

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.FM/Т.33.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ

СУЛАЙМОНОВ АБДУРАХМОН АБДУРАШИДОВИЧ

**НЕЙТРОНЛАР БИЛАН НУРЛАНТИРИШ ОРҚАЛИ ЛЕГИРЛАНГАН
КРЕМНИЙ МОНОКРИСТАЛИ АСОСИДА ТЕРМОРАДИАЦИОН
ДАТЧИКЛАР ИШЛАБ ЧИҚИШ**

01.04.01 – Экспериментал физиканинг асбоблари ва усуллари

**Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси
АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2021

**Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси
автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)
по техническим наукам**

**Content of the dissertation abstract of the doctor of philosophy (PhD)
on technical sciences**

Сулаймонов Абдурахмон Абдурашидович

Нейтронлар билан нурлантириш орқали легирланган кремний
монокристалли асосида терморрадиацион датчиклар ишлаб чиқиш..... 3

Сулаймонов Абдурахмон Абдурашидович

Разработка терморрадиационных датчиков на основе нейтронно
легированного монокристаллического кремния..... 25

Sulaymonov Abdurakhmon Abdurashidovich

Development of thermo-radiation sensors based on neutron doped
monocrystalline silicon 43

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works..... 47

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.FM/Т.33.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ

СУЛАЙМОНОВ АБДУРАХМОН АБДУРАШИДОВИЧ

**НЕЙТРОНЛАР БИЛАН НУРЛАНТИРИШ ОРҚАЛИ ЛЕГИРЛАНГАН
КРЕМНИЙ МОНОКРИСТАЛИ АСОСИДА ТЕРМОРАДИАЦИОН
ДАТЧИКЛАР ИШЛАБ ЧИҚИШ**

01.04.01 – Экспериментал физиканинг асбоблари ва усуллари

**Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси
АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2021

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2021.3.PhD/Т2342 рақами билан рўйхатга олинган.

Диссертацияси Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ядро физикаси институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифаси (www.inp.uz) ва «Ziyonet» ахборот-таълим порталида (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар: **Ташметов Маннаб Юсупович**
физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар: **Ёдгорова Дилбар Мустафаевна**
техника фанлари доктори, профессор

Қурбанов Бахтияр Ибрагимович
техника фанлари доктори, катта илмий ходим

Етакчи ташкилот: **М.Улуғбек номидаги Ўзбекистон Миллий университети**

Диссертация ҳимояси Ядро физикаси институти ҳузуридаги DSc.02/30.12.2019.FM/Т.33.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2021 йил _____ соат _____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100174, Тошкент шаҳри, Улуғбек кўрғони, Ядро физикаси институти. Тел. (+99871) 289-31-41; факс (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

Диссертация билан Ядро физикаси институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (_____ рақами билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100214, Тошкент шаҳри, Улуғбек кўрғони, ЯФИ. Тел. (+99871) 289-31-19).

Диссертация автореферати 2021 йил « ____ » _____ куни тарқатилди.
(2021 йил “ ____ ” _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси)

И.И. Садиков

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш раиси ўринбосари,
т.ф.д., катта илмий ходим

О.Р. Тожибоев

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш илмий котиби, ф.м.ф. PhD

И. Нуритдинов

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш ҳузуридаги илмий семинар раиси
ф.-м.ф.д., профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Бугунги кунда бутун дунёда яримўтказгич материаллар қаттиқ жисм электроникасида энг кўп ишлатиладиган элементлардан бири ҳисобланади. Улар илм фан ва саноатнинг турли соҳаларида фото ва термодатчиклар сифатида ҳам кенг қўлланилмоқда. Маълумки, базавий материалларга, хусусан, терморезисторлар ишлаб чиқаришда қўйиладиган асосий талаб материалнинг электр қаршилигининг ҳарорат таъсирига юқори сезгирлигидир. Физик хусусиятларга кўра, асосий материалга қараб, терморезисторлар қаршилиқнинг мусбат ва манфий ҳарорат коэффициентига эга бўлган икки гуруҳга бўлинади. Терморезисторларнинг ҳароратга сезгирлиги диапазони материалнинг электрофизик параметрлари ва хусусиятлари билан белгиланади. Асосий материалнинг параметрлари ва хусусиятларини ўзгартириб, терморезистор қаршилигининг ҳароратга боғлиқлигини кенг чегарада тартибга солиш мумкин.

Сўнгги йилларда дунёда яримўтказгичлар, оксидли диэлектрик материаллар ва турли хил қотишмаларга асосланган ҳар-хил тузилишдаги турли терморезисторларни ишлаб чиқариш жадал давом этмоқда. Терморезисторларни ишлаб чиқариш учун яримўтказгичли материаллар ва бирикмалар кенг қўлланилади ҳамда бу ҳар-хил ҳарорат датчикларини яратишга имкон беради. Улардан бири юқори солиштирма қаршилиқка эга бўлган монокристалл кремнийдир. Бундай материални саноат шароитида олиш унинг тозаллиги ва радиал бир хил солиштирма қаршилиқка эгаллигини таъминлаш қийинлиги сабабли катта сарф-ҳаражат талаб қилади. Амалда ушбу муаммоларни бартараф этиш учун намуналарни ўстириш жараёнида, юқори ҳароратда диффузия ёки ион имплантацияси билан ҳам кремнийга турли хил аралашмалар киритиш усули кенг қўлланилади. Санаб ўтилган бу усулларнинг камчилиги намуналарни легирлаб ҳажм бўйича бир хил солиштирма қаршилиқка эга терморезисторлар олиш имконини бермаслигидир.

Ҳозирги кунда радиациявий технологиядан фойдаланган ҳолда асосий материалда радиацион нуқсонларни шакллантиришга асосланган ҳолда зарур хусусиятлар ва параметрларга эга материални олишнинг янги усуллари яратилмоқда. Шу сабабли, терморезисторларни тайёрлашда қўлланиладиган асосий материаллар параметрларининг ишлаб чиқаришда бир хиллигини доимо таъминлаш ва ҳарактеристикаларини яхшилаш, бир хил солиштирма қаршилиқка эга бўлган терморезисторлар тайёрлаш, таъсир ҳароратини эслаб қолувчи датчикларнинг ҳароратга сезгирлик чегарасини кенгайтириш бўйича янги усулларни тадқиқ этиш ва ишлаб чиқиш замонавий қаттиқ жисмлар электроникаси ва унга алоқадор фан ва техника соҳаларининг долзарб муаммоларидан бири ҳисобланади. Республикамизда ядро физикаси тадқиқотлари ютуқларини инновацион асбобсозлик ва махсус ўлчов ускуналарида амалда қўллашга катта эътибор қаратилмоқда. Шу муносабат

билан ушбу диссертация ишида кўриб чиқилган муаммолар, шубҳасиз, катта амалий қизиқиш уйғотади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича 2017-2021 йиллардаги Ҳаракатлар стратегияси¹ тўғрисида”, 2017 йил 16 февралдаги ПФ-4958-сон “Олий ўқув юртидан кейинги таълим тизимини янада такомиллаштириш тўғрисида”ги Фармонлари, 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон “Фанлар академияси фаолиятини янада такомиллаштириш, илмий ишларни ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштириш бўйича чора тадбирлар тўғрисида”ги Қарори ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Диссертация тадқиқотлари республика фан ва технологияларни ривожлантиришнинг II. «Энергетика, энергия тежамкорлиги ва муқобил энергия манбалари» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Кремнийнинг электрофизикавий параметрларини компенсацияловчи киришмалар билан легирлаш ёки нуқсонли ҳолатларни киритиш йўли билан мақсадли йўналишда ўзгартириш бўйича тадқиқотлар бу соҳадаги дунёнинг етакчи олимлари, хусусан россиялик (Асина С.С., Шевченко В.Г., Ионов А.Н.), америкалик (Michel Kozhukh), украиналик (Долголенко А.П. ва бошқалар), япониялик (Shin'ichiro Takasu), ўзбекистонлик (Юнусов М.С., Каримов М., Муминов Р.А., Бахадирханов М.К., Зайнобиддинов С.З., Махкамов Ш., Ёдгорова Д.М., Раджапов С.А.) ва бошқа олимлар томонидан олиб борилмоқда.

Илмий нашрларда ва монографияларда эълон қилинган легирланган яримўтказгичлар бўйича маълумотлар шуни кўрсатадики, мавжуд радиациявий усуллар ёрдамида кристалларга киришма атомларини киритиш ва диффузиялаш жараёнлари умуман олганда кристалл бутун ҳажми бўйлаб биржинсли легирлаш имконини бермайди. Намуналардаги компенсацияланиш даражаси ўзаро сезиларли даражада фарқ қилади. Катта энергияли электронлар оқими билан кремнийни радиациявий компенсациялаш эса оқимнинг диапазони, энергияси ва биржинслилиги ҳамда нурлантирилаётган кристалл ўлчамлари билан чекланган.

Ион имплантация йўли билан компенсацияловчи киришмаларни киритиш маълум бир қалинликдаги (ионларнинг энергияларига боғлиқ равишда бир неча микронгача) компенсацияланган материал олиш имконини беради. Бунда базавий материал ҳажмида компенсация содир бўлмайди ва бир неча микрон қалинликдаги компенсацияланган қатлам асосида керакли геометрик ўлчамли терморезисторлар тайёрлаш амалда жуда мураккабдир.

¹ 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”ги Ўзбекистон Республикаси Президентининг Фармони.

Юқорида баён қилинганларга кўра биржинсли, юқори қаршиликка эга яримўтказгич материал олиш масаласи компенсацияловчи киришмалар ёки нуқсонли ҳолатлар киритишнинг янгича ёндашувлари ва усулларини қидириб топиш ҳамда ишлаб чиқишни талаб қилади.

Диссертация тадқиқотининг диссертация иши бажарилган илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режаларига боғлиқлиги. Диссертация иши Ядро физикаси институти илмий-тадқиқот ишлари режасининг ФА-А14-Ф063 “Терморезисторлар тайёрлаш учун нейтрон билан компенсирланган кремний олиш технологиясини ишлаб чиқиш” (2009-2011), АЗ-ФА-Ф124 “Радиациявий ишлов услубида юқори даражали компенсирланган кремний олиш технологияси ва унинг асосида датчиклар яратиш” (2012-2014), АЗ-ФА-Ф003 “Компенсирланган кремний датчиги асосида озиқ овқатлар сақланадиган омбор температурасини ва намлигини узоқ масофадан назорат қилиб турадиган қурилмани яратиш” (2015-2017) лойиҳалари ҳамда “Легирланган монокристаллик кремний ядро трансмутациясида радиацион-стимулланган жараёнлар” (2020-2024) мавзуси доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади таркибида фосфор атомлари бўлган компенсацияланган монокристалл кремний олишнинг радиациявий технологиясини ишлаб чиқиш, унинг асосида юқори сезгирликка эга бўлган терморрадиацион датчиклар яратишдан иборат.

Тадқиқотларнинг вазифалари:

кремнийдаги дастлабки технологик киришмалар ва унинг электрофизик параметрларининг радиацион ишлов бериш жараёнида компенсацияланиш даражасига таъсирини ўрганиш;

атом реакторининг секин нейтронлари оқимида радиацион ишлов бериш йўли билан кремнийни юқори даражада компенсациялашга эришган ҳолда фосфор атомлари билан легирлашни амалга ошириш;

нейтронлар билан рағбатлантириб легирланган кремний олиш ва *i*-типли юқори қаршиликли биржинсли компенсацияланган кремний олишда радиацион ва термик ишлов беришнинг оптимал шарт-шароитларини аниқлаш;

юқори сезгирликка эга бўлган ядровий нурланиш детекторларини ва солиштирма қаршилиги 100÷170 Ом·см ли термо- ва фоторезисторларни, 273÷398 К температуралар оралиғида ишлайдиган ёнғиндан хабар бериш датчикларининг нейтронлар билан рағбатлантириб легирланган кремний асосдаги элементларини олиш технологияларини ишлаб чиқиш;

n-типли кремнийнинг электр қаршилигини ўзгаришига асосланган атом реакторининг секин нейтронлар оқими зичлигини тезкор аниқлаш усулини ишлаб чиқиш;

компенсацияланган кремний асосида яратилган терморрадиацион датчикларнинг лаборатория макетини синовдан ўтказиш, уларнинг электрофизик параметрларини ва қўлланиш соҳаларини аниқлаш.

Тадқиқотнинг объекти нейтронлар билан рағбатлантириб легирланган ва радиацион ишлов берилган кремний монокристалли ҳамда ёнғинга қарши

терморацион датчиклар ва нейтронлар оқимини ўлчаш учун детекторлар ташкил этади.

Тадқиқот предмети компенсацияланган кремнийдаги нейтронлар билан рағбатлантирилган жараёнлар, температурани ва нейтронлар оқими зичлигини назорат қилиш учун датчиклар олиш усуллари ташкил этади.

Тадқиқот усуллари. Нейтронлар билан нурлантириш усули, резисторнинг қаршилигини ҳароратга боғлиқ тарзда ўлчашнинг электр усули, Холл эффекти усули билан заряд ташувчилар концентрациясини ва солиштирма қаршилиқни ўлчаш.

Тадқиқотларнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

номинал солиштирма қаршилиги $(4\div 8)\cdot 10^5$ Ом·см бўлган компенсацияланган кремний монокристалини олиш учун p - ва n -типли саноат намуналарига радиацион ва термик ишлов беришнинг оптимал режимлари аниқланган;

терморацион датчик тайёрлаш учун юқори қаршилиқли кремний олиш усули таклиф қилинган ва ёнғиндан хабар бериш тизими учун $273\div 398$ К температуралар оралиғида ишлайдиган компенсацияланган кремний асосида термодатчик ишлаб чиқилган;

ВВР-СМ тадқиқот атом реакторида нейтронлар оқими зичлигини аниқлашнинг, дастлабки солиштирма қаршилиги $1\div 5$ Ом·см бўлган n -типли кремнийнинг электр қаршилиги ўзгаришига асосланган тезкор усули ва датчиги ишлаб чиқилган;

ишлатилган n^+-n-n^+ структурали терморезисторлар 473 К гача температурада иссиқлик билан қайта ишланганда амалда электрофизик параметрларини қайта тиклаши аниқланган.

Тадқиқотларнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

n -типли, радиацион нуқсонлар билан компенсацияланган кремний асосида $273\div 398$ К температуралар оралиғида иссиқликка сезгир n^+-n-n^+ структуралар олиш усули ишлаб чиқилган ва патент билан ҳимояланган, уларни амалда қўллаш мумкин бўлган соҳалар белгилаб олинган;

ядровий усулда легирланган монокристалл кремний асосида радиациявий датчиклар олиш технологияси таклиф қилинган ва амалда қўлланган ҳамда уларни атом реакторида нейтронлар оқимининг зичлигини ўлчашда қўллаш мумкинлиги кўрсатиб берилган;

тез нейтронлар билан нурлантириш орқали солиштирма қаршилиги $100\div 170$ Ом·см ли n -типли кремнийдан сезгирлиги юқори бўлган термо- ва фоторезисторлар тайёрлаш имконияти кўрсатиб берилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончилиги замонавий, юқори аниқликдаги усул ва ускуналарнинг қўлланилганлиги ҳамда назарий ва амалий тадқиқотлар билан илмий асосланганлиги, намуналарга ишлов беришнинг яхши маълум ва асосланган технологик усулларида фойдаланилганлиги билан асосланади. Радиометрик тадқиқотларнинг тавсия этилган усули патент билан ҳимояланган ва кремнийдан ҳар хил қурилмаларда ишлатиб синовдан ўтган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Натижаларнинг илмий аҳамияти кремний монокристаллида ҳосил қилинган $n^+ - n - n^+$ структураларнинг температурага боғлиқ ўзгарадиган электрофизикавий параметрларининг ВВР-СМ атом реакторининг тез ва секин нейтронлари оқимида ўзгариш қонуниятларини аниқлашда намоён бўлади.

Ишнинг амалий аҳамияти шундаки, терморрадиацион датчикларнинг сезгирлигини ошириш учун кремнийда тез нейтронлар билан нурлантириш жараёнида пайдо бўладиган радиацион нуқсонлардан фойдаланиш мумкинлиги кўрсатиб берилди. $n^+ - n - n^+$ структураларни олиш усули иқтисодиётнинг турли соҳаларида температура датчиклари учун қўлланилиши мумкин. Радиометрик тадқиқотларнинг таклиф қилинган методикаси патент билан ҳимояланган ва турли кремнийли асбобларда синаб кўрилган.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Нейтронлар билан трансмутацияланган монокристалл кремний асосида терморрадиацион датчиклар ишлаб чиқиш бўйича олинган натижалар асосида:

номинал солиштирма қаршилиги $(4 \div 8) \cdot 10^5$ Ом·см бўлган компенсацияланган кремний монокристалли олиш учун p - ва n -типли саноат намуналарига радиацион ва термик ишлов беришнинг энг мақбул режимлари терморрадиацион датчиклар тайёрлаш учун “Фотон” акциядорлик жамиятида қўлланилган («Uzeltexsanoat» уюшмасининг 2021 йилнинг 14 июлидаги №04-3/1307 - сонли маълумотномаси). Илмий натижаларининг қўлланилиши ҳориждаги аналогларига нисбатан керакли ва яхшиланган характеристикаларга эга терморезисторларни олиш имконини берган;

терморрадиацион датчик тайёрлаш учун юқори қаршиликли кремний олишнинг таклиф қилинган усули ва 273÷398 К температура оралиғида ишлайдиган, компенсацияланган кремний асосида термодатчик тайёрлашнинг ишлаб чиқилган технологияси Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлигида рўйхатдан ўтказилган (Ўзбекистон Республикаси патенти IAP №04796, 29.11.2013й.). Ишланманинг қўлланилиши ёнғиндан хабар бериш тизими учун терморезисторни тайёрлаш имконини берган;

ВВР-СМ атом реакторининг секин нейтронлар оқими зичлигини тезкор аниқлаш усули Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлигида рўйхатдан ўтказилган (Ўзбекистон Республикаси патенти IAP №05339, 11.01.2017 й.). Ишланманинг қўлланилиши ВВР-СМ реактордаги секин нейтронлар оқимини назорат қилиш диапазонини 10^{10} дан 10^{18} нейтрон/см² гача кенгайтириш имконини берган;

ишлатилган $n^+ - n - n^+$ структурали терморезисторларнинг параметрларини қайта тиклашнинг аниқланган имконияти “Фотон” акциядорлик жамиятида диффузион терморезисторлар ишлаб чиқаришда қўлланилган («Uzeltexsanoat» уюшмасининг 2021 йилнинг 14 июлидаги № 04-3/1307 - сонли маълумотномаси). Илмий натижаларининг қўлланилиши n -тип кремний асосида терморезисторларни тайёрлаш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишининг асосий натижалари халқаро ва республика миқёсидаги 11 та илмий ва амалий конференцияларда маъруза ва муҳокама қилинган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси доирасида жами 16 та илмий иш нашр этилган, жумладан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия қилинган илмий нашрларда 3 та мақола, шулардан 2 таси хорижий журналларда нашр этилган, 2 та ихтирога патент олинган.

Диссертация ишининг ҳажми ва тузилиши. Диссертация кириш қисми, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловадан иборат. Диссертация ҳажми 126 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

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

Диссертациянинг **“Легирланган монокристалл кремний олиш усуллари”** номли биринчи бобида монокристалл кремнийни легирлаш ва ишлов бериш усуллари адабиётларда келтирилган маълумотлари таҳлил қилинди. Адабиётлардаги маълумотлари таҳлил қилиш асосида тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари аниқланди.

Маълумки, технологик жараёнлар натижасида ёки радиациявий усул билан кремнийга киритилган чуқур энергетик сатҳлар (ЧЭС) ҳосил қилувчи киришмали нуқсонлар термодинамик беқарор бўлади. Шунинг учун бундай тизим парчаланиш йўли билан мувозанатга интилади. Киришмали ва радиацион нуқсонларнинг парчаланиши кремнийнинг электрофизикавий ва рекомбинацион хоссаларини ҳамда унинг асосидаги асбобларнинг параметрларини ўзгаришига олиб келади, чунки парчаланиш жараёнида нуқсонлар янги ҳолатларга – кремнийнинг таъқиқланган зонасида кўшимча энергетик сатҳлар ҳосил қилиши мумкин бўлган комплексларга айланади. Шунинг учун ҳарорат ўзгариши билан юз берадиган парчаланиш жараёнларини ўрганиш катта илмий ва амалий қизиқиш уйғотади.

“Легирлаш услублари ва намуналарнинг электрофизик характеристикаларини ўлчаш учун ўлчов қурилмалари” деб номланган иккинчи боби электр параметрлари термик жиҳатдан барқарор ва биржинсли кремний олиш технологияси, тажрибаларнинг услублари ва техникаси каби тадқиқот объектларига бағишланган. Датчиклар параметрларининг олдиндан белгиланган қийматларига эришиш учун намуналарга радиация билан ишлов

беришнинг оптимал режимлари ва оптимал характеристикалари танлаб олинди.

n-типли монокристалл кремнийдан тез нейтронлар билан нурлантириш усулида характеристикалари айнан бир хил қаршиликли терморезисторлар олиш имкониятлари тадқиқ қилинди ва аниқланди.

Кремний монокристаллининг тадқиқ қилинаётган намуналарига фосфор киришмаси киритиш орқали фосфор иштирок этган электр жиҳатдан пассив нуқсон комплекси олишнинг қўлланган усули асосланди.

“Кремнийни ядровий трансмутацияланиши базасида термодатчиклар олиш усулини ишлаб чиқиш” номли учинчи бобида термодатчиклар учун ядровий трансмутация йўли билан легирланган намуналар олиш технологиясини ишлаб чиқишнинг асосий натижалари, бу датчикларнинг асосий характеристикаларини назорат ва таҳлил қилиш усуллари келтирилган ва шу турдаги термодатчикларни бошқа ишлаб чиқарувчиларининг маълумотлари билан қиёсий таҳлил қилиш асосида мазкур ишда уларни ишлаб чиқаришнинг таклиф қилинаётган усулининг техник ва иқтисодий афзалликлари кўрсатиб берилган.

Тез нейтронлар интеграл оқимини аниқлаш учун секин нейтронлар (энергия $E \leq 0,1$ эВ) интенсивлигини аниқлаш усули, кейинги қадамда кадмий нисбатидан фойдаланиб қайта ҳисоблаш орқали қўлланди. Оқимни ҳисоблаш *p*-тип кремнийда кремний изотопларидан бири томонидан секин нейтронни қамраб олиш орқали донор киришма атоми фосфорни ҳосил қилиши асосида бажарилди. Бунда фосфорнинг ҳосил бўлган концентрациясини қуйидаги формула ёрдамида ҳисоблаш мумкин:

$$N_p = 1,7 \cdot 10^{-4} \Phi \quad (1)$$

бу ерда, $\Phi = \varphi \cdot t$, φ - секин нейтронлар оқими, t – нурлантириш вақти, с.

Кремнийни нурлантиришдан олдин ва кейин заряд ташувчилар концентрациясини ўлчаб секин нейтронлар оқимини аниқлаш мумкин. Заряд ташувчилар концентрациясини ўлчашдаги хатолик $\pm 8\%$ ни ташкил қилди. Радиацион нуқсонларни қиздириш ~ 1073 К температурада, кейин $3 \div 5$ град./минут тезликда совутиш билан амалга оширилди.

Иссиқлик сезувчанлиги ўлчанган 100 та намунанинг қийматларини статистик таҳлил қилиш, ҳароратга сезгирлик коэффициентлари (*B*) тенг бир хил терморезисторлар чиқиши 92% дан кам бўлмаслигини кўрсатди.

Радиацион нуқсонлари бўлган компенсацияланган кремний асосидаги, номинал қаршилик диапазони $(2 \div 4) \cdot 10^5$ Ом бўлган, манфий (қаршиликларни температуравий коэффициенти) (КТК) ли тайёрланган терморезистор қуйидаги характеристикаларга эга: доимий $B = (6000 \pm 50)$ К; $\alpha_{306 \text{ К}} = -(6,9 \div 7,0) \% / \text{град}$ – 306 К да термистор қаршилигининг температура коэффициенти; Температура ўлчаш интервали 303 дан 373 К гача.

Тез нейтронларнинг $2,2 \cdot 10^{14}$ см⁻² флюенси билан нурлантирилгандан кейинги электр қаршилиги *R* ўзгаришининг температурага боғлиқлиги ихтиёрий танлаб олинган 5 та намуна учун 1-жадвалда келтирилган.

Намуналарнинг электр қаршилигининг температурага боғлиқ ўзгариши

Намуналарнинг температурасини ўзгариши Т, К	Намуналарнинг электр қаршилиги ўзгариши R (Т)				
	Намуна №1	Намуна №2	Намуна №3	Намуна №4	Намуна №5
	R, Ом	R, Ом	R, Ом	R, Ом	R, Ом
303	$1,48 \cdot 10^5$	$1,76 \cdot 10^5$	$2,18 \cdot 10^5$	$2,09 \cdot 10^5$	$1,93 \cdot 10^5$
308	$9,58 \cdot 10^4$	$9,63 \cdot 10^4$	$9,75 \cdot 10^4$	$9,68 \cdot 10^4$	$9,65 \cdot 10^4$
313	$7,19 \cdot 10^4$	$7,42 \cdot 10^4$	$7,57 \cdot 10^4$	$7,49 \cdot 10^4$	$7,485 \cdot 10^4$
318	$4,85 \cdot 10^4$	$5,09 \cdot 10^4$	$5,15 \cdot 10^4$	$5,12 \cdot 10^4$	$5,1 \cdot 10^4$
323	$3,58 \cdot 10^4$	$3,65 \cdot 10^4$	$3,76 \cdot 10^4$	$3,67 \cdot 10^4$	$3,66 \cdot 10^4$
328	$2,61 \cdot 10^4$	$2,72 \cdot 10^4$	$2,80 \cdot 10^4$	$2,79 \cdot 10^4$	$2,75 \cdot 10^4$
333	$1,93 \cdot 10^4$	$2,03 \cdot 10^4$	$2,12 \cdot 10^4$	$2,10 \cdot 10^4$	$2,07 \cdot 10^4$
338	$1,48 \cdot 10^4$	$1,52 \cdot 10^4$	$1,65 \cdot 10^4$	$1,63 \cdot 10^4$	$1,59 \cdot 10^4$
343	$1,09 \cdot 10^4$	$1,15 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^4$	$1,18 \cdot 10^4$	$1,15 \cdot 10^4$
348	$8,26 \cdot 10^3$	$9,33 \cdot 10^3$	$9,45 \cdot 10^3$	$9,42 \cdot 10^3$	$9,40 \cdot 10^3$
353	$6,47 \cdot 10^3$	$6,71 \cdot 10^3$	$6,82 \cdot 10^3$	$6,81 \cdot 10^3$	$6,74 \cdot 10^3$
358	$5,18 \cdot 10^3$	$5,35 \cdot 10^3$	$5,46 \cdot 10^3$	$5,40 \cdot 10^3$	$5,40 \cdot 10^3$
363	$3,72 \cdot 10^3$	$3,95 \cdot 10^3$	$4,12 \cdot 10^3$	$4,05 \cdot 10^3$	$4,07 \cdot 10^3$
368	$2,97 \cdot 10^3$	$3,084 \cdot 10^3$	$3,18 \cdot 10^3$	$3,156 \cdot 10^3$	$3,14 \cdot 10^3$
373	$2,16 \cdot 10^3$	$2,29 \cdot 10^3$	$2,36 \cdot 10^3$	$2,31 \cdot 10^3$	$2,32 \cdot 10^3$

2-жадвалдан кўришиб турибдики, терморезисторларни ишлаб чиқариш бўйича тавсия этилган усулда *B* бошқа терморезисторлардан ~1,5 баробар юқори.

Бошқа маълум терморезисторларнинг иссиқлик сезувчанлигини бизнинг намуналар билан солиштирилиши.

Терморезисторни турлари	300 К даги номинал қаршилик	Доимий «В», К
Бизнинг термодатчик	10^6 Ом	6000 (273...403 К)
ТР-2	33 к Ом·см ±20 %	3470 ...3900 (273...423 К)
ТР-14	(2,6 ÷ 2,9) кОм	4000...4300 (273...423 К)
СТ104D	10^5 Ом	4040 (233...373 К)

Кремнийли терморезисторларни ишлаб чиқариш учун таклиф этилган усул қуйидаги афзалликларга эга: ишлаб чиқаришнинг ўта қулайлиги (компенсирланган материалнинг нархини пасайтириш) ва ҳар бир

терморезисторларни алоҳида ўлчашни талаб қилмаслиги. Тизим қуйидагича тузилган:

Ёнғин датчиклари тутун пайдо бўлганда ишга тушади. Яримўтказгичли кремний материалдан тайёрланган датчиклар ҳарорат ўзгаришига жуда сезгир бўлиб, ёнғин чиқмасдан олдинроқ ишга тушади ва ёнғиннинг олди олинади. Ҳозирги вақтда радиациявий ишлов бериш ёрдамида бир хил хусусиятларга ва параметрларга эга бўлган материал олишнинг янги усуллари таклиф этилмоқда.

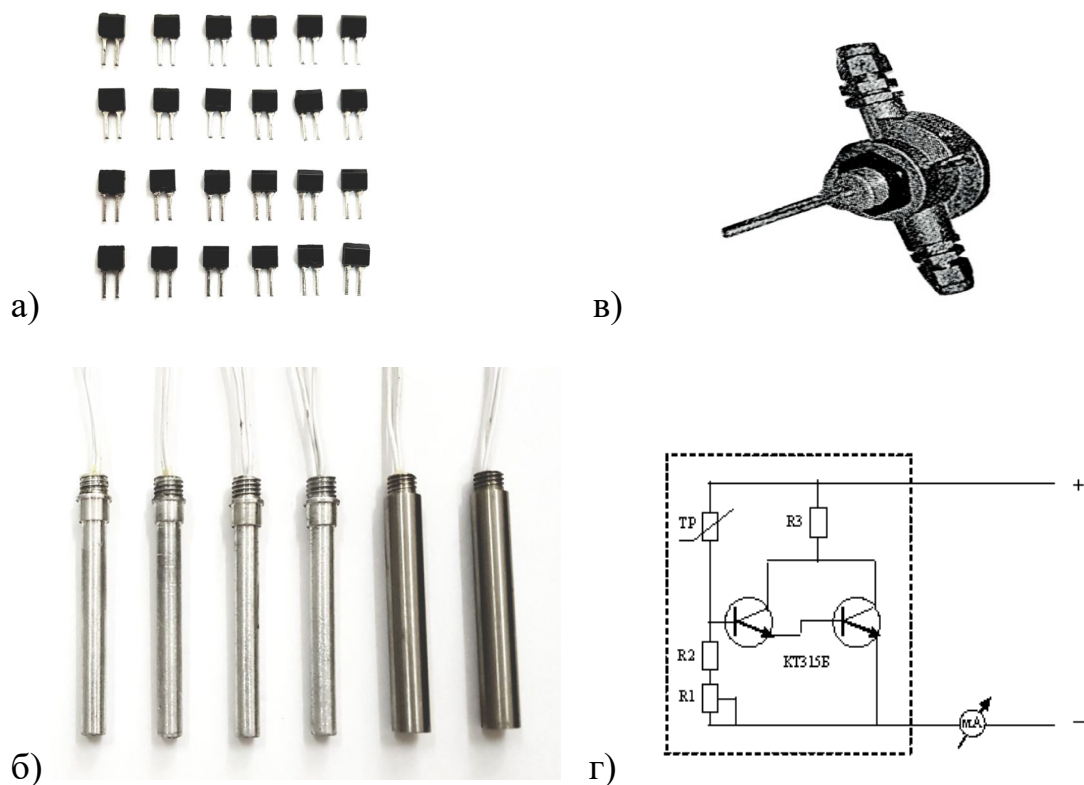
Ёнғиндан хабар берувчи датчикларнинг олдинги авлодларини кўриб чиққанимизда, биз яратган датчикнинг бир қатор афзалликларга эга эканлигига амин бўлдик. Бошқа шу каби датчиклар билан таққослаганда, биз таклиф қилаётган датчик ҳарорат ўзгаришига нисбатан икки баробар сезгир, ҳарорат датчигининг огоҳлатириш оралиғи 8 секунддан кам, назорат остидаги муҳитнинг максимал ҳарорати юқори 398 К, электр таъминоти кучланиши қиймати (9-220) В ва ҳаражатлар нархи икки-уч баробар кам.

Датчикнинг тўлиқ ёки алоҳида қисмларини қайта ишлатиш мумкин бўлади. Бундан ташқари, USB порти орқали 100 метргача симсиз сигнал узатиш орқали ишлатиш мумкин. Шундай қилиб, биз таклиф қилаётган датчикларимиз қуйидаги, фойдали устунликларга эга ҳароратга сезгирлиги юқори ва арзон нархлардаги, янги дизайни, ўрнатиш учун қулай ва такрорий фойдаланиш имконини беради.

1-расмда кўрсатилган ҳарорат сигнализацияси датчиги, бошқариладиган муҳитнинг руҳсат этилган даражадан юқори ҳарорат даражасини бошқариш учун ҳарорат датчиги сифатида ишлатиш учун мўлжалланган. Терморезисторнинг ҳароратга сезгирлиги ($B=6000$ К) юқори бўлганлиги туфайли уни кимё, нефт, газ ва бошқа соҳаларда ишлатиш яхши самара беради. Масалан, USB орқали кампьютерга бир нечта датчикларни улаб, пахта станцияларидаги бункерлардаги ҳароратни бошқариш ва назорат қилиш имконини беради.

Бундан ташқари, датчикнинг устки қоплами алюминий ёки зангламас пўлат материаллар билан қопланган. Натижада датчик ташқи таъсирларга чидамли бўлиб кимёвий ва радиациявий омборларда фойдаланиш учун қулай.

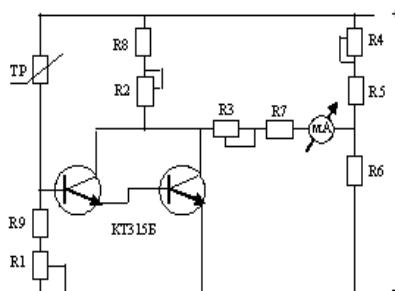
Датчикни маълум ҳароратга созлаш усули: агар объектнинг ҳарорати белгиланган даражадан ошмаса, терморезистор юқори қаршиликка эга ($R_{TP}=2 \cdot 10^6$ Ом) бўлганлиги учун ток ўтмайди. Транзистор коллекторида кучланиш катта, коллектор токи эса кичик. КТ315 Б транзистор базасидаги кучланиш паст, яъни транзистор ёпиқ. R_2 ва R_3 қаршиликлар хона ҳароратида коллекторда ($8 \div 10$) mA ток оқими ўтишини таъминлайди. Ҳарорат ортиши билан терморезисторнинг қаршилиги камаяди. Резистор R_2 транзисторнинг коллектор оқимини (масалан 333 К да) $I_k \approx 13$ mA га етказди. Коллектор токи контактлари сигнализация қурилмасига уланган реленинг ишлаб кетиши учун етарли.



1-расм. Ҳарорат сигнализацияси датчиги: а) терморезисторларни кўриниши; б) Алюминий қотишмасидан тайёрланган қутидаги терморезисторнинг жойлашуви; в) ёнғинга қарши датчикнинг кўриниши; г) ҳарорат сигнализация датчиги учун схема, электрон калит ёрдамида ТР ни улаш схемаси ($R_{TR} = 2 \cdot 10^6 \text{ Ом}$, $R_1 = 100 \text{ кОм}$, $R_2 = 20 \text{ кОм}$, $R_3 = 100 \text{ Ом}$).

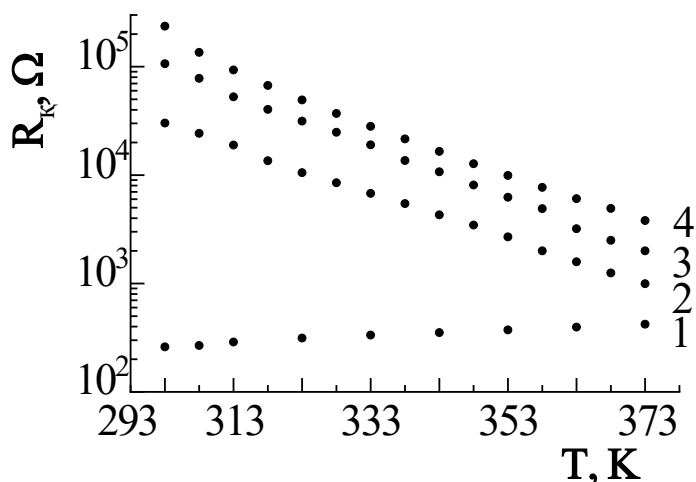
Датчикларни ишлаб чиқариш учун юқоридаги усулини қўллаб ва схема техник ёндашув асосида электрон термометр (ЭТ) нинг лаборатория намунаси ишлаб чиқилган бўлиб, 2-расмда унинг электрон схемаси берилган. ЭТ нинг электр схемаси доимий ток учун кўприк схемага асосланади, унинг бир елкасида терморезистор (ТР) электрон калит орқали уланади, микроамперметр шкаласи ($0 \dots 50 \text{ мкА}$) индикатор вазифасини бажаради. Электрон термометрнинг ишлаш принципи терморезистор қаршилигининг ўзгариши натижасида электр кўприкда дисбаланс ҳосил бўлишига асосланган. R_1 , R_2 резисторларни минимал ҳолатга қўйилади. Хона ҳароратида ТР энг катта қаршиликка эга ($R_{TR} = 2 \cdot 10^6 \text{ Ом}$), яъни транзистордан ток ўтмайди. Транзистор (КТ315 Б) нинг коллекторида кучланиш катта, ток кучи кам. Кўприк мувозанатга келганда ўлчаш диагоналида кучланиш нолга тенг. 307 К ҳароратда ТР қаршилиги камаяди, R_1 резистор ёрдамида асбоб шкаласи шу қийматга келтирилади. Кейин ТР ҳарорати R_4 резистор ёрдамида 315 К гача кўтарилади ва асбоб шкаласи шу қийматга келтирилади. Назорат қилиш учун ҳароратни симобли лаборатория термометрида ўлчанади. ЭТ ни қўллаб қисқа вақтда 307-315 К ораликда ҳароратни ўлчаш мумкин. Уни ясашда компенсирланган кремний (303 К даги қаршилиги $R_{TR} = 2 \cdot 10^5 \text{ Ом}$)

асосида ишлаб чиқилган ТР қўлланган. Резисторлар: $R_1 = 100 \text{ кОм}$, $R_2 = 500 \text{ Ом}$, $R_3 = 500 \text{ Ом}$, $R_4 = 100 \text{ Ом}$, $R_5 = 150 \text{ кОм}$, $R_6 = 21 \text{ кОм}$, $R_7 = 100 \text{ Ом}$, $R_8 = 100 \text{ Ом}$, $R_9 = 10 \text{ кОм}$. Тайёрланган электрон термометрнинг лаборатория макети сезгирлиги юқори, ҳароратни назорат қилиши тез ҳамда чет мамлакатлардан олиб келинадиган термометрлардан арзон. Ушбу электрон термометрларни компьютер ёки телефонга USB орқали уланиши билан компьютер дастури ёрдамида узоқ масофадан туриб беморлар ҳароратини назорат қилиш мумкин.



2-расм. Электрон термометр ишлаш схемаси

Электрофизик параметрлар фотоўказувчанлик сўниши усули билан ўлчанди ва юқори ҳароратда термик ишлов беришда нейтронлар ёрдамида легирланган кремний бор концентрациясига боғлиқлиги ўрганилди. Радиацион нуқсонлар (РН) $\sim 1273 \text{ К}$ ҳароратда ~ 30 минут давомида қиздирилди ва $(5 \div 10)$ град./минут тезликда секин совутилди. Заряд ташувчилар ҳаракатининг номинал қийматини билиш учун $\sim 1273 \text{ К}$ ҳароратда изотермик қиздириш амалга оширилди.

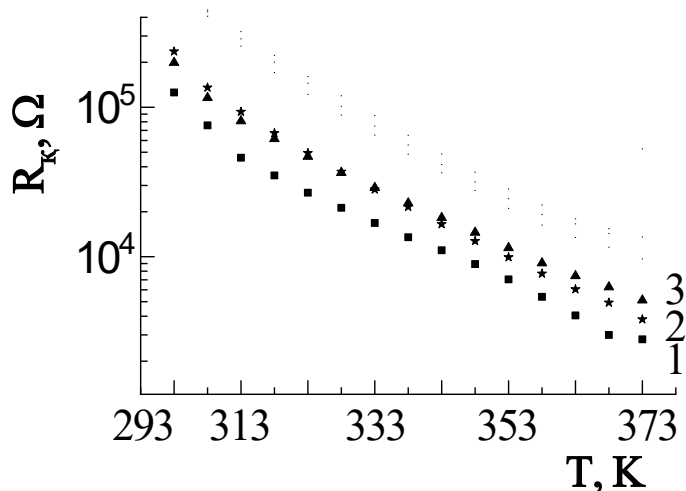


3-расм. $n^+ - n - n^+$ тузилма электрқаршилигининг нурлантиришгача (1) ва тез нейтронлар флюенслари (см^{-2}): 2 - $5 \cdot 10^{13}$; 3 - $8 \cdot 10^{13}$; 4 - $2 \cdot 10^{14}$ билан нурлантиришдан кейин температурага боғлиқ тарзда ўзгариши

Тайёрланган намуналар ($n^+ - n - n^+$ - тузилмалари) атом реакторида тез нейтронлар ($\phi = (3 \div 4) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) оқимида асосий заряд ташувчилар

акцептор характерли радиацион нуқсонлар билан тўлиқ компенсациялан-гунича нурлантирилди. Олинган натижалар 3- ва 4-расмларда келтирилган.

3-расмдан кўринадикки, R_k (қоронгуликдаги қаршилик) амалда $t=120$ секунд нурлантириш вақтидан кейин энг катта қийматига эришади. Шуни қайд этиш керакки, тез нейтронларнинг $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ флюенсида солиштирма қаршилиги (100÷170) Ом·см бўлган резисторларнинг R_k лари таққослаб кўрилди (4-расм).



4-расм. Турли дастлабки солиштирма қаршиликли кремний намуналари учун нурлантирилган $n^+ - n - n^+$ - тузилманинг электр-қаршилигини температурага боғлиқлиги, ρ_0 (Ом·см): 1–70; 2–100; 3–170

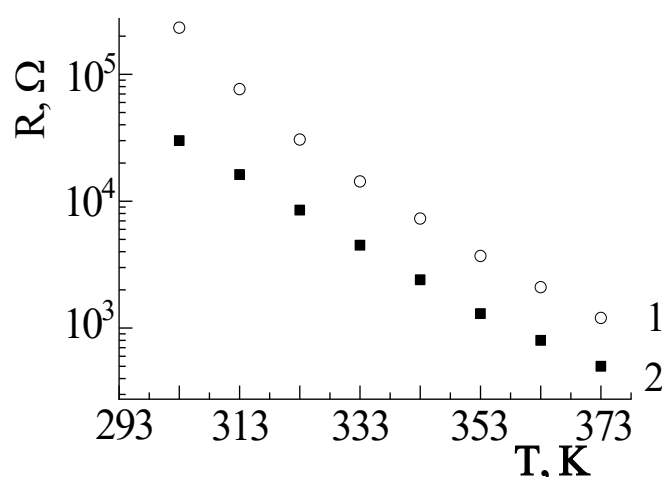
Бу намуналарда Ферми сатҳи $E_c - 0,50$ эВ қуйроқ жойлашган ва тез нейтронлар флюенси ортиши билан Ферми сатҳининг таъқиқланган зона ўртасига силжиши туфайли ҳосил бўладиган $E_c - 0,18$ эВ ва $E_c - 0,39$ эВ сатҳлар тўлиқ ионлашиб кетади. Фосфор+вакансия (E-марказ) нуқсонга боғлиқ $E_c - 0,40$ эВ сатҳ кичик концентрацияга эга ($< 10^{12} \text{ см}^{-3}$), у ҳам нурлантиришдан кейин ионлашиб кетади, яъни амалда кремнийнинг электрофизикавий хоссаларига таъсир кўрсатмайди. Шунинг учун, дастлабки фосфор донор киришмасининг компенсацияланишида асосан дивакансиянинг $E_c - 0,54$ эВ акцептор сатҳигина қатнашади деб фараз қилиш мумкин.

Нурлантирилган намунанинг фотоэлектрик параметрларини барқарорлаштириш учун 20 минут давомда 493 К ҳароратда қиздирилади. R_k/R_ε нинг (R_ε – ёритилгандаги қаршилик) қиздириш температураси бўйича ўлчаш натижалари 3-жадвалда келтирилган. Жадвалдан кўринадикки, иссиқлик билан ишлов берилгандан кейин электрқаршиликнинг ўзгариш қарралиги ортади ва амалда бир тартибга (~ 10 марта) ортади.

Намуналарни бошланғич солиштирма қаршилиги $\rho_0 = 170 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ тез нейтронлар $\sim 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ флюенси билан нурлантирилгандан кейин ~ 20 минут 493 К ҳароратда қиздирилганда R_k/R_{ϵ} нинг ўзгариши

Ҳолати	R_k/R_{ϵ} олинган натижалар нисбати			
Термик ишловдан олдин	1,14	1,1	1,1	1,2
Термик ишловдан кейин	11,2	9,7	11,1	12

Танлаб олинган (бошланғич солиштирма қаршилиги $\rho_0 = 170 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ бўлган компенсацияланган кремнийдан тайёрланган) $n^+ - n - n^+$ -тузилма намуналарини нурлантирилган (тез нейтронлар флюенси $\sim 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$) дан кейин электрқаршилигининг температурага боғлиқлиги 200 лк ёритилганликда ўлчанди (5-расм).



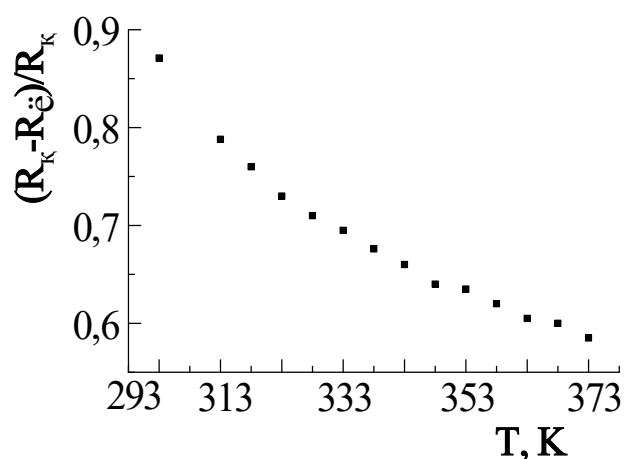
5-расм. Фоторезисторлар қаршилигининг температурага боғлиқлиги: 1– қоронғида; 2– ёритилганда ($E = 200 \text{ лк}$)

Ҳосил бўлган боғланиш қуйидагича ифодаланади:

$$(R_k - R_{\epsilon}) / R_k = \exp(-670 / T) \quad (2)$$

Радиациявий компенсацияланган кремнийни ўрганиш натижасида $303 \div 373 \text{ К}$ ҳарорат оралиғида ишлайдиган бир хил хусусиятларга эга фото- ва термодатчиклар яратиш имконияти борлиги аниқланди.

Радиациявий нуқсонлар бор, компенсацияланган кремний асосида яратилган, $\sim 373 \text{ К}$ ҳароратгача ишлайдиган фоторезисторлар фото- ва термодатчиклар сифатида қўлланилиши мумкин (6-расм).



6-расм. Фоторезисторнинг электр қаршилигидаги нисбий ўзгариши ($n^+ - n - n^+ -$ тузилмалари) $E = 200$ лк ёритилганликдаги ҳароратга боғлиқлиги

“Ядровий трансмутацияланган кремний асосида нейтрон оқимини ўлчаш учун детектор олиш усулини ишлаб чиқиш” деб номланган тўртинчи бобида нейтронлар оқимини ўлчаш учун детекторни ишлаб чиқишнинг физик ва технологик босқичлари тавсифланади.

Кремний монокристалини нейтронлар билан нурлантириб тайёрланган (НЛД) яримўтказгичли детекторни яратишда технологик босқич қуйидаги кетма-кетликда амалга оширилади:

1. Дастлаб пластиналар керакли диаметрдаги НЛК $\rho = 1 - 5$ кОм·см, қалинлиги $d = 10 - 30$ мм бўлган p -типли кремний монокристалларини кесиш орқали олинади;

2. Кесиш жараёнида механик шикастланган қатламни олиб ташлаш учун силиқлаш дастгоҳида М-14 – М5 микро куқунлар ёрдамида ҳар икки томонидан бир хил 50 мкм қалинликда олиб ташланади;

3. Намуналар дистилланган сувда ва ишқорсиз совун билан ювилади;

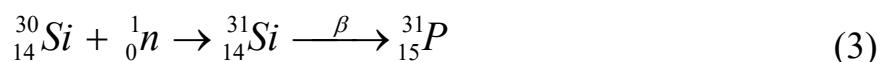
4. Намуналар юзасини тозалаш:

а) Пероксид-аммиак эритмасида 15 дақиқа давомида қайнатилади. Ушбу кучсиз гидроксиди муҳитда қайта ишлашда қутбли бўлмаган органик бирикмалар, масалан, минерал мойлар, парафинлар ва бошқалар самарали равишда тозаланади. Бундай моддалар молекулаларининг дипол моменти кичик, шунинг учун улар юқори сирт сиғим энергиясига эга ва сиртнинг термодинамик беқарорлигини келтириб чиқаради;

б) Концентранган нитрат кислотада 7 дақиқа давомида қайнатилади ва дистилланган сувда ювилади. Ушбу ишлов бериш билан ионли кимёвий ифлослантирувчи моддалар (Na^+ , K^+ , Ca^+ , Mg^+ , Fe^{2+} , ва бошқалар) уларни сувда эрувчан тузларга айлантириш орқали сиртдан тозаланади, кейин дистилланган ионсизлаштирилган сувда ювилади.

Бундай ҳолда, сирт 15 дақиқа давомида пероксид-аммиак эритмасида қайта-қайта самарали ишлов берилади ва гидрофоб оксиди плёнқалари ювиб тозаланади;

5. Тайёрланган намуналар кварц ампулага жойлаштирилади ва кавшарлаб беркитилади. Шундан кейин, ампулаларга жойланган намуналар атом реактори каналида нейтронлар билан нурлантирилади. Натижада заряд ташувчиларнинг аксарияти ядро реакцияси натижасида ҳосил бўлган фосфор атомлари томонидан нейтралланади, бу қуйидаги реакция билан ҳисобланади:



6. Радиацион нуқсонларни қиздириш учун, нурлантирилган намуналар боксга жойланади ва 1073-1173 К да 3 соат печнинг ичида ишлов берилади. Намуналар печ ўчирилгандан кейин печ билан бирга совитилади.

Нейтронлар билан нурлантирилган намуналардан олинган натижаларга мувофиқ, керакли геометрик намуналар (бу ҳолда шайба кўринишида) тайёрланади. Бундан ташқари, кремнийни нейтронлар билан компенсациялаш амалга оширилгандан сўнг, барча намуналарга кимёвий-технологик ишлов берилади.

Яримўтказгичли детекторларнинг ишлаш усули нейтронлар таъсирида яримўтказгичларнинг электрофизик хусусиятларининг ўзгаришига асосланган. Секин нейтронларни кремний изотопларидан бири ютиши натижасида ҳосил бўлган фосфорнинг донорлик хоссаси асосида яратилган яримўтказгичли детектор билан секин нейтронларнинг оқим зичлигини ўлчашнинг усули маълум.

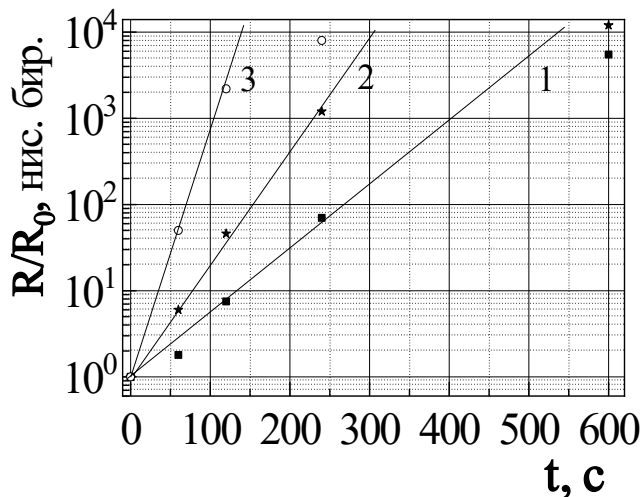
Ушбу усулнинг камчилиги, биринчидан, нейтронларнинг умумий оқим зичлигини аниқлашни имкони йўқ: иккинчидан, ўлчанган нейтрон оқимига қараб тез нейтрон оқимини аниқлаш учун кремний қаршилигининг бошланғич қиймати танланади. Шунинг учун атом реакторидаги нейтрон нурланиш таъсирида *n*-типли яримўтказгичли кремний резисторининг электр қаршилиги ўзгаришига асосланиб, секин нейтронларнинг оқим зичлиги тез аниқланади.

Ушбу муаммонинг ечими қуйидагиларни талаб қилади: секин нейтронлар детекторининг минимал нурланиш вақтини белгилаш учун *n*-типли кремнийнинг қаршилигини танлаш, детектор нурлангандан сўнг электр қаршилигининг юқори ва пастки чегараларини аниқлаш, яъни, *n*-типли кремнийнинг компенсация даражаси.

Бунга дастлабки электр қаршилиги (ρ_0) 1 ва 5 Ом·см бўлган *n*-типли кремнийдан тайёрланган яримўтказгичли кремний резисторининг (детектор) электр қаршилигини нурлантиришдан олдин (R_0) ва нурлангандан кейин (R) ўлчаш орқали эришилади. Нурланиш вақти шундай танлаб олинадики, R/R_0 нисбий электр қаршилиги қийматининг ўсиши 10 дан 1000 оралиғида бўлсин.

Бундай резисторни (детектор) яратиш учун n^+n-n^+ -тузилмадаги яримўтказгичли кремний қаршилик, яъни электрқаршилиги (ρ_0) 1 ва 5 Ом·см бўлган *n*-типли кремнийдан ясалган детектор ишлатилади. Дастлабки солиштирма қаршилиги 1 ва 5 Ом·см кремнийни ва нурлантириш вақтини танлаш қуйидаги иккита сабаб билан изоҳланади.

Агар n -типли кремнийнинг солиштирма қаршилиги $\rho > 5$ Ом·см бўлса, нурлантириш давомийлигининг юқори чегараси детектор электрқаршилиги ўзгаришининг нисбати $(R/R_0) \leq 1000$ (7-расм) бўладиган қилиб танланади. Бунда асосий заряд ташувчилар ҳаракатчанлигининг қиймати амалда ўзгаришсиз қолади $[R/R_0 = (\mu_0 n_0) / (\mu n)]$, бу ерда мос равишда μ_0 -, n_0 -, μ -, n -, асосий заряд ташувчиларнинг нурлантиришгача ва нурлантиришдан кейинги ҳаракатчанликлари ва концентрацияси].



7-расм. n -тип кремнийни солиштирма қаршилигининг (Ом·см) турли: 1- 1,1; 2- 2,1; 3- 4,97 қийматларида электрқаршилиги нисбий ўзгаришининг нейтронлар билан нурлантириш давомийлигига боғлиқлиги

Агар n -типли кремнийнинг солиштирма қаршилиги $\rho = 1$ Ом·см бўлса, нурлантириш давомийлигининг қуйи чегараси детектор электрқаршилиги ўзгаришининг нисбати $(R/R_0) \geq 10$ бўладиган қилиб танланади. Бу ерда R/R_0 катталиқ қиймати ўлчаш хатоликларидан сезиларли даражада катта бўлади. (R/R_0 — ўлчашларнинг умумий хатолиги $\pm 3\%$).

Детекторда ҳосил бўладиган $E_c = 0,18$ эВ радиацион нуқсонлар (А-марказга) хона ҳароратида тўлиқ ионланган ва қаршилиқнинг ўзгаришига амалда таъсир қилмайди. Бошқа ҳосил бўладиган радиацион марказлар эса электронлар билан тўлган ва концентрациялари паст. Айнан шу ҳолатлар n -типли кремнийнинг дастлабки солиштирма қаршилиқларининг $10 \div 1000$ интервалда нейтронлар билан нурлантирилгандан кейин электр қаршилиги нисбий ўзгаришининг юқори ва қуйи чегараларининг танловининг белгилайди.

Секин нейтронлар зичлигини ўлчаш қуйидагича бажарилади: нурлантирилганда кремнийли яримўтказгич резистор — детекторнинг электр қаршилиги нейтронлар флюенси f га экспоненциал боғлиқ бўлади:

$$R = R_0 \exp(kF) \quad (4)$$

бунда, R_0 -, R - мос равишда нурлантиришгача ва нурлантирилгандан кейинги электр қаршилиқ; $F = \varphi t$ - нейтронлар флюенси; φ - нейтронлар оқими

зичлиги; t – нурлантириш давомийлиги; k – ўтказувчанлик бўйича радиацион зарарланиш коэффициенти бўлиб, материалнинг дастлабки ўтказувчанлигига ва нурланиш турига боғлиқ, ($\sigma_0 = 1/\rho_0$, бунда ρ_0 – дастлабки солиштирма қаршилиқ):

$$k = \frac{\Delta\sigma}{F} \cdot \rho_0 \quad (5)$$

бунда, $\frac{\Delta\sigma}{F}$ - материал нурлантирилганда электр ўтказувчанликнинг дастлабки (10 %) камайиши

$$\frac{\Delta\sigma}{F} = \alpha \cdot (\rho_0)^{-b} \quad (6)$$

бунда, α ва b – мос равишда, пропорционаллик коэффициенти ва даража кўрсаткичи

$\frac{\Delta\sigma}{F}$ катталиқ $R/R_0 \sim f(F)$ дозавий боғланишларнинг бошланғич қисмларини қиялик даражасидан аниқланади (7-расм). Натижада (4) ифода, (5) ва (6) ни ҳисобга олган ҳолда қуйидагича ёзилади

$$\frac{R}{R_0} = \exp(\alpha \cdot \rho_0^{1-b} \cdot \varphi \cdot t) \quad (7)$$

(7) ифодадан секин нейтронлар оқими зичлиги топилади

$$\varphi = \frac{\ln \frac{R}{R_0}}{\alpha \cdot \rho_0^{1-b} \cdot t} \quad (8)$$

Шундай қилиб, атом реакторидаги секин нейтронлар интенсивлигини ўлчашнинг экспресс усули ишлаб чиқилган, бошланғич солиштирма қаршилиги $\rho_0 = (1 \div 5)$ Ом·см бўлган (5x5x0,4 мм) кичик ҳажмдаги детектор материалининг нурлантириш вақти 1÷2 дақиқа ташкил этади.

ХУЛОСА

“Нейтронлар билан нурлантириш орқали легирланган кремний монокристалли асосида терморацион датчиклар ишлаб чиқиш” мавзусидаги фалсафа доктори (PhD) диссертация ишининг натижалари асосида қуйидаги хулосалар келтирилади:

1. Нейтронлар билан нурлантиришдан олдин ва кейин намуналарнинг солиштирма қаршилигининг ҳароратга боғлиқлигини аниқлаш учун экспериментал усул таклиф этилди.

2. 303÷373 К температура оралиғида ишловчи иссиқликка сезгир ($B=6000$ К) материал (хона ҳароратида $\sim 10^5$ Ом ўзгармас қаршилиқка эга)

тайёрлашда бошланғич солиштирма қаршилиги $100 \div 170$ Ом·см бўлган кремний намуналарини нурлантириш учун минимал нейтрон оқими $\Phi = 2 \cdot 10^{14}$ см⁻² (нейтрон энергияси $\sim 0,1$ МэВ) белгиланди, бунда намунанинг қолдиқ радиоактивлиги минимал даражада кам бўлади.

3. *n*-типли кремнийни $(2,2 \div 2,7) \cdot 10^{14}$ см⁻² нейтронлар билан нурлантириб тайёрланган резисторлар параметрларининг термобарқарорлиги ~ 373 К дан юқори бўлмаган ҳароратларда сақланади.

4. Бошланғич (10^3) Ом·см солиштирма қаршиликли *p*-типли саноат кремнийни атом реакторининг нейтронлар оқими ёрдамида радиацион ишлов бериб унинг базасида *n*-типли $\rho \sim 10^5$ Ом·см компенсирланган кремний олишнинг технологияси ишлаб чиқилди ва унинг асосида $273 \div 398$ К интервалда ишловчи терморезисторлар тайёрлаш мумкинлиги кўрсатиб берилди.

5. Атом реакторининг тез нейтронлари билан нурлантириш орқали бошланғич солиштирма қаршилиги $100 \div 170$ Ом·см бўлган *n*-типли кремнийдан фото- ва терморезисторлар тайёрлаш мумкинлиги кўрсатилди. Ёруғликка сезгир тузилмалар олиш учун кремнийга радиацион-термик ишлов беришнинг оптимал шароитлари аниқлаб олинди. 200 лк ёритилганликда қаршилик ~ 10 баробар ўзгариши аниқланди.

6. Атом реакторининг нейтронлари билан нурлантириб радиацион нуқсонлар билан компенсацияланган *n*-типли кремний олиш технологияси ишлаб чиқилди ва $303 \div 373$ К оралиғида ишлайдиган терморезисторлар тайёрланди. Терморезисторлар ишлаб чиқаришга тадбиқ қилиниб, ёнғин чиқишидан огоҳлантирувчи датчиклар “Элекор” фирмаси билан ҳамкорликда амалда қўллаш учун терморезисторлар етказиб берилди.

7. Ишлаб чиқилган технология асосида нейтрон-трансмутация усули билан легирланган монокристалл кремнийдан термо- ва фотодатчиклар ишлаб чиқарилади, бу саноат корхоналарида ёнғинга хавфли вазиятларни олдини олиш учун ишлатилади.

8. Ҳароратга сезгир *n⁺-n-n⁺*-тузилмали намуналар асосида инсон тана ҳароратини масофадан туриб ўлчаш имконини берувчи электрон термометрларнинг лаборатория намуналари ишлаб чиқилди.

9. Умумий нейтронлар оқимининг зичлигини ўлчаш учун *n*-типли кремний асосида ишлаб чиқилган детектор кремнийнинг бошланғич қаршилигини мос равишда танлаш орқали 10^{10} дан 10^{18} нейтрон/см² гача бўлган кенг ораликда нейтрон оқимининг ўлчаш имконини беради.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.02/30.12.2019.FM/Т.33.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

СУЛАЙМОНОВ АБДУРАХМОН АБДУРАШИДОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ТЕРМОРАДИАЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ
НЕЙТРОННО ЛЕГИРОВАННОГО МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО
КРЕМНИЯ**

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам

Ташкент – 2021

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером B2021.3.PhD/T2342.

Диссертация выполнена в Институте ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан.

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

Научный руководитель:

Ташметов Маннаб Юсупович

доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты:

Ёдгорова Дилбара Мустафаевна

доктор технических наук, профессор

Курбанов Бахтияр Ибрагимович

доктор технических наук, старший научный
сотрудник

Ведущая организация:

**Национальный университет Узбекистана имени
М.Улугбека**

Защита диссертации состоится «___» _____ 2021 года в _____ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики (Адрес: 100174, г. Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ АН РУз. Тел.: (+99871) 289–31-41; факс: (+99871) 289–36–65; e-mail: info@inp.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ядерной физики (регистрационный номер _____) (Адрес: 100214, г. Ташкент, поселок Улугбек, ИЯФ АН РУз. Тел. (+99871) 289–31–19).

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2021 г.

(Протокол рассылки № _____ от «___» _____ 2021 г.).

И.И. Садиков

зам. председателя Научного совета по присуждению
ученых степеней, д.т.н., старший научный сотрудник

О.Р. Тожибоев

ученый секретарь Научного совета по присуждению
ученых степеней, PhD ф.-м.н.

И. Нуритдинов

председатель научного семинара
при Научном совете по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время во всем мире полупроводниковые материалы являются одним из самых широко используемых элементов твердотельной электроники. Они нашли свое применение в качестве фото- и термодатчиков в различных областях науки и промышленности. Основным требованием к базовым материалам, в частности, применяемым в изготовлении терморезисторов, как известно, является высокая чувствительность электрического сопротивления материала к воздействию температуры. По физическим свойствам в зависимости от базового материала терморезисторы разделяются на две группы с положительным и отрицательным температурным коэффициентом сопротивления. Диапазон температурной чувствительности терморезисторов определяется электрофизическими параметрами и характеристиками материала. Изменяя параметры и характеристики базового материала можно регулировать температурную зависимость сопротивления терморезистора в широких пределах.

В последние годы в мире интенсивно разрабатываются и производятся разные виды терморезисторов в разных конструктивных исполнениях на базе полупроводников, оксидных диэлектрических материалов и различных сплавов. Для изготовления терморезисторов широко используются полупроводниковые материалы и соединения, позволяющие создавать различные датчики температур, одним из которых является монокристаллический кремний с высоким удельным сопротивлением. Получение такого материала в промышленных условиях требует достаточно весомых затрат, обусловленных очисткой материала и сложностью получения радиально однородного кремния по удельному сопротивлению. На практике для реализации этих задач широко применяется метод легирования кремния различными компенсирующими примесями, как в процессе выращивания, так и методом высокотемпературной диффузии или ионной имплантации. Недостатком перечисленных методов является то, что они не позволяют получить терморезисторы с одинаковым удельным сопротивлением путем легирования образцов по объему.

В настоящее время развиваются новые способы получения материала с заданными свойствами и параметрами, основанные на формировании в матрице базового материала терморезисторов компенсирующих дефектных состояний с использованием радиационной технологии. В связи с этим, исследования и разработка новых способов повышения однородности параметров и характеристик базовых материалов, применительно к датчикам температур и расширение диапазона температурной чувствительности датчиков, запоминающие температуры воздействия, являются одной из актуальных проблем современной твердотельной электроники и смежных отраслей науки и техники. В нашей Республике уделяется большое внимание практическому применению достижений ядерно-физических исследований в инновационном приборостроении и специальной измерительной технике. В

этом отношении, проблемы, рассматриваемые в данной диссертационной работе, несомненно, представляют большой практический интерес.

Исследования, проведенные в данной диссертационной работе, соответствуют задачам, предусмотренным в Указах Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии¹ действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 гг.» от 2 февраля 2017 года, № УП-4958 «О дальнейшем совершенствовании системы послевузовского образования» от 16 февраля 2017 года, в Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данном направлении.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики II. «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

Степень изученности проблемы. Исследования по целенаправленному изменению электрофизических параметров кремния методом легирования компенсирующими примесями или введением дефектных состояний проводятся ведущими учеными мира, например, российскими (Асина С.С., Шевченко В.Г., Ионов А.Н.), американскими (Michel Kozhukh.), украинскими (Долголенко А.П. и др.), японскими (Shin'ichiro Takasu), узбекистанскими (Юнусов М.С., Каримов М., Муминов Р.А., Бахадирханов М.К., Зайнобиддинов С.З., Махкамов Ш., Ёдгорова Д.М., Раджапов С.А.) и другими специалистами.

Анализ литературных данных и изданных монографий по легированным полупроводникам показывает, что существующие радиационные методы введения примесей при выращивании кристалла и диффузией, в основном, не позволяют достичь однородности легирования по всему объему кристалла, а степень компенсации от образца к образцу, изменяется в больших пределах. Использование радиационной компенсации кремния потоком быстрых электронов ограничивается диапазоном, энергией и однородностью пучка, а также размерами облучаемого кристалла.

Введение компенсирующих примесей ионной имплантацией позволяет получить компенсированный материал с определенной толщиной (в зависимости от энергии ионов до нескольких микрон). При этом компенсация объема базового материала не происходит, и изготавливать терморезисторы на базе компенсированного слоя в несколько микронов с необходимым геометрическим размером практически сложно. В связи с вышеизложенным, решение задачи получения однородного высокоомного

¹ Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 г.

полупроводникового материала требует поиска и разработки новых подходов и методов введения компенсирующих примесей или дефектных состояний.

Связь темы диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках научно-исследовательских проектов Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан № ФА-А14-Ф63 «Разработка технологии получения нейтроно-компенсированного кремния для терморезисторов» (2009-2011), № АЗ-ФА-Ф124 «Разработка технологии получения высоко компенсированного кремния методом радиационной обработки и датчиков на его основе» (2012-2014), № ФА-А14-Ф063 «Разработка устройства дистанционного контроля температуры и влажности в хранилищах на основе датчика из компенсированного кремния» (2015-2017) и фундаментальной темы «Радиационно - стимулированные процессы при ядерной трансмутации легированного монокристаллического кремния» (2020-2024).

Целью исследования является разработка радиационной технологии получения компенсированного монокристаллического кремния с атомами фосфора и терморadiационных датчиков на их основе.

Задачи исследования:

изучить влияние исходных технологических примесей и электрофизических параметров кремния на степень компенсации кремния при радиационной обработке;

осуществить легирование кремния атомами фосфора с максимальной степенью компенсации радиационной обработкой потоками медленных нейтронов атомного реактора;

определить оптимальный режим радиационной и термической обработки для получения нейтронно легированного кремния (НЛК) и высокоомного однородно – компенсированного кремния *i*-типа;

разработать технологию получения высокочувствительных детекторов ядерного излучения и термо- и фото резисторов с удельным сопротивлением $100 \div 170 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, на основе НЛК элементов датчиков извещателей пожара, работающих в интервале температур $273 \div 398 \text{ К}$;

разработать способ экспрессного определения плотности потока медленных нейтронов, атомного реактора по изменению электросопротивления кремния *n*-типа;

испытать лабораторный макет терморadiационных датчиков на основе компенсированного кремния, определить электрофизический параметр и область их применения.

Объектом исследования являются нейтронно-легированные и радиационно-обработанные монокристаллические кремний и терморadiационные датчики, детекторы для измерения потока нейтронов на их основе.

Предметом исследования являются нейтронно-стимулированные процессы в компенсированном кремнии и способ разработки датчиков для

контроля температуры среды и плотности потока нейтронов атомного реактора.

Методы исследования: метод облучения нейтронами, электрические методы измерения сопротивления резистора в зависимости от температуры; измерение концентрации носителей заряда; измерение удельного сопротивления кремния методом Холла.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

выявлены оптимальные режимы радиационной и термической обработки промышленных образцов *p*- и *n*-типов кремния для получения компенсированного монокристаллического кремния с номинальным удельным сопротивлением $(4\div 8)\cdot 10^5$ Ом·см;

предложен способ получения высокоомного кремния для изготовления терморadiационного датчика и разработан термодатчик на основе компенсированного кремния, работающего в интервале температур $273\div 398$ К для системы пожарного извещателя;

разработаны способ и датчик экспрессного определения плотности потока нейтронов исследовательского атомного реактора ВВР-СМ, основанный на изменении электросопротивления кремния *n*-типа с исходным удельным сопротивлением $1\div 5$ Ом·см;

установлено, что терморезисторы с $n^+ - n - n^+$ структурой после эксплуатации практически восстанавливают электрофизические параметры при повторной термообработке до температуры 473 К.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработан и защищен патентом способ изготовления термочувствительных $n^+ - n - n^+$ структур на основе компенсированного кремния *n*-типа с радиационными дефектами, позволяющий определять температуру в интервале $273\div 398$ К;

предложена и освоена технология получения радиационных датчиков на основе ядерно-легированного монокристаллического кремния и показано их использование для измерения плотности потока нейтронов атомного реактора;

показана возможность создания высокочувствительных фото- и терморезисторов из кремния *n*-типа с удельным сопротивлением $100\div 170$ Ом·см путем облучения быстрыми нейтронами и установлен предел чувствительности полученных резисторов.

Достоверность результатов исследования обосновывается применением современных и высокоточных методов и приборов, а также научно обоснованными теоретическими и практическими исследованиями. С применением хорошо известных и обоснованных технологических способов обработки образцов, предложенная методика радиометрических исследований защищена патентом и апробирована на разных кремниевых приборах.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов заключается в определении закономерностей изменения электрофизических параметров в зависимости от

температуры $n^+ - n - n^+$ структур, образованных в монокристаллах кремния, в потоке быстрых и медленных нейтронов исследовательского атомного реактора ВВР-СМ.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что разработанный способ получения $n^+ - n - n^+$ структур позволяет повысить чувствительность терморadiационных датчиков и существенно снизить стоимость производства подобных изделий. В частности, для дистанционного определения температуры тела пациента в медицинских учреждениях можно применять электронные термометры, разработанные на основе вышеуказанных структур.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных результатов по разработке терморadiационных датчиков на основе нейтронно-легированного монокристаллического кремния:

выявленные оптимальные режимы радиационной и термической обработки промышленных образцов p - и n -типов для получения компенсированного монокристаллического кремния с номинальным удельным сопротивлением в интервале $(4 \div 8) \cdot 10^5$ Ом·см были использованы в АО «Foton» для изготовления терморadiационных датчиков (Письмо ассоциации «Uzeltexsanoat» № 04-3/1307 от 14.07.2021 г.). Использование научных результатов позволило получить терморезисторы с заданными и улучшенными относительно зарубежных аналогов характеристиками;

предложенный способ получения высокоомного кремния для изготовления терморadiационного датчика и разработанная технология изготовления термодатчика на основе компенсированного кремния, работающего в интервале температур 273÷398 К зарегистрированы в Агентстве по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан (патент РУз IAP № 04796, 29.11.2013). Использование данной разработки позволило изготовить терморезисторы для системы пожарного извещателя;

разработанный способ экспрессного определения плотности потока медленных нейтронов исследовательского атомного реактора зарегистрирован в Агентстве по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан (патент РУз IAP №05339, 11.01.2017). Использование данной разработки позволило расширить диапазон контроля потока медленных нейтронов на реакторе ВВР-СМ от 10^{10} до 10^{18} нейтронов/см²;

установленная возможность восстановления параметров терморезисторов с $n^+ - n - n^+$ структурой после эксплуатации при повторной термообработке до температуры 473 К была использована в АО «Foton» при производстве диффузионных терморезисторов (Письмо ассоциации «Uzeltexsanoat» № 04-3/1307 от 14.07.2021 г.). Использование научных результатов позволило изготовить диффузионные терморезисторы на основе кремния n -типа.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 11 международных и республиканских конференциях.

Опубликованность результатов исследований. По теме диссертации получены 2 патента Республики Узбекистан, опубликованы 16 научных работ, из них 3 статьи в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, 2 из которых в реферируемом международном журнале.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Объем диссертации составляет 126 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 «**Способы получения легированного монокристаллического кремния**» приводится обзор литературных данных по способам легирования и обработки монокристаллического кремния. На основе анализа литературных данных, определены цель и задачи исследования.

Как известно, введенные в кремний примесные дефекты с глубокими энергетическими уровнями (ГЭУ) путем технологических процессов или радиацией являются термодинамически неустойчивыми. Поэтому такая система стремится к равновесному состоянию путем распада. Распад примесных и радиационных дефектов приводит к изменению электрофизических и рекомбинационных свойств кремния и параметров приборов на его основе, т.к. в процессе распада дефекты переходят в новые состояния, представляющие собой комплексы, которые могут образовывать дополнительные энергетические уровни в запрещенной зоне кремния. Поэтому изучение процессов распада с изменением температуры представляет большой научный и практический интерес.

Вторая глава диссертации «**Методика легирования и измерительные установки для измерения электрофизических характеристик образцов**» посвящена технологии получения таких объектов исследования, как термостабильный и однородный по электрическим параметрам кремний, а также методике и технике экспериментов. Выбраны оптимальные режимы радиационной обработки образцов и оптимальные характеристики для получения заданных значений параметров датчиков.

Исследованы и определены возможности получения кремниевых терморезисторов из *n*-типа монокристалла с идентичными характеристиками, путем облучения быстрыми нейтронами.

Обоснован примененный трансмутационный способ введения примеси фосфора в исследуемые образцы монокристаллического Si, электрически пассивного состояния дефектного комплекса с участием фосфора.

В третьей главе «**Разработка способа получения термодатчиков на базе ядерной трансмутации кремния**» приведены основные результаты разработки технологии получения легированных образцов с ядерной трансмутацией для термодатчиков, способы контроля и анализа основных характеристик этих датчиков и на основе сравнительного анализа с данными других разработчиков термодатчиков обоснованы технические и экономические преимущества предлагаемого в настоящей работе способа их изготовления.

Для определения интегрального потока быстрых нейтронов применялась методика определения интенсивности медленных нейтронов (энергия $E \leq 0,1$ МэВ) с дальнейшим пересчетом с использованием кадмиевого соотношения. Расчет потока проводился на основе создания в кремнии *p*-типа донорной примеси фосфора, при захвате одним из изотопов кремния медленного нейтрона. При этом наведенную концентрацию фосфора можно рассчитать по формуле

$$N_p = 1,7 \cdot 10^4 \Phi \quad (1)$$

где $\Phi = \varphi \cdot t$, φ - интенсивность потока медленных нейтронов, t - время облучения, с.

Измеряя до и после облучения концентрации носителей заряда кремния можно определить поток медленных нейтронов. Погрешность при измерении концентрации носителей заряда составляла ± 8 %. Отжиг радиационных дефектов проводился при температуре ~ 1073 К с последующим медленным охлаждением со скоростью $3 \div 5$ град/мин.

Проведенный статистический анализ значений термочувствительности измеренных образцов показал, что выход одинаковых резисторов с равными коэффициентами термочувствительности (***B***) из 100 шт. составляет не менее 92 %.

Изготовленный терморезистор с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) на основе компенсированного кремния с радиационными дефектами, обладающего диапазоном номинальных сопротивлений $(2 \div 4) \cdot 10^5$ Ом, имеет следующие характеристики: постоянная $B = (6000 \pm 50)$ К; $\alpha_{306\text{ К}} = - (6,9 \div 7,0) \text{ \% / град}$. - температурный коэффициент сопротивления термистора при 306 К; интервал температуры измерения от 303 до 373 К.

Температурные зависимости изменения электросопротивления R после облучения быстрыми нейтронами флюенсом $2,2 \cdot 10^{14}$ см⁻² для 5 произвольно выбранных образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Температурные зависимости относительного изменения
электросопротивления образцов**

Изменение температур образцов Т, К	Температурный коэффициент зависимости R (Т)				
	Образец №1	Образец №2	Образец №3	Образец №4	Образец №5
	R, Ом	R, Ом	R, Ом	R, Ом	R, Ом
303	$1,48 \cdot 10^5$	$1,76 \cdot 10^5$	$2,18 \cdot 10^5$	$2,09 \cdot 10^5$	$1,93 \cdot 10^5$
308	$9,58 \cdot 10^4$	$9,63 \cdot 10^4$	$9,75 \cdot 10^4$	$9,68 \cdot 10^4$	$9,65 \cdot 10^4$
313	$7,19 \cdot 10^4$	$7,42 \cdot 10^4$	$7,57 \cdot 10^4$	$7,49 \cdot 10^4$	$7,485 \cdot 10^4$
318	$4,85 \cdot 10^4$	$5,09 \cdot 10^4$	$5,15 \cdot 10^4$	$5,12 \cdot 10^4$	$5,1 \cdot 10^4$
323	$3,58 \cdot 10^4$	$3,65 \cdot 10^4$	$3,76 \cdot 10^4$	$3,67 \cdot 10^4$	$3,66 \cdot 10^4$
328	$2,61 \cdot 10^4$	$2,72 \cdot 10^4$	$2,80 \cdot 10^4$	$2,79 \cdot 10^4$	$2,75 \cdot 10^4$
333	$1,93 \cdot 10^4$	$2,03 \cdot 10^4$	$2,12 \cdot 10^4$	$2,10 \cdot 10^4$	$2,07 \cdot 10^4$
338	$1,48 \cdot 10^4$	$1,52 \cdot 10^4$	$1,65 \cdot 10^4$	$1,63 \cdot 10^4$	$1,59 \cdot 10^4$
343	$1,09 \cdot 10^4$	$1,15 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^4$	$1,18 \cdot 10^4$	$1,15 \cdot 10^4$
348	$8,26 \cdot 10^3$	$9,33 \cdot 10^3$	$9,45 \cdot 10^3$	$9,42 \cdot 10^3$	$9,40 \cdot 10^3$
353	$6,47 \cdot 10^3$	$6,71 \cdot 10^3$	$6,82 \cdot 10^3$	$6,81 \cdot 10^3$	$6,74 \cdot 10^3$
358	$5,18 \cdot 10^3$	$5,35 \cdot 10^3$	$5,46 \cdot 10^3$	$5,40 \cdot 10^3$	$5,40 \cdot 10^3$
363	$3,72 \cdot 10^3$	$3,95 \cdot 10^3$	$4,12 \cdot 10^3$	$4,05 \cdot 10^3$	$4,07 \cdot 10^3$
368	$2,97 \cdot 10^3$	$3,084 \cdot 10^3$	$3,18 \cdot 10^3$	$3,156 \cdot 10^3$	$3,14 \cdot 10^3$
373	$2,16 \cdot 10^3$	$2,29 \cdot 10^3$	$2,36 \cdot 10^3$	$2,31 \cdot 10^3$	$2,32 \cdot 10^3$

Как видно из таблицы 2, в предлагаемом способе получения терморезисторов, параметры B в $\sim 1,5$ раза лучше по сравнению с другими известными способами получения терморезисторов.

Использование предлагаемого способа изготовления кремниевых терморезисторов, по сравнению с известными способами, обеспечивает следующие преимущества: крайняя простота изготовления (снижение себестоимости компенсированного материала) и отсутствие необходимости отдельной градуировки каждого терморезистора.

Система устроена следующим образом: пожарные датчики срабатывают при появлении дыма; датчики, изготовленные из полупроводникового кремниевого материала, весьма чувствительны к изменениям температуры и срабатывают еще до появления пожара и тем самым позволяют предотвращать пожар. Для решения этой проблемы, в настоящее время, предлагаются новые способы получения материала с заданными идентичными свойствами и параметрами, с использованием радиационной обработки.

Значения термочувствительности известных терморезисторов, по сравнению с нашими образцами

Тип терморезистора	Номинальное сопротивление при 300 К	Постоянная «В», К
Наш термодатчик	10^6 Ом	6000 (273...403 К)
ТР-2	33 к Ом·см ± 20 %	3470 ...3900 (273...423 К)
ТР-14	(2,6 ÷ 2,9) кОм	4000...4300 (273...423 К)
СТ104D	10^5 Ом	4040 (233...373 К)

При рассмотрении предыдущих поколений датчиков-извещателей, мы убедились в том, что созданный нами новый вид датчика имеет ряд преимуществ. По сравнению с другими аналогичными датчиками, предлагаемый нами датчик в два раза чувствительнее к изменениям температуры, время срабатывания термодатчика <8 секунд, максимальная температура контролируемой среды 398 К, напряжение электропитания (9-220) В и себестоимость в два-три раза ниже.

Появляется возможность повторного использования целиком или отдельных компонентов датчика. Кроме того, имеется возможность использования беспроводной передачи сигнала до 100 метров через USB-порт. Таким образом, преимущественными сторонами нашей разработки являются высокая чувствительность и низкая себестоимость, новый удобный при монтаже дизайн и возможность многократного использования.

Датчик-сигнализатор температуры, приведенный на рисунке 1, предназначен в качестве термодатчика для контроля за уровнем температуры контролируемой среды выше допустимой. Благодаря высокой чувствительности терморезистора ($B=6000$ К) его можно успешно использовать в химической, нефтегазовой и других областях промышленности. Например, соединив несколько датчиков через USB к компьютеру можно управлять и контролировать пожарную безопасность бункеров на хлопковых пунктах.

К тому же поверхность датчика покрывается алюминием или нержавеющей сталью. В результате датчик становится устойчивым к внешним воздействиям, удобен при использовании в химических и радиационных складах.

Принцип установления датчика для определенной температуры: если температура объекта не превышает установленный уровень, ТР имеет большое сопротивление ($R_{ТР} = 2 \cdot 10^6$ Ом), уровень напряжения на базе транзистора КТ315 Б низкий, т.е. транзистор закрыт. Напряжение на коллекторе транзистора большое, а коллекторный ток мал. Резисторами R_2 и

R_3 при комнатной температуре устанавливается коллекторный ток ($8 \div 10$) мА. С повышением температуры сопротивление терморезистора уменьшается. Резистором R_2 достигается коллекторный ток транзистора (например, 333 К) $I_k \approx 13$ мА. Коллекторный ток достаточен, чтобы вызвать срабатывание реле, к контактам которого подключено устройство сигнализации (на схеме не показано).

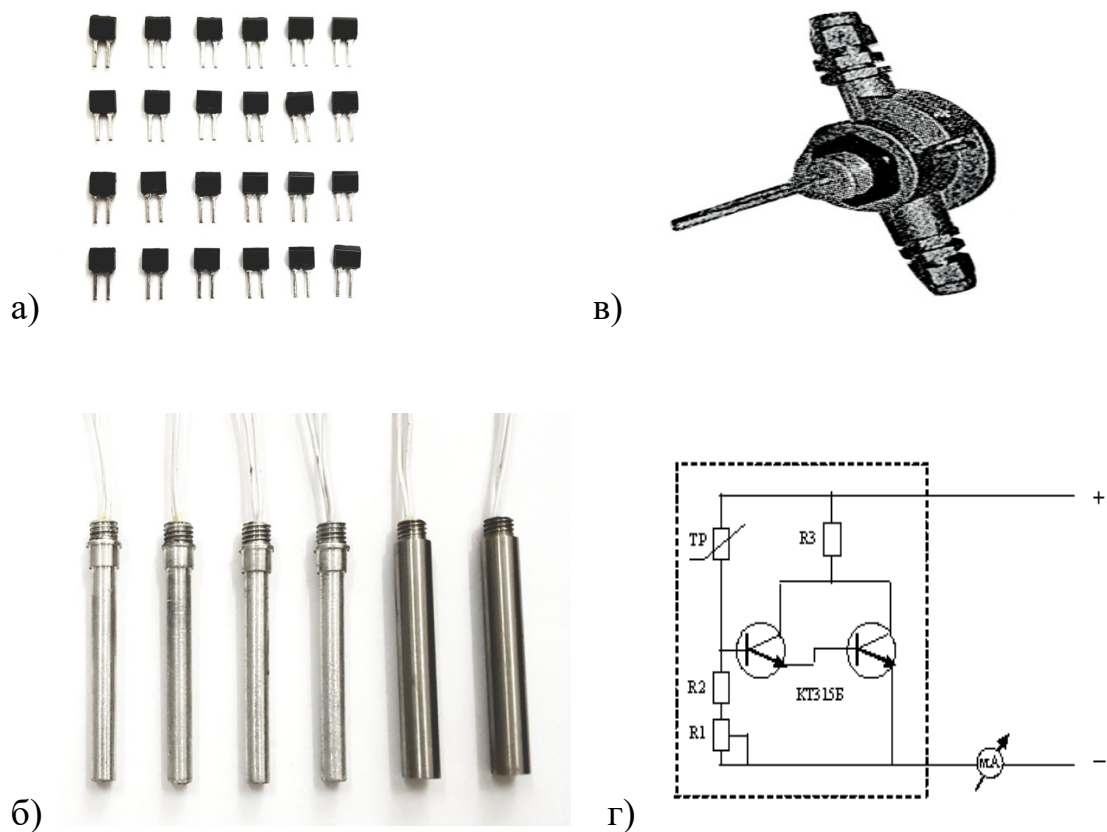


Рис. 1. Датчик сигнализатора температуры: а) вид терморезистора; б) макеты терморезисторов в оболочке, которая выполнена из алюминиевого сплава; в) вид пожарных извещателей; г) схема для датчика сигнализатора температуры, схема подключения ТР с электронным ключом ($R_{TR} = 2 \cdot 10^6$ Ом, $R_1 = 100$ кОм, $R_2 = 20$ кОм, $R_3 = 100$ Ом)

Используя вышеизложенный способ изготовления датчиков и на основе схемотехнического подхода был изготовлен лабораторный образец электронного термометра, схема которого приведена на рис. 2. Схема измерения электронного термометра измерителя представляет собой мост постоянного тока, в одно плечо которого включен терморезистор (ТР) электронным ключом, а индикатором служит головка микроамперметра ($0 \dots 50$ мкА). Принцип работы электронного термометра основан на дисбалансе электрического моста при изменении сопротивления ТР. Резисторы R_1 , R_2 устанавливаются в минимальное положение. При комнатной температуре ТР имеет большое сопротивление ($R_{TR} = 2 \cdot 10^6$ Ом), т.е. транзистор закрыт. Напряжение на коллекторе транзистора (КТ315 Б)

большое, а коллекторный ток мал. После уравнивания моста напряжение в измерительной диагонали равно нулю. При температуре 307 К сопротивление ТР снижается, резистором R_1 устанавливают это значение на шкале прибора. Затем температура ТР поднимается до 315 К, с помощью резистора R_4 устанавливают это значение так же на шкале прибора. Температуру измеряют ртутным лабораторным термометром. В течение короткого времени можно измерить температуру в пределах 307-315 К, где терморезистор в качестве электронного термометра должен заменить стеклянный термометр. В электронном термометре применен терморезистор, изготовленный на основе компенсированного кремния ($R_{ТР} = 2 \cdot 10^5$ Ом при 303 К); резисторы: $R_1 = 100$ кОм, $R_2 = 500$ Ом, $R_3 = 500$ Ом, $R_4 = 100$ Ом, $R_5 = 150$ кОм, $R_6 = 21$ кОм, $R_7 = 100$ Ом, $R_8 = 100$ Ом, $R_9 = 10$ кОм. Изготовленные лабораторные термометры более чувствительны, реагируют на температуру быстрее и по себестоимости дешевле по сравнению с зарубежными аналогами. Этими электронными термометрами можно управлять посредством компьютерной программы с USB соединением к компьютеру или телефону, к тому же можно дистанционно измерить температуру больных пациентов.

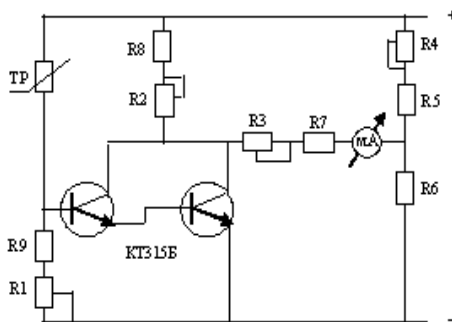


Рис. 2. Схема электронного термометра

Далее были измерены электрофизические параметры методом затухания фотопроводимости, изучалось влияние высокотемпературной обработки на рекомбинационные свойства НЛК в зависимости от концентрации бора. Отжиг радиационных дефектов (РД) проводился при температуре ~ 1273 К в воздухе в течение ~ 30 мин. с последующим медленным охлаждением ($5 \div 10$) град/мин. Для выяснения номинального значения подвижности основных носителей заряда проводился изотермический отжиг при температуре ~ 1273 К.

Фотоэлектрические параметры компенсированных образцов контролировались на основе изменения отношения $-R_T/R_c$, где R_T – темновое сопротивление, Ом; R_c – световое сопротивление, Ом. Световое сопротивление измеряли при освещенности $E=200$ лк.

Подготовленные образцы ($n^+ - n - n^+$ - структуры) помещали в кварцевую ампулу и запаивали, подвергали нейтронному облучению в канале атомного реактора (при интенсивности быстрых нейтронов $\phi = (3 \div 4) \cdot 10^{12}$ см $^{-2} \cdot$ с $^{-1}$) до полной компенсации основных носителей заряда акцепторными

радиационными дефектами. Темновое сопротивление контролировалось измерением температурной зависимости в интервале 303÷373 К. Полученные результаты приведены на рис. 3 и 4.

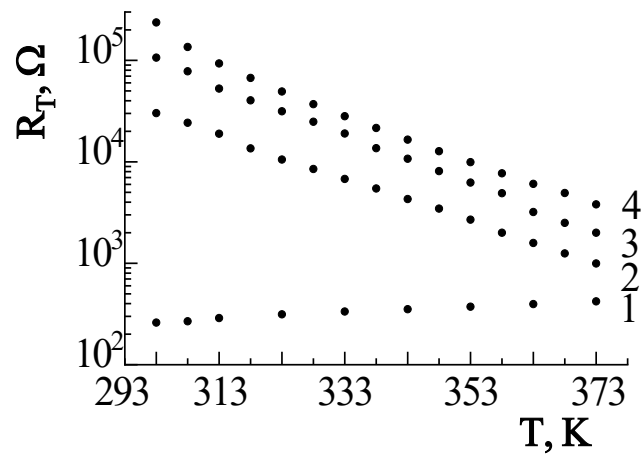


Рис. 3. Зависимость электросопротивления n^+-n-n^+ - структуры ($\rho_0 = 170$ Ом·см) от температуры до (1) и после облучения флюенсами быстрых нейтронов (см^{-2}): 2 – $5 \cdot 10^{13}$; 3 – $8 \cdot 10^{13}$; 4 – $2 \cdot 10^{14}$

Как видно из рис. 3, значения R_T практически достигают максимальной величины после времени облучения $t=120$ с. Следует отметить, что при флюенсе быстрых нейтронов $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ значения R_T резисторов с удельным сопротивлением (100÷170) Ом·см сравниваются (рис.4).

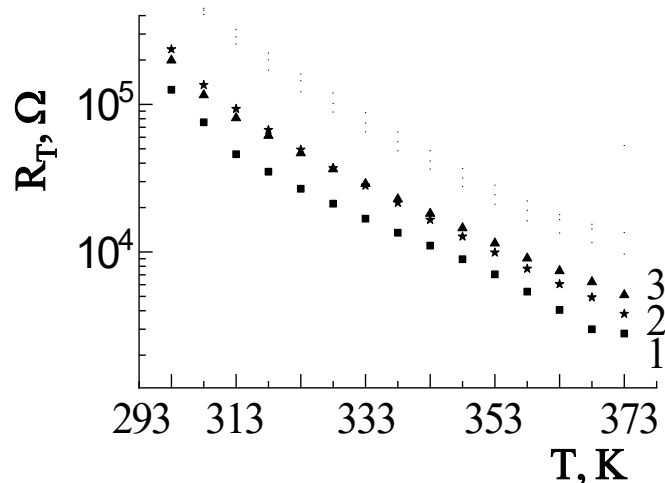


Рис. 4. Зависимость электросопротивления облученных n^+-n-n^+ - структур от температуры для кремния с различными исходными ρ_0 (Ом·см): 1–70; 2–100; 3– 170

В этих образцах уровень Ферми расположен ниже $E_c-0,50$ эВ и образующиеся уровни $E_c-0,18$ и $E_c-0,39$ эВ по мере роста флюенса быстрых нейтронов из-за смещения уровня Ферми к середине запрещенной зоны полностью ионизируются. Уровень $E_c-0,40$ эВ, связанный с дефектом фосфор+

вакансия (E-центр), имеет малую величину концентрации ($< 10^{12} \text{ см}^{-3}$), после облучения также ионизован, то есть практически не влияет на электрофизические свойства кремния. Поэтому можно предположить, что в компенсации исходной донорной примеси фосфора, в основном, участвует только акцепторный уровень дивакансии $E_c-0,54 \text{ эВ}$.

Для стабилизации фотоэлектрических параметров облученного образца проводился термоотжиг при температуре 493 К в течение 20 мин. Результаты измерения R_T/R_C от температуры отжига приведены в таблице 3. Как видно из таблицы после термообработки кратность изменения электросопротивления растет и увеличивается практически на порядок (~ 10 раз).

Таблица 3

Кратность изменения отношения R_T/R_C в образцах $\rho_0 = 170 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ после облучения флюенсами быстрых нейтронов $\sim 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ до и после термоотжига при $\sim 493 \text{ К}$ в течение ~ 20 мин.

Состояние	Кратность изменения отношения R_T/R_C			
До термоотжига	1,14	1,1	1,1	1,2
После термоотжига	11,2	9,7	11,1	12

На рис. 5 приведено относительное изменение электросопротивления облученных (флюенс быстрых нейтронов $\sim 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$) $n^+ - n - n^+$ структур (полученных на основе $\rho_0 = 170 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) при освещенности $\sim 200 \text{ лк}$ в зависимости от температуры.

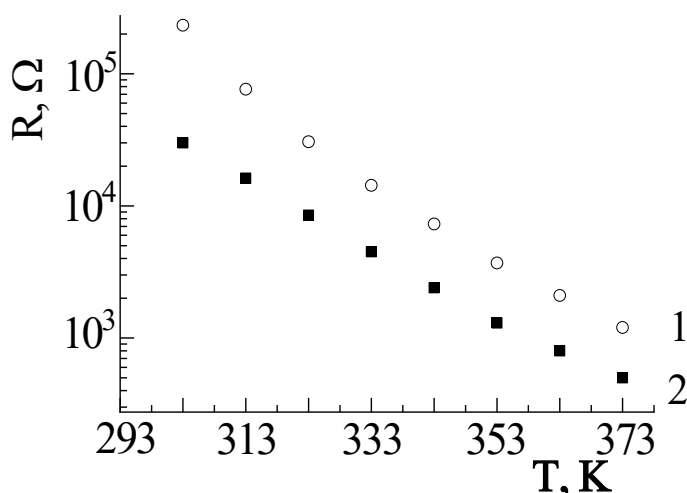


Рис. 5. Зависимость сопротивления фоторезисторов ($n^+ - n - n^+$ -структуры) от температуры: 1 – в темноте; 2 – при освещении ($E = 200 \text{ лк}$)

Полученная зависимость описывается следующим выражением:

$$(R_T - R_C)/R_T = \exp(-670 / T) \quad (2)$$

В результате исследования радиационно-компенсированного кремния выявлена возможность создания фото- и термодатчиков с идентичными характеристиками, работающих в интервале температур от 303 ÷ 373 К.

Фоторезистор, на основе кремния, компенсированного радиационными дефектами, способен работать до температуры ~373 К в качестве фото- и термодатчиков (см. рис. 6).

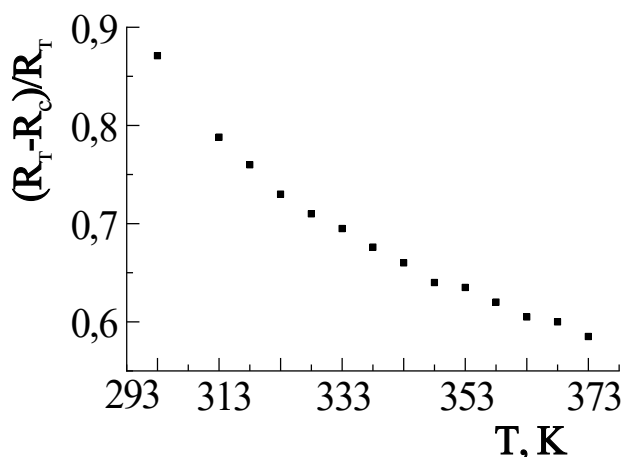


Рис. 6. Зависимость относительного изменения электросопротивления фоторезисторов ($n^+ - n - n^+$ -структуры) от температуры при освещенности $E = 200$ лк

В четвертой главе «Разработка способа получения детектора для измерения потока нейтронов на базе ядерно-трансмутационного кремния» излагаются физические и технологические этапы разработки детектора для измерения потока нейтронов.

При создании полупроводникового детектора из монокристаллического нейтронно-легированного кремния (НЛД) технологический этап состоит из следующих последовательно выполняемых операций:

1. Пластины для p -типа $\rho = 1 - 5$ кОм·см НЛ кремния с необходимыми диаметрами и толщиной $d = 10 - 30$ мм получают путем разрезания;

2. Для удаления механически нарушенного слоя во время резки используется двухсторонняя шлифовка, с каждой стороны удаляется слой толщиной не менее 50 мкм на шлифовальном станке с применением микропорошков М-14 – М5;

3. Проводится промывка пластин после шлифовки деионизованной водой с бесщелочным мылом.

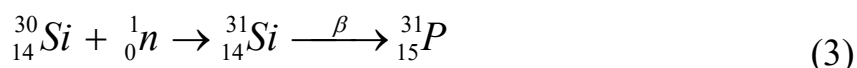
4. Очистка поверхности пластин:

а) кипячение в течение 15 минут в перекисно-аммиачном растворе. При обработке в этой слабощелочной среде эффективно удаляются неполярные органические соединения - загрязнения, такие как минеральные масла, парафины и т.д., дипольный момент молекул таких веществ невелик, поэтому они обладают высокой удельной поверхностной энергией и обуславливают термодинамическую нестабильность поверхности;

б) кипячение в течение 7 минут в концентрированной азотной кислоте и промывка в деионизованной воде. При такой обработке ионные химические загрязнения (Na^+ , K^+ , Ca^+ , Mg^+ , Fe^{2+} , и др.) удаляются с поверхности за счёт перевода их в растворимые в воде соли с последующей отмывкой в деионизованной воде.

При этом поверхность повторно и эффективно обрабатывается в перекисно-аммиачном растворе в течение 15 минут и промывкой снимаются гидрофобные пористые окисные пленки.

5. Подготовленные шайбы помещают в кварцевую ампулу и запаивают. Далее ампулы с образцами подвергают нейтронному облучению в канале атомного реактора до полной компенсации основных носителей заряда атомами фосфора, наведенного в результате ядерной реакции:



6. Для отжига радиационных дефектов облученные пластины помещают в бокс и загружают в рабочую зону печи при температуре 1073-1173 К в течение 3 ч. и затем печь выключают, а пластины остывают вместе с печью.

Из полученных в результате нейтронного легирования пластин, в соответствии с поставленными задачами, изготавливаются образцы необходимой геометрии (в данном случае – шайбы). Далее, после проведения нейтронной компенсации кремния все пластины подвергаются химико-технологической обработке.

Принцип действия полупроводниковых детекторов основан на изменении электрофизических свойств полупроводников под действием нейтронов. Известен способ измерения плотности потока медленных нейтронов полупроводниковым детектором, созданным на основе донорной примеси фосфора, образующегося при захвате одним из изотопов кремния медленного нейтрона.

Недостатком этого способа является, во-первых, невозможность определить плотности потока медленных нейтронов, что, в свою очередь, не позволяет экспрессно определять плотность потока медленных нейтронов; во-вторых, для определения флюенса быстрых нейтронов в зависимости от измеряемого потока нейтронов выбирается исходное значение удельного сопротивления кремния.

Поэтому предпочтительно экспрессное определение плотности потока медленных нейтронов, основанное на изменении электросопротивления резистора из полупроводникового кремния *n*-типа под действием нейтронного излучения в атомном реакторе.

Решение указанной задачи требует выбора удельного сопротивления кремния *n*-типа для установления минимального времени облучения детектора тепловых нейтронов, определения верхней и нижней границы электрического сопротивления после облучения детектора, т.е. степени компенсации кремния *n*-типа.

Это достигается измерением электросопротивления полупроводникового кремниевого резистора (детектора), изготовленного из кремния n -типа с исходным удельным электросопротивлением (ρ_0) в интервале от 1 до 5 Ом·см (R_0) и после облучения (R). Время облучения выбирается так, чтобы увеличение значения относительного электросопротивления R/R_0 находилось в диапазоне от 10 до 1000.

Для создания такого резистора (детектора) используется полупроводниковый кремниевый резистор со структурой $n^+ - n - n^+$, т.е. детектор, изготовленный из кремния n -типа с удельным электрическим сопротивлением (ρ), равным от 1 до 5 Ом·см. Выбор исходного кремния n -типа с удельным сопротивлением от 1 до 5 Ом·см и длительности облучения:

- если удельное сопротивление кремния n -типа с $\rho > 5$ Ом·см, тогда верхнюю границу длительности облучения выбирают таким образом, чтобы относительное изменение электросопротивления детектора (R/R_0) было меньше 1000 (рис. 7). При этом значения подвижности основных носителей заряда практически остаются неизменными [$R/R_0 = (\mu_0 n_0) / (\mu n)$, где μ_0 -, n_0 -, μ -, n - подвижность и концентрации основных носителей заряда до и после облучения, соответственно].

- если удельное сопротивление кремния n -типа ρ равно 1 Ом·см, тогда нижнюю границу длительности облучения выбирают таким образом, чтобы относительное изменение электросопротивления детектора (R/R_0) было больше 10. При этом величина R/R_0 будет значительно больше по сравнению с ошибкой измерений (общая погрешность измерения R/R_0 составляют $\pm 3\%$).

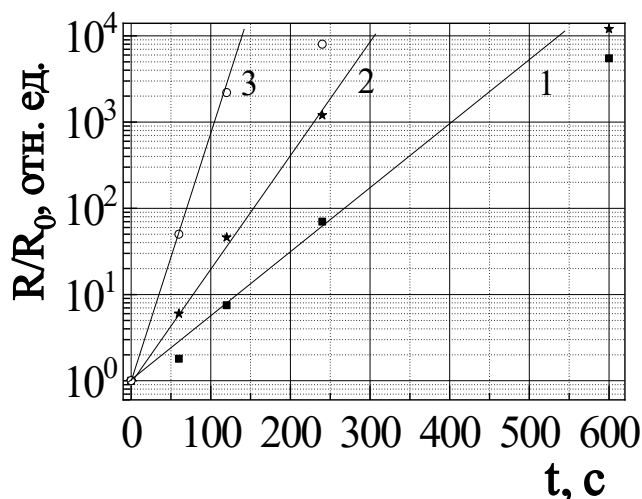


Рис. 7. Зависимость относительного изменения электросопротивления от длительности облучения нейтронов (в атомном реакторе) при различных значениях удельного сопротивления кремния n -типа (Ом·см): 1- 1,1; 2- 2,1; 3- 4,97

В детекторе образующие радиационные дефекты $E_c - 0,18$ эВ (A -центр) полностью ионизованы при комнатной температуре и на изменение сопротивления практически не влияют, а другие возникающие радиационные центры заполнены электронами и их концентрации невысокие. Именно эти

условия определяют выбор верхней и нижней границы исходного удельного сопротивления кремния *n*-типа и относительного изменения электросопротивления после облучение нейтронами в интервале от 10 до 1000.

Измерения плотности медленных нейтронов осуществляются следующим образом: при облучении электрическое сопротивление полупроводникового кремниевого резистора – детектора экспоненциально зависит от флюенса нейтронов *f*:

$$R = R_0 \exp(kF) \quad (4)$$

где R_0 , R – электрическое сопротивление до и после облучения, соответственно; $F = \varphi \cdot t$ – флюенс нейтронов; φ – плотность потока нейтронов; t – длительность облучения; k – коэффициент радиационного повреждения по проводимости, зависящий от исходной проводимости материала ($\sigma_0 = 1/\rho_0$, где ρ_0 – исходное удельное сопротивление) и вида излучения:

$$k = \frac{\Delta\sigma}{F} \cdot \rho_0 \quad (5)$$

где $\frac{\Delta\sigma}{F}$ – начальное (10 %) уменьшение электропроводности материала при облучении

$$\frac{\Delta\sigma}{F} = \alpha \cdot (\rho_0)^{-b} \quad (6)$$

где α и b – коэффициент пропорциональности и показатель степени, соответственно

Величина $\frac{\Delta\sigma}{F}$ определяется по наклону начальных (10 %) участков дозовых зависимостей $R/R_0 \sim f(F)$ (рис. 7). В результате, выражение (4) с учетом (5) и (6) записывается следующим образом

$$\frac{R}{R_0} = \exp(\alpha \cdot \rho_0^{1-b} \cdot \varphi \cdot t) \quad (7)$$

Из выражения (7) находят плотность потока медленных нейтронов

$$\varphi = \frac{\ln \frac{R}{R_0}}{\alpha \cdot \rho_0^{1-b} \cdot t} \quad (8)$$

Таким образом, разработан экспрессный способ измерения интенсивности медленных нейтронов в атомном реакторе, заключающийся в использовании небольшого объема детектора (5x5x0,4 мм) с удельным сопротивлением исходного материала детектора $\rho_0 = (1 \div 5)$ Ом·см и облучении в течение 1÷2 минут.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе исследования, проведенного по теме диссертации доктора философии (PhD) «Разработка терморadiационных датчиков на основе нейтронно легированного монокристаллического кремния», получены следующие результаты:

1. Предложен экспериментальный способ определения зависимости удельного сопротивления образцов от температуры до и после облучения нейтронами.

2. Установлен минимальный флюенс нейтронов $\Phi = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (энергия нейтронов $\sim 0,1 \text{ МэВ}$) для облучения исходного кремния с удельным сопротивлением $100 \div 170 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, которое приводит к получению термочувствительного ($B=6000 \text{ К}$) материала (номинальное сопротивление при комнатной температуре $\sim 10^5 \text{ Ом}$), работающего в интервале температур $303 \div 373 \text{ К}$, а остаточная радиоактивность образца является минимальной.

3. Выявлено, что термостабильность параметров резисторов, полученных на основе кремния *n*-типа путем облучения нейтронами флюенсом $(2,2 \div 2,7) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, сохраняется при температурах не выше $\sim 373 \text{ К}$.

4. Показано, что можно изготовить из промышленного кремния *p*-типа с исходным удельным сопротивлением (10^3) $\text{Ом} \cdot \text{см}$ с радиационной обработкой на нейтронном потоке ядерного реактора и разработана технология изготовления терморезисторов на базе *n*-типа кремния с $\rho \sim 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, работающие в диапазоне $273 \div 398 \text{ К}$.

5. Показана возможность создания фото- и терморезисторов из кремния *n*-типа с удельным сопротивлением $100 \div 170 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ путем облучения быстрыми нейтронами атомного реактора. Выявлен оптимальный режим радиационно-термической обработки кремния для получения фоточувствительных структур. Получено ~ 10 кратное изменение сопротивления при освещенности $\sim 200 \text{ лк}$.

6. Выявлены условия получения компенсированного кремния путем радиационной обработки потоками нейтронов и изготовления макета терморезистора работающего в области $303 \div 373 \text{ К}$. Пожарная сигнализация внедрена в производство терморезисторов, изготовлены терморезисторы совместно с компанией «Элекор».

7. На основе разработанной технологии изготовлены термо- и фотодатчики из легированного нейтронно-трансмутационным способом монокристаллического кремния, используемого для предупреждения пожароопасных ситуаций в объектах промышленности.

8. На основе термочувствительных $n^+ - n - n^+$ структур изготовлены лабораторные образцы электронных термометров, позволяющих определить температуру тела человека.

9. Разработанный на основе кремния *n*-типа детектор для измерения плотности общего потока нейтронов позволяет измерять широкий диапазон флюенса нейтронов от 10^{10} до $10^{18} \text{ нейтронов/см}^2$, соответствующим выбором исходного сопротивления кремния.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 ON AWARD OF
SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS**

INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS

SULAYMONOV ABDURAKHMON ABDURASHIDOVICH

**DEVELOPMENT OF TERMORADIATION SENSORS BASED ON
NEUTRON DOPED MONOCRYSTALLINE SILICON**

01.04.01 – Devices and methods of experimental physics

**DISSERTATION ABSTRACT
of the doctor of philosophy (PhD) on technical sciences**

Tashkent – 2021

The theme of the dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on technical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under No. B2021.3.PhD/T2342.

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at the Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at www.inp.uz and on the website of “Ziyonet” informational and educational portal at www.ziyonet.uz.

Scientific consultant: **Tashmetov Mannab Yusupovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

Official opponents: **Yodgorova Dilbara Mustafaeвна**
Doctor of Technical Sciences, professor

Qurbanov Baxtiyar Ibragimovich
Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher

Leading organization: **National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek**

The defense of the dissertation will be held on “_____” _____2021, at ___ at the meeting of the Scientific Council No. DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics, (Address: INP, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city. tel. (+99871) 289-31-21, fax (+99871) 289-31-18; e-mail: info@inp.uz).

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through in the Information Resource Centre of the Institute of Nuclear Physics (registered under No._____) Address: INP, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city. tel. (+99871) 289-31-19.

The abstract of dissertation was distributed on “_____” _____2021.
(Registry record No. _____ dated “_____” _____2021.)

I.I. Sadikov
Vice-Chair of the Scientific Council
on Award of Scientific Degrees,
D.T.S., Senior Researcher

O.R. Tojiboyev
Scientific secretary of the Scientific Council onaward
of Scientific degrees, PhD Ph.-M.S.

I. Nuritdinov
Chairman of the Scientific seminar of the Scientific
Council on award of Scientific Degrees,
D.Ph.-M.S., Professor

INTRODUCTION (annotation of PhD dissertation)

The aim of the research is to develop a radiation technology for producing compensated monocrystalline silicon with phosphorus atoms, and to create highly sensitive thermo radiation sensors and based on them.

The following tasks:

to study the influence of initial technological impurities and electrophysical parameters of silicon on the degree of silicon compensation during radiation treatment in the nuclear reactor;

to perform doping of silicon with phosphorus atoms to the maximum degree of compensation by radiation treatment with slow neutron flux to optimal fluency;

to find the optimal mode of irradiation and heat treatment for the production of neutron-doped silicon (NDC) and high-resistance homogeneous-compensated silicon of the *i*-type;

to develop a technology for producing highly sensitive nuclear radiation detectors and thermo-and photo-resistors with a specific resistance of 100÷170 Ohm·cm, based on NDC elements of fire detector operating in the temperature range 273÷398 K;

to develop a method for rapid determination of the slow neutron flux density in a nuclear reactor channel by changing the electrical resistance of *n*-type silicon;

to test the laboratory model of thermoradiation sensors based on compensated silicon, identify the electrophysical parameter and determine the scope of their application.

The objects of the research are thermo-radiation fire detectors and detectors for measuring a neutron flux based on neutron-doped and radiation-treated monocrystalline silicon.

The subjects of the research are neutron-stimulated processes in compensated silicon and methods of obtaining sensors for monitoring the temperature and neutron flux density.

The scientific novelty of the research is as follows:

the optimal modes of radiation and heat treatment of industrial samples of *p*- and *n*-types for the production of compensated single-crystal silicon with a nominal resistivity in the range $(4\div 8)\cdot 10^5$ Ohm·cm for the manufacturing of thermal radiation sensors;

the method is proposed for obtaining high-resistance silicon for making a thermal radiation sensor and the technology is developed for manufacturing a thermal sensor based on compensated silicon operating in the temperature range of 273÷398 K for a fire detector system;

the method has been developed for rapid determination of a slow neutron flux density in any channel of the research nuclear reactor of the INP AN RUz based on a change in the electrical resistance of *n*-type silicon;

it is established that thermoresistors with n^+-n-n^+ structure after operation practically restores the parameters during repeated heat treatment cycles to the temperature of 473 K.

Implementation of the research results. Based on the results obtained on the development of thermo-radiation sensors based on neutron-doped monocrystalline silicon;

the identified optimal modes of radiation and heat treatment of industrial samples of p- and n-types for obtaining compensated single-crystal silicon with a nominal resistivity in the range $(4\div 8)\cdot 10^5$ Ohm·cm were used at AO "Foton" for the manufacture of thermo-radiation sensors (Letter of the Association "Uzeltexsanoat" № 04-3/1307 dated July 14, 2021). The use of scientific results made it possible to obtain thermistors with specified and improved characteristics relative to foreign analogues;

the proposed method for producing high-resistance silicon for the manufacture of a thermo-radiation sensor and the developed technology for the manufacture of a temperature sensor based on compensated silicon operating in the temperature range of $273 \div 398$ K are registered at the Intellectual Property Agency of the Republic of Uzbekistan (Patent of the Republic of Uzbekistan No. 04796, 11/29/2013). The use of this development made it possible to manufacture thermistors for the fire detector system;

the developed method for the rapid determination of the flux density of slow neutrons of a research nuclear reactor is registered by the Intellectual Property Agency of the Republic of Uzbekistan (Patent of the Republic of Uzbekistan No. 05339, 01/11/2017). The use of this development made it possible to expand the range of monitoring the slow neutron flux at the WWR-SM reactor from 10^{10} to 10^{18} neutrons/cm²;

the established possibility of restoring the parameters of thermistors with n⁺-n-n⁺ structure after operation with repeated heat treatment to a temperature of 473 K was used in AO "Foton" in the production of diffusion thermistors (Letter of the Association "Uzeltexsanoat" №. 04-3/1307 dated July 14, 2021). The use of scientific results has made it possible to manufacture n-type silicon-based diffusion thermistors.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, the conclusion, a list of references and an appendix. The volume of the dissertation is 126 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. Патент на изобретение РУз № IAP 04796. Способ изготовления кремниевых терморезисторов / Каримов М., Махкамов Ш., Турсунов Н. А., Махмудов Ш. А., Сулаймонов А.А. // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. - 29.11.2013.

2. Патент на изобретение РУз № IAP 05339. Способ измерения плотности потока нейтронов кремниевым детектором n-типа / Каримов М., Махкамов Ш., Турсунов Н.А., Махмудов Ш.А., Саттиев А.Р., Сулаймонов А.А., Рафиков А.К. // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. - 27.04.2017.

3. Каримов М., Махкамов Ш., Махмудов Ш.А., Муминов Р.А., Рахматов А.З., Сандлер Л.С., Саттиев А.Р., Сулаймонов А.А., Турсунов Н.А. Особенности влияния радиационных дефектов на фотопроводимость кремния, облученного быстрыми нейтронами // Международный журнал Гелиотехника. – Ташкент: Физико-технический институт, 2010. - № 4. - С.64-66. (01.00.00. №1)

4. Махмудов Ш.А., Махкамов Ш., Каримов М., Сулаймонов А.А., Рафиков А.К., Эргашев Х.А. Исследование времени жизни носителей заряда в нейтронно-легированном кремнии в зависимости от концентрации исходного бора // Научно-технический журнал Ферганского политехнического института, спец выпуск. – Фергана, 2014. - С. 135-137. (05.00.00. № 20)

5. Ташметов М.Ю., Махмудов Ш.А., Сулаймонов А.А., Рафиков А.К. Фотодатчики на основе нейтронного легированного кремния // Международный журнал Гелиотехника. - Ташкент: Физико-технический институт, 2018. - № 6. - С.61-63. (01.00.00. №1)

II бўлим (II часть; part II)

6. Махмудов Ш.А., Махкамов Ш., Каримов М., Сулаймонов А.А., Рафиков А.К., Эргашев Х.А. Исследование времени жизни носителей заряда в нейтронно-легированном кремнии в зависимости от концентрации исходного бора // Труды 3-ей Международной конференции по оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро-и наноструктурах, 14-15 ноября 2014. - Фергана, 2014. - С. 262-264.

7. Махкамов Ш., Махмудов Ш.А., Бегматов К.А., Рафиков А.К., Сулаймонов А.А., Эргашев Х. Влияние концентрации бора на время жизни носителей заряда в нейтронно-легированном кремнии // Сборник докладов Международной конференции «Современные материалы и технологии», 21-23 октября 2015. – Тбилиси (Грузия), 2015. - С.-90-92.

8. Каримов М., Махкамов Ш., Махмудов Ш.А., Муминов Р.А, Рахматов А.З., Сандлер Л.С., Саттиев А.Р., Сулаймонов А.А., Турсунов Н.А. Фоторезистор на основе компенсированного кремния с радиационными дефектами // «Фундаментальные и прикладные вопросы физики»: Материалы конференции, посвященной 80-летию академика М.С. Саидова, 24-25 ноября 2010. – Ташкент: НПО «Физика-Солнце» АН РУз, 2010. –С. 207-208.

9. Makhkamov Sh., Tahsmetov M.Yu., Makhmudov Sh.A., Sulaimonov A.A., Rafikov A.K. Thermal resistor based on the compensated silicon // The International Symposium “New Tendencies of Developing Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievement, Prospectives”, November 10-11, 2016. – Tashkent, 2016. - P.-383.

10. Makhkamov Sh., Tahsmetov M. Yu., Makhmudov Sh.A., Sulaimanov A.A., Rafikov A.K. Influence of disordered fields of compensated silicon on formation of radiation of defects at gamma – irradiation. // The International Symposium “New Tendencies of Developing Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievement, Prospectives”, November 10-11, 2016. - Tashkent, 2016. - P.384.

11. Ташметов М.Ю., Махкамов Ш., Махмудов Ш.А., Сулаймонов А.А., Рафиков А.К. Термо- и фотодатчики на основе нейтронно-компенсированного кремния // International Scientific Forum “Nuclear science and technologies” dedicated to the 60th anniversary of the Institute of Nuclear Physics. “Nucleus-2017” September 12-15, 2017. - Almaty, Republic of Kazakhstan, 2017. - P.221.

12. Махмудов Ш.А., Сулаймонов А.А., Маматкаримов О.О., Хайитов Д. Влияние термического воздействия на электрофизические свойства нейтронно-легированного кремния *p*-типа // Неравновесные процессы в полупроводниках и в полупроводниковых структурах»: Материалы II Международной конференции, 12-14 ноября 2009. - Ташкент, 2009. - С. 70-72.

13. Каримов М., Махкамов Ш., Турсунов Н.А., Махмудов Ш.А., Сулаймонов А.А. Термодатчики на основе кремния компенсированного радиационными дефектами // Неравновесные процессы в полупроводниках и в полупроводниковых структурах: Материалы II Международной конференции, 12-14 ноября 2009. - Ташкент, 2009. - С. 125-126.

14. Каримов М., Махкамов Ш., Турсунов Н.А., Махмудов Ш.А., Рафиков А.К., Сулайманов А.А. Способ изготовления кремниевых терморезисторов на основе радиационной технологии //Материалы республиканской научно-практической конференции “Инновации и инновационные технологии на производстве и высшем образовании”. 2- том. – Андижан, 2013. -С. 171-174.

15. Ташметов М.Ю., Сулаймонов А.А., Махмудов Ш.А., Рафиков А.К. Высокоомный температурно чувствительный резистор на основе нейтронно легированного кремния // Седьмая Международная конференция по физической электронике ИРЕС-7: Тезисы докладов, 18-19 мая 2018. – Ташкент, 2018. - С-162.

16. Ташметов М.Ю., Сулаймонов А.А., Махмудов Ш.А., Рафиков А.К. Фотодатчики на основе нейтронного легированного кремния // Фундаментальные и прикладные вопросы физики»: Материалы конференции, 25-26 сентября 2018.- Ташкент: НПО «Физика-солнце» АН РУз, 2018. - С. 93-95.

Илмий раҳбар

М.Ю.Ташметов

Талабгор

А.А.Сулаймонов