\rangle$ γ -излучения зависимости от дозы облучения

Параметры термопар на основе кремния с компенсацией $n\text{-Si}\langle\text{P,Cu}\rangle$ не претерпели значительных изменений вплоть до дозы $\sim 2 \cdot 10^9 \text{ P}$.

ВЫВОДЫ

1. Впервые обнаружено, что концентрации включений меди и иридия в кремнии, предварительно облученного нейтронами, выше, чем в обычном кремнии. Это объяснялось вакансиями, образовавшимися в результате излучения.

2. Впервые было обнаружено, что скорость распада легированных примесей в образцах $n\text{-Si}\langle\text{P,P,Ir}\rangle$ и $n\text{-Si}\langle\text{P,P,Cu}\rangle$ была ниже, чем в образцах $n\text{-Si}\langle\text{P,Ir}\rangle$ и $n\text{-Si}\langle\text{P,Cu}\rangle$. Это объяснялось увеличением потенциального барьера между областями высокоомго и низкоомго сопротивления.

3. В образцах кремния, предварительно облученных нейтронами и легированными атомами меди, показано увеличение стойкости на температуры и радиации, а в необлученных и легированных медью кремниевых образцах n -типа их уменьшение, в образцах p -типа - увеличение и в кремнии легированного иридием, нейтронно-облученных и необлученных образцах уменьшение стойкости по сравнению с контрольными образцами.

4. Установлено, что в объеме кремния образуются кластеры атомов иридия с игольчато-дефектными мелкогазмерными составами и их распределением на противоположной плоскости, перпендикулярной направлению диффузии иридия, увеличивается объем дефектно-смешанных мелкогазмерных составов от 5 мкм до 30 мкм.

5. Впервые было обнаружено, что время жизни неосновных носителей заряда в кремнии, легированного атомами меди, в кислородных образцах ($> 10^{17} \text{ см}^{-3}$) увеличивается до 10^{-5} с, а в бескислородных образцах уменьшается до 10^{-8} с, а в образцах легированных иридием увеличивается до 10^{-5} и не зависит от кислорода. Эффект объясняется появлением уровней прилипания.

6. Повышение радиационной стойкости рекомбинационных и электрофизических свойств p-Si<P,B,Cu> и n-Si<P,P,Ir> под действием γ -квантов до дозы $\sim 10^9$ P позволяет создать новый метод производства радиационных фотоприемников.

7. Рекомендовано изготовление радиационно-стойких фотоэлементов, фоторезисторов и термопар с интервалом рабочей температуры 300-570 К на кремниевой основе, предварительно облученными нейтронами и легированными атомами меди и иридия.

8. После термообработки в предварительно нейтронно-облученном и легированном кремнии атомами меди и иридия при освещении электросопротивление увеличивается до 10 раз и до 40 раз, соответственно.

**SCIENTIFIC COUNCIL of PhD.03/27.02.2020.FM.106.01
ON AWARD OF PHILOSOPHY DOCTOR DEGREE
AT FERGHANA POLYTECHNIC INSTITUTE OF UZBEKISTAN**

NAMANGAN INSTITUTE OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY

MIRZARAYIMOV JAHONGIR ZOKRJONIVICH

**Electrophysical and recombination properties of silicon microinhomogeneously
doped with Cu and Ir atoms**

01.04.07- Condensed matter physics

**DISSERTATION ABSTRACT
of the Doctor of Philosophy (PhD) on Physical and Mathematical Sciences**

Ferghana – 2022

The theme of dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under No. B2022.2.PhD/FM377.

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at Namangan institute of engineering and technology.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English resume) languages on the website of Scientific Council at www.ferpi.uz and on the website of «ZiyoNet» informational and educational portal at www.ziynet.uz.

Scientific supervisor:

Makhmudov Sherzod Axmadovich
PhD Physical and Mathematical, docent

Official opponents:

Nuritdinov Izzatilla
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

Asqarov Boxodir
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, docent

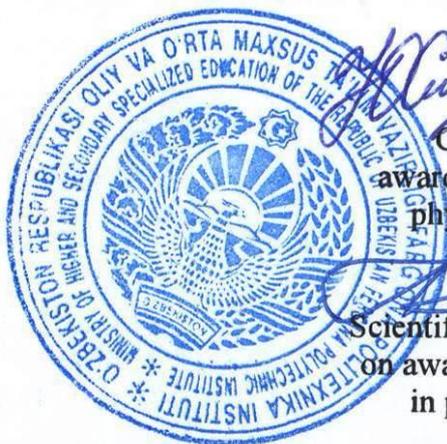
Leading organization:

Research Institute of Semiconductor physics and microelectronics under the National University of Uzbekistan

The defense of the dissertation will take place on «22» 12 2022 at 14-00 at the meeting of Scientific Council number PhD.03.27.02.2020.FM.106.01 at the Ferghana Polytechnic Institute. Address: 150107, Uzbekistan, Ferghana, 86 Ferghana Str., Tel.: (+99873) 241-13-03, (+99873) 241-12-06; e-mail: ferpi_info@edu.uz.

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through in the scientific and methodological department of the Information-Resource Centre of the Ferghana Polytechnic Institute (registered under No. 139) Address: 150107, Uzbekistan, Ferghana, 86 Ferghana Str., Tel.: (+99873) 241-13-03.

Abstract of dissertation sent out on «10» 12 2022.
(Registry record No 008-11 dated «09» 12 2022)



N.H. Yuldashev
Chairman of Scientific Council on award of PhD scientific degree, Dsc in physics and mathematics, professor.

B.Z. Polvonov
Scientific secretary of Scientific Council on award of PhD scientific degree, PhD in physics and mathematics, docent.

K.E. Onarkulov
Chairman of Scientific seminar at Scientific Council on award of PhD scientific degree, Dsc in physics and mathematics, professor.

INTRODUCTION (annotation of PhD dissertation)

The aim of the research work it consists in studying the effect of micro-inhomogeneities on the electrophysical and recombination properties of nuclear-transmuted silicon previously irradiated with neutrons and doped with copper and iridium.

The tasks of the research work

obtaining samples of silicon doped with copper and iridium of different concentrations;

study of the influence of the concentration of copper and iridium atoms on the lifetime of minor charge carriers in n- and p-type silicon samples;

determination of the physical mechanisms of the processes occurring during thermal and radiation treatment of Si <B,P,Cu> and Si <B,P,Ir> samples;

study of the effect of low-temperature annealing on the electrical properties of Si <B,P,Cu> and Si <B,P,Ir> samples;

study of the influence of copper and iridium on the efficiency of formation of radiation defects in samples of Si <B,P,Cu> and Si <B,P,Ir> under γ -irradiation;

development of radiation-resistant semiconductor sensors based on Si <B,P,Cu> and Si <B,P,Ir> samples and consideration of the possibility of their application in practice.

The object of the research work silicon doped with rapidly diffusing impurities of copper and iridium, as well as pre-neutron irradiated silicon.

The subject of research work electrophysical, recombination properties of a pre-irradiated silicon sample, processes of thermal and radiation treatment of silicon doped with rapidly diffusing impurities of copper and iridium.

Scientific novelty of the research work is as follows:

-it was determined for the first time that the concentration of electrically active atoms of copper and iridium inputs in silicon irradiated with neutrons in the range 10^{16} - 10^{18} neytr./ sm^2 was 1.5 times greater than in non-irradiated silicon.

-it was found for the first time that in silicon samples pre-irradiated with neutrons in the range of 10^{16} - 10^{18} neytr./ sm^2 and doped with copper atoms, the lifetime of non-primary charge carriers increased by 10^{-5} sec, and in non-irradiated Si<P, Cu> samples it turned out to be equal to 10^{-7} sec. It was found for the first time that in silicon samples pre-irradiated with neutrons in the doped with iridium atoms, the lifetime of non-main charge carriers increased by 10^{-4} sec, and in non-irradiated Si<P,Ir> samples it turned out to be equal to 10^{-5} sec.

-also, for the first time, the lifetime of minor charge carriers in silicon doped with copper atoms was found to increase to 10^{-5} s in samples with oxygen ($>10^{17}$ sm^{-3}). In samples without oxygen, it decreased to 10^{-8} s. In silicon samples doped with iridium, increase to 10^{-5} s. in which it is doped with iridium atoms, it was found that the lifetime of charge carriers does not depend on oxygen.

-for the first time, a technology has been developed for obtaining sensors that are resistant to external influences from a silicon sample Si<B,P,Cu>, Si<B,P,Ir> doped at high temperatures of 1250 °C.

Implementation of research results. Based on the results obtained in the study of the electrophysical characteristics of elements with semiconductor properties (Si <B,P,Cu>), (Si <B,P,Ir>) and the method of their preparation:

OT-Φ2-11, performed by the Research Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics at the National University of Uzbekistan based on the results of the results of an increase in temperature and radiation resistance in silicon samples doped with pre-irradiated copper and iridium atoms, compared with non-irradiated samples, and in the case of iridium samples - a decrease. It was used in the implementation of a fundamental project on the topic "Investigation of the patterns of formation of nanoscale defects in the surface layers and volume of silicon doped with d-elements". (Information № 01IK/1-113 dated 17.12.2021 of the Research Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics of UzMU). The use of the results of this study led to the optimization of the technology for producing silicon doped with d-element slag, it was determined that the resistance to temperature and radiation increased by 2 times. In addition, the concentration of nanoscale defects in the surface layers and the volume of silicon decreased by 2-3 times;

The results of changes in the residence time of non-basic charge carriers in pre-irradiated silicon samples doped with copper atoms were used in the project of the Andijan Engineering Institute № Φ-2-001 "Photosensitivity and transfer of charge carriers to a GaAs/Ge/ZnSe semiconductor solid mixture under the influence of radiation". (reference of the Andijan Machine-Building Institute №38-05/1788 dated 12/17/2021). As a result, it was found that oxygen-containing ($> 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) and non-oxygenated silicon doped with copper atoms allows increasing and decreasing the residence time of non-basic charge carriers, respectively.

Approbation of the results of the study. The scientific results of the dissertation were presented and discussed at 6 international and 4 republican scientific conferences.

Publication of the research results. A total of 16 scientific works were published on the topic of the dissertation, of which 6 articles were published in scientific publications, including 3 foreign and 3 republic journals, in which the main scientific results of doctoral dissertations of the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan were recommended for publication.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, fo chapters, a conclusion, a list of references and applications. The of the dissertation consists of 115 pages, including 30 figures and 15 tables.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (1 часть; part 1)

1. Mahmudov Sh.A., Mirzarayimov J.Z., Rafikov A.K.. “Clusters of atoms of copper and irridium and their influence on recombination properties of silicon” \\International journal of multidisciplinary reserch and analysis. Volume 3 issue 09 september 2020. Pp 94-98 .(№35 CrossRef, SJIF:6,072)
2. Mahmudov Sh.A., Mirzarayimov J.Z., Rafikov A.K.. “Effect of γ - radiation ^{60}Co on the photosensitivity of overcompensated silicon” \\International journal of progressive sciences and technologies.ISSN: 2509-0119 september 2020 . Pp 12-15. (№35 CrossRef, SJIF = 6,662)
3. Maxmudov SH.A., Sulaymonov A.A., Rafikov A.K., Mirzarayimov J.Z.. “The Dependence of Charge Carriers on the Methods of Thermal Processing of Residence Time on Silicon, Legalized with Copper and Iridium”. Journal of Nuclear Energy Science & Power Generation Technology. 30 May 2022, DOI: 10.4172/ 2325-9809.1000287 Pp 1-5 (№35 CrossRef , SJF=1.26)
4. Tashmetov M.Yu., Makhmudov Sh.A., Rafikov A.K., Mirzarayimov J.Z. “Effect of γ -radiation on the lifetime of charge carriers in silicon doped with copper and iridium” \\ Physics of semiconductors and microelectronics Tashkent 2021. 3-vol. 5 Issue, pp.141-147. [01.00.00, №11]
5. Мирзарайимов Ж.З.. “Исследование влияния характера термообработки на время жизни носителей заряда в кремнии, Легированном медом”. // Научный вестник НамГУ (Узбекистан). 2020 г. - №1. С 70-76. [01.00.00,]
6. Махмудов Ш.А., Мирзарайимов Ж.З.“Исследование времени жизни носителей заряда в нейтронно-легированном кремнии в зависимости от концентрации исходного бора”.// Научный вестник БухГУ (Узбекистан). 2020. - №4 С 57-67 [01.00.00,]

II бўлим (2 часть; part 2)

1. Makhkamov Sh., Tashmetov M.Yu., Makhmudov Sh.A., Rafikov A.K., Sulaymonov A.A., Mirzarayimov J.Z.”Study of thermal stability of life time of charge carriers in overcompensated n-Si<B,P>” // The Ninth International Conference —Modern Problems of Nuclear Physics and Nuclear Technologies|, September 24-27, 2019 (O’zbekiston).-№9. Pp 221-223.
2. Makhkamov Sh., Tashmetov M.Yu., Makhmudov Sh.A., Rafikov A.K., Sulaymonov A.A., Mirzarayimov J.Z.. “Photoresistors based on compensated Si<B,P>”// The Ninth International Conference —Modern Problems of Nuclear Physics and Nuclear Technologies|, September 24-27, 2019 (O’zbekiston).-№9. Pp 227-229 .
3. Ташметов М.Ю., Махмудов Ш.А., Одилова Н.Ж., Сулаймонов А.А., Рафиков А.К., Мирзарайимов Ж.З., Абдурайимов Б.Ж.“К вопросу гофрированной

- зоны в компенсированном кремнии. II международный научный форум” // «Ядерная наука и технологии», 24-27 июня 2019 года. Алматы, Республика (Казахстан). С 104-105
4. Makhkamov Sh., Mirzarayimov J.Z., O'ktamaliyev B.I. “Introduction of radiation and copper into semiconductor silicon radiation resistance method creation of technology”. // International scientific and practical conference cutting edge-science. July, 2020 Shawnee, USA Conference Proceedings DOI: http://doi.org/10.37057/U_2 g Pp104-105
 5. Ташметов М.Ю., Махкамов Ш., Махмудов Ш.А., Сулаймонов А.А., Рафиков А.К., Одилова Н.Ж, Мирзарайимов Ж.З. “Влияние γ – радиации на время жизни носителей зарядов кремнии, легированном медью и иридием” // Международная конференция «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» 22-23 сентября 2020г Ташкентс. С 56-58
 6. Махмудов Ш.А., Ташметов М.Ю., Махкамов Ш., Саттиев А.Р., Сулаймонов А.А., Рафиков А.К., Мирзарайимов Ж.З. “Влияние кислорода на рекомбинационные свойства кремния легированного медью” // Андижон 2020 г, 24-25 декабрь. С 161-163
 7. Махмудов Ш.А., Рафиков А.К., Мирзарайимов Ж.З., Сулаймонов А.А., Мирзарайимов Ф.З., Жўраева М.Ф. Олдиндан нейтрон билан легирланган монокристалли кремнийни мис ва иридий атомлари критик йўли орқали фоторезисторлар олиш. // Наманган 2021 йил, 24-25 июнь. С 155-158
 8. Махмудов Ш.А., Рафиков А.К., Мирзарайимов Ж.З., Сулаймонов А.А., Мис аралашмалари билан легирланган кремний асосида ташқи таъсирларга чидамли қаршиликлар олиш. // “Яримўтказгичлар ва полимерлар физикасининг долзарб муаммолари” мавзусидаги Республика илмий-амалий анжумани. Тошкент, 2022 йил, 1-февраль, С 99-102
 9. Махмудов Ш.А., Рафиков А.К., Мирзарайимов Ж.З., Сулаймонов А.А.. Термодатчик учун Cu ва Ir билан легирланган кремнийнинг заряд ташувчилар вақтини кислородга боғлиқлигини ўрганиш. // "Фан, таълим ва ишлаб чиқариш интеграцияси-тараққиёт ва фаровонлик калити" халқаро илмий-амалий анжумани, 3-жилд, Навоий ш., Ўзбекистон Республикаси, 2022, С 105-109
 10. Ташметов М.Ю., Махмудов Ш.А., Сулаймонов А.А., Рафиков А.К., Одилова Н.Ж., Мирзарайимов Ж.З, Абдурайимов Б.Ж.. Ярим ўтказгичли кремнийга радиациявий ва киритма киритиш усули билан радиацияга чидамли қаршиликларни олиш технологиясини яратиш // Ёш олимлар ахборотномаси (Ўзбекистон). 2019. - №1. 108-111 б.

Илмий раҳбар

Ш.А.Махмудов

Талабгор

Ж.З.Мирзарайимов

Авторефератининг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари
Фарғона политехника институту муассислигидаги
“Scientific technical journal” журнали таҳририятида таҳрирдан
ўтказилди. ____ . ____ . ____ йил

Босишга рухсат этилди: 2022 й. Нашриёт босма табағи:-3,5.
Шартли босма табағи:-1,75. Бичими 84x108 1/16. Адади 100.

Баҳоси келишилган нархда.

“POLIGRAF SUPER SERVIS” МЧЖ

150144, Фарғона вилояти, Фарғона шаҳри, Фвиасозлар кўчаси, 2-уй

