

**ЎЗР ФА ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ
ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.02/27.02.2020.FM/T.110.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ

РАДЖАПОВ БЕКЖАН САЛИЕВИЧ

**ИОНЛАШТИРУВЧИ НУРЛАНИШЛАРНИ ҚАЙД ЭТУВЧИ ЎТА
СЕЗУВЧАН КАТТА ЮЗАЛИ КРЕМНИЙ ДЕТЕКТОРЛАРИНИ
ИШЛАБ ЧИҚИШ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2024

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

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

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

Раджапов Бекжан Салиевич

Ионлаштирувчи нурланишларни қайд этувчи ўта сезувчан катта
юзали кремний детекторларини ишлаб чиқиш 3

Раджапов Бекжан Салиевич

Разработка кремниевых детекторов больших размеров,
регистрирующих ионизирующие излучения с высокой
чувствительностью..... 21

Radzhapov Bekjan Saliyevich

Development of large area silicon detectors that detect ionizing radiation
with high sensitivity 39

Эълон қилинган илмий ишлар рўйхати

Список опубликованных научных работ

List of published research works 43

**ЎЗР ФА ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ
ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.02/27.02.2020.FM/T.110.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ

РАДЖАПОВ БЕКЖАН САЛИЕВИЧ

**ИОНЛАШТИРУВЧИ НУРЛАНИШЛАРНИ ҚАЙД ЭТУВЧИ ЎТА
СЕЗУВЧАН КАТТА ЮЗАЛИ КРЕМНИЙ ДЕТЕКТОРЛАРИНИ
ИШЛАБ ЧИҚИШ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2024

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2020.2.PhD/Т1503 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация ЎЗР ФА Физика-техника институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида (www.fti.uz) ва «ZiyoNet» Ахборот-таълим порталида (www.ziyounet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Муминов Рамизулла Абдуллаевич
физика-математика фанлари доктори,
профессор ЎЗР ФА академиги

Расмий оппонентлар:

Ёдгорова Дилбара Мустафаевна
техника фанлари доктори, профессор

Рахматов Ахмаджон Зайнидинович
техника фанлари доктори, профессор

Етакчи ташкилот:

ЎЗР ФА Ядро физикаси институти

Диссертация ҳимояси Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Физика-техника институти ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.02/27.02.2020.FM/Т.110.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2024 йил «_____» _____ соат _____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100084, Ўзбекистон, Ташкент ш., Чингиз Айтматов кўчаси, 2Б-уй, Тел.: (+99871) 235-93-61, факс: (+99871)235-42-91, e-mail: ftikans@uzsci.net)

Диссертация билан Ахборот технологияларини жорий этиш бўлимида танишиш мумкин. (_____ рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100084, Ўзбекистон, Тошкент шаҳри, Чингиз Айтматов кўчаси, 2Б-уй. Тел.: (+99871) 235-93-61; e-mail: ftikans@uzsci.net).

Диссертация автореферати 2024 йил «_____» _____ куни тарқатилди.

(2024 йил «_____» _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси).

Х.К. Олимов

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

Ж.С. Ахатов

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш
илмий котиби, т.ф.д., к.и.х.

М.Н. Турсунов

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш
қошидаги илмий семинар раиси, т-ф.д.,
катта илмий ходим

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссиртациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда замонавий фан ва техниканинг кўпгина муаммоларини ҳал қилиш, биринчи навбатда экспериментал ядро физикаси ионлаштирувчи нурланишни қайд этиш учун янги асбоблар яратиш ва мавжудларини такомиллаштириш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади. Хусусан, яримўтказгичли детектор муҳандислиги соҳасидаги устувор ишланмалар ҳозирги вақтда замонавий физика фундаментал ва амалий тадқиқотларнинг турли соҳаларида аниқ муаммоларни ҳал қилиш учун кенг фойдаланилмоқда.

Дунёда бугунги кунда яримўтказгичли детекторлар ядровий тадқиқодларда ва атроф-муҳитни экологик мониторинг ўтказишда кенг фойдаланилмоқда. Асосий яримўтказгичли детекторлар кремний асосида ишлаб чиқилган. Радиацияни ўлчайдиган бошқа турдаги детекторлар яримўтказгичли детекторлар (ЯЎД) билан рақобатлаша олмайди. Бу жуда кўп муҳим параметрлар: юқори энергия ва вақт ўлчамлари, кичик ўлчамлилиги, ишлаб чиқаришнинг нисбатан қулайлиги, ташқи таъсирларга қаршилиги, паст кучланишли электр таъминотига эга эканлиги билан боғлиқ. Табиий нурланиш таъсирини мониторинг қилиш учун махсус қурилмаларни яратиш нафақат радиоактив изотоплар билан ишлашни, балки паст интенсивликдаги (кичик энергия) радиоактив нурланишнинг одамларга таъсирини ўрганишни ҳам талаб қилади. Радиациянинг катта дозалари инсон ҳаёти учун хавфли эканлиги ва кам энергияли ионлаштирувчи нурланишнинг таъсири мутлақо зарарсиз эмаслиги аниқланди. Радон инсон саломатлиги учун хавфли радиациянинг табиий манбаи ҳисобланади. Инсонга радоннинг таъсири барча радиация манбаларидан олинган нурланиш дозасининг ярмидан кўпини ташкил қилади. Радиация хавфсизлиги стандартига (РХС) кўра, турар-жой бинолари ҳавосидаги радоннинг ҳажмий фаоллиги 80 Бк/м^3 дан ошмаслиги керак.

Республикамызда ушбу соҳада, амалий тадқиқотларга, фанни ривожлантириш учун устувор йўналишларига, илмий-тадқиқотлар натижаларини жорий қилишга катта эътибор берилмоқда. 2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегиясида белгилаб берилган вазифаларни амалга оширишда, жумладан илмий-инновацион ишланмаларни амалиётда қўллашнинг самарали механизмларини яратиш, айниқса импорт ўрнини босувчи, рақобатбордош яримўтказгичли асбобларни ишлаб чиқиш масалаларига алоҳида эътибор берилмоқда. Юқоридагиларни ҳисобга олган ҳолда, аҳолининг радиациявий хавфсизлигини таъминлаш, мониторинг қилиш учун қурилмаларининг асосий қисми бўлган кремний асосидаги детекторларини ишлаб чиқиш ва бу йўналишда олиб бориладиган тадқиқотлар долзарб вазифа ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январдаги ПФ-60-сон «2022-2026 йилларда Янги Ўзбекистонни ривожлантириш стратегияси тўғрисида»ги фармони, Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2018 йил 27 апрелдаги ПҚ-3682-сон «Инноватцион ғоялар, технологиялар ва

лойиҳаларни амалаётга татбиқ этиш тизимини янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида», 2018 йил 14 июлдаги ПҚ-3855-сонли «Илмий ва илмий-техникавий фаолият натижаларни тижоратлаштириш самарадорлигини ошириш бўйича қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида»ги, Ўзбекистон Республикаси Президент Қарори 2022 йил 14 июлдаги №319. «2022-2030 йилларда «Новоиуран» давлат корхонасида урanni қазиб олиш ва қайта ишлаш ҳажмларини ошириш ҳамда уни трансформация қилиш чора-тадбирлари тўғрисида»ги, Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамасининг Қарори 2021 йил 3 йюлдаги № 343 «Атроф муҳитнинг ифлосланиш даражасини баҳолаш тизимини янада такомиллаштириш тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли барча меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белигиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

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

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Кўпгина мамлакатлар олимлари (Ю.С.Акимов, Дж. Дирнли, Д. Нортроп, В.В. Авдейчиков ва бошқалар) физиканинг турли соҳаларида яримўтказгичли детекторларни тадқиқ этиш ва ривожлантириш билан шуғулланмоқдалар. Уларнинг тадқиқотлар натижалари яримўтказгичли детекторларни яратиш учун асос бўлиб хизмат қилади. Академик Акимов Ю.К. ва Игнatieв О.В.-лар ўзларининг ишларида ҳар хил турдаги яримўтказгичли детекторларни ишлаб чиқариш технологиясини, шу жумладан, n-типли кремний асосидаги солиштирма қаршилиги 3-5 кОм·см, қалинлиги 150 мкм ва сезгир майдони 30 см² бўлган юза-барьерли детекторлари технологиясини ишлаб чиққан. Авдейчиков В.В. Дубнадаги Кўшма ядровий тадқиқотлар институтида кўп йиллар давомида қалинлиги <50 мкм бўлган «юпка» яримўтказгичли детекторларни тайёрлаш ва ишлаб чиқариш билан шуғулланган.

ЎзР ФА Физика-техника институтида юқори сезгирликли яримўтказгичли датчиклар лабораториясида ўзбек олимлари (Мўминов Р. А., Раджапов С. А. ва бошқалар.) 40 йилдан ортиқ вақт давомида ҳар хил турдаги, кремний асосидаги юза-барьерли, гетероструктурали ва литий-дрейфли катта юзали детекторларни ишлаб чиқиш устида ишламоқда. Улар катта ўлчамли детекторларни ишлаб чиқариш жараёнини технологик маршрутини ишлаб чиқдилар.

Яримўтказгичли детекторларнинг кўплаб ишланмаларига қарамай, 110 мм диаметрли ва 0,1-0,2 мм қалинликдаги (юпка) катта сезгир юзага эга детекторлар жаҳон амалиётида маълум эмас.

Катта юзали детекторларнинг яратилиши геология-қидирув ишларида, атроф-муҳитни назорат қилиш ва атроф-муҳитни муҳофаза қилиш,

металлургияда, паст фаолликдаги нурланишни аниқлаш учун зарур бўлган ихчам курилмаларни ишлаб чиқариш имконини беради.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти ЎзР ФА Физика-техника институти илмий тадқиқот ишлари режасига биноан № ФА-АЗ-Ф025 «Рентгенофлуоресцентли анализаторлар учун термоэлектрик совутилган кремний p-i-n детектор тизимларини тайёрлаш ва ишлаб чиқариш» (2015-2017 йи.); № МП-ЁА-ФА-Ф004 «Катта диаметрли монокристалли кремний асосида икки координатали сезгир детекторни шакллантириш ва тайёрлаш технологиясини ишлаб чиқариш» (2016-2017 йи.); № ФА-А_{тех}-2018-233 «Радоннинг ҳажмий фаоллигини ва ўрганилаётган муҳитдаги радиий миқдорини ўлчаш учун катта юзали кремний юза барьерли детекторлари асосида радиометрни яратиш ва ишлаб чиқариш» (2018-2020 йи.) лойиҳалар доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади юқори сезгирликдаги катта диаметрли кремний детекторларини ишлаб чиқиш ҳамда улар асосида республика ҳудудидаги турли муҳитларда радоннинг ҳажмий фаоллигини ўлчайдиган ва альфа зарраларини қайд этиш учун ўлчов комплекси бўлган радонометрни ишлаб чиқаришдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

ионлаштирувчи нурланиш детекторларини ишлаб чиқариш учун катта диаметрли ва қалинликдаги ($\varnothing=40-110$ мм, $W\leq 0,3$ мм) кремний пластинкаларининг физик хоссаларини ўрганиш;

юқори электрофизик ва радиометрик хусусиятларга эга бўлган катта ўлчамдаги юқори сезгир яримўтказгичли детекторларни ишлаб чиқаришнинг технологик режимларини аниқлаш;

радонометр курилмасининг конструкциясини, электрон қисмларини ва курилмадан маълумотларни олиш ва қайта ишлашга дастурий таъминотни ишлаб чиқиш;

ҳаводаги, сувдаги ва тўпроқ ҳавосидаги радоннинг альфа нурланишини ўлчаш учун тажрибавий лаборатория радонометрларини ишлаб чиқиш ва республиканинг ўрганилаётган ҳудудларида тўпроқ ҳавосидаги радоннинг ҳажмий фаоллигини ўлчаш.

Тадқиқотнинг объекти юза-барьерли, гетероструктурали $\alpha\text{Ge-pSi}$ ва $\alpha\text{Si-p-i-n}$ кремний-литийли катта юзали ва қалинлиги 300 мкм дан кам бўлган кремний детекторлари олинган.

Тадқиқот предмети детекторларда юза-барьерли, гетероўтишли $\alpha\text{Ge-pSi}$ ва $\alpha\text{Si-p-i-n}$ структураларнинг шакилланиш механизмлари ва уларнинг электрофизик ва радиометрик хусусиятларини ўрганишдан иборат.

Тадқиқот усуллари. Тадқиқотда детекторларнинг характеристикаларини тадқиқ қилишнинг вольтампер, вольтфарад, вольтшовқин, спектрометрик ва радиометрик усуллар қўлланилди, шунингдек замонавий назарий тушунчалар асосида экспериментал маълумотлар таҳлил қилинди.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

диаметри ($\varnothing=40\div 110$ мм) бўлган кремний пластиналарни қайта ишлашнинг кимёвий усуллари ишлаб чиқилган бўлиб, пластиналарнинг $\pm 0,4\div 0,6\%$ аниқликда текис-параллеллик даражасига эришилган;

«кириш» ва «чиқиш» юзаларида кичик энергия йўқотишлари туфайли зарядланган зарраларнинг паст интенсивликдаги кичик энергия оқимини қайд этиш имконини берувчи детекторларнинг «кириш» ва «чиқиш» юзалари «ўлик» қатламининг минимал қалинлигини тامينлайдиган алюминий ва олтинни пуркилаш технологик режимлари ишлаб чиқилган;

ўрганилган ва ишлаб чиқилган илмий-техникавий ва технологик хусусиятлар асосида уч турдаги кремний асосидаги сезгир катта юзали ва қалинлиги (100-120мкм) бўлган; юза-барьерли, Al- α Ge—pSi-Au гетероструктурали ва кремний-литийли Al- α Si—p-i-n-Au ионлаштирувчи нурланиш детекторлари ишлаб чиқилган;

илк маротаба ҳаво, сув ва тупроқдаги радоннинг ҳажмий фаоллигини ўлчаш ва энергияси (3,5-8 МэВ) бўлган альфа зарраларини рўйхатга олиш учун ишлаб чиқилган сезгир катта юзали, яримўтказгичли детектор асосида, керакли электрон компонентлар ва натижаларни йиғиш, қайта ишлаш учун компьютер дастури билан жиҳозланган миллий қурилма (радонометр) ишлаб чиқилган;

илк маротаба республика ҳудудида тупроқ ҳавосидаги радоннинг ҳажмий фаоллигини ўлчаш, ишлаб чиқарилган миллий радонометр ёрдамида амалга оширилди, радоннинг ҳажмий фаоллигининг ошиши тектоник жараёнларнинг фаоллашуви даврида ўрганилаётган ҳудудда ер қобиғининг деформация жараёнлари билан боғлиқлиги кўрсатилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

катта юзага эга бўлган кремний пластиналарнинг юқори текислик-параллеллигини таъминлаш учун механик ва кимёвий ишлов беришнинг янги усуллари ишлаб чиқилган;

радонометр учун уч турдаги кремний асосидаги катта юзали ва қалинлиги (100-120мкм) бўлган: юза-барьерли, Al- α Ge—pSi-Au гетероструктурали ва кремний-литийли Al- α Si—p-i-n-Au ионлаштирувчи нурланиш детекторлари ишлаб чиқилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги ўлчаш аниқлиги юқори бўлган асбоблардан фойдаланилиб, синалган ўлчаш методлари қўлланилганлиги билан тасдиқланади. Диссертацияда келтирилган илмий хулосала, тавсиялар ва натижалар мазкур соҳада маълум бўлган натижаларни инкор этмайди балки тўлдиради ва кенгайтиради. Илмий натижаларнинг ишончлилиги сертификатланган хорижий қурилма тажриба маълумотлари билан солиштириганда мос келиши билан асосланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти:

Натижаларнинг илмий аҳамияти ташқи электр майдон кучланишларининг кенг диапазонида юқори электр ва радиометрик характеристикасига эга детекторлар ишлаб чиқариш учун юза барьерли, α Ge-pSi ва α Si-p-i-n структураларини шакллантириш жараёнларини ўрганишдан иборат бўлиб, бу

2л – геометрияда паст интенсивликдаги зарядланган зарраларни ўлчаши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундан иборатки, ишлаб чиқилган барча турдаги детекторлар ташқи бозорда рақобатбардош бўла олишлиги, катта сезгир юзага эга детекторлар асосида ишлаб чиқилган радонометр паст интенсивликдаги зарядланган зарраларни, турар-жой, саноат бинолари, уран разведка ишлари ва бошқа геологик қидирувда радоннинг ҳажмий фаоллиги (ҲА)ни ўлчаш учун ишлатилиши мумкинлиги, ҳамда, конлар, атроф-муҳитни муҳофаза қилиш мониторинги, металлургияда, табиий ва сунъий сув ҳавзаларидан сув намуналари, қисқа муддатли зилзилаларни баҳолашдаги ўлчашларни амалга ошириш мумкинлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Юқори сезгирликли ионлаштирувчи нурланишни қайд этувчи катта юзали кремний детекторларини тадқиқ қилиш натижасида, радонометрни тайёрлаш ва ишлаб чиқаришда:

«Ҳаво, сув ва тупроқдаги радоннинг ҳажмий фаоллигини ўлчаш учун қурилма» (FAP 02142, 2022й) Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлигининг фойдали моделига патент олинган. Қурилмада ишлатиладиган детектор «ўлик қатлам»ининг минимал қалинлигига эга бўлиб, бу қурилманинг сезгирлигини оширади ва зарядланган заррачаларнинг паст интенсивликдаги кичик энергия оқимини қайд этиш ва қурилманинг конструкцияси реал вақтда 2л -геометрияда ўлчовларни амалга ошириш имконини берган;

«Ҳаво, сув ва тупроқдаги радоннинг ҳажмий фаоллигини ўлчаш учун зарядланган заррачаларнинг яримўтказгичли детекторлари асосида радиометрларни яратиш ва ишлаб чиқариш» хўжалик шартномаси бажарилган (Навоий кон-металлургия комбинати (НКМК) билан 01.04.2019 йилдаги 01-05-02/1-сон). Илк бор ишлаб чиқилган катта юзали детекторлар асосида сертификатланган миллий радонометр (сертификат №001, «Ўзстандарт») ёрдамида НКМК худудида ходимларнинг хавфсизлигини таъминлаш бўйича илмий ва экологик вазифаларни бажариш имконини берган;

«Радиометрларни яратиш ва ишлаб чиқариш: ҳаво, сув ва тупроқдаги радоннинг ҳажмий фаоллигини ўлчаш учун радонометр, материалларда альфа нурланишининг паст фаоллигини ўлчаш учун алфаметр, материаллардаги гамма нурланишининг паст фаоллигини ўлчаш учун гаммаметр» хўжалик шартномаси бажарилган (Олмалиқ кон-металлургия комбинати (ОКМК) билан 2021-йил 13-апрелдаги ЮР №63-2144-сон). Диаметри $\varnothing=110$ мм ва қалинлиги 100-120 мкм бўлган юқори сезгирликли детекторлар асосида радонометрлар ишлаб чиқилди: икки комплект «Радонометр» ва бир комплект «Гаммаметр». Ишлаб чиқилган радонометрлар томонидан радоннинг ҳажмий фаоллигини ўлчаш натижалари хорижий сертификатланган радиометрда ўлчанган натижаларга мослиги аниқланган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқотнинг асосий натижалари 14 та халқаро ва 2 та республика илмий-амалий анжуманларда муҳоқдан ўтказилган.

Тадқиқод натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича 25 та илмий мақола, шу жумладан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссияси томонидан докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий журналларда 9 та мақола, шу жумладан 3 та хорижий (scopus) журналларида нашр этилган, 1 та фойдали модель учун патент ва 2 та дастурий маҳсулот учун сертификат олинган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация иши, жами 121 саҳифалардан иборат бўлиб, таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати, 40 та расм, 5 та жадвал ва 3 та иловани ўз ичига олган.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида мавзунинг долзарблиги ва зарурати ифодаланган, мақсад ва вазифалар шакллантирилган, тадқиқот объекти аниқланган, предмети ва тадқиқот усуллари, тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялари ривожланишининг устивор йуналишларига мовофиқлиги аниқланган, тадқиқотнинг илмий янгилиги олинган, натижаларнинг ишончлилиги асосланган, илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган, ишнинг муҳокамаси ва натижаларнинг қўлланилганлиги ҳақида қисқача маълумот, ҳамда диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

«Катта юзали ядровий нурланиш детекторларини тайёрлаш имкониятларини ўрганиш» номли диссертация ишининг биринчи бобида яримўтказгичли детекторларнинг асосий параметрлари келтирилган ва унга кремний дастлабки параметрларининг таъсири ўрганилган. ЯЎД нинг асосий параметрлари қуйидагилар: қоронғилик токи, электр сифими, шовқиннинг энергия эквиваленти, рухсат этилган энергия, «ўлик қатлам» (ЎК) қалинлигининг энергия эквивалентидир. Паст интенсивликдаги ионлаштирувчи нурланишни рўйхатга олиш учун детектор минимал шовқин даражасига эга бўлиши керак. Минимал шовқин даражасига эга бўлган детекторларни олиш учун маҳаллий бир жинслимаслик ўлчами минимал ва солиштирма қаршилиги $\rho=3\div 8$ кОм·см бўлган дастлабки Si ни танлаш керак, бу эса сифим компонентига минимал ҳисса қўшишни таъминлайди. Бу эса таркибининг бир жинслигидан келиб чиқади.

Ушбу бобда детекторлар ишлаб чиқариш учун катта диаметрли ва қалинликдаги ($\varnothing=40-110$ мм, $W\leq 0,3$ мм) кремний пластиналарининг физик хоссаларини ўрганиш ва ҳудудларнинг радон хавфини тез баҳолаш учун қурилма сифатида фойдаланиш бўйича адабиёт маълумотлари кўриб чиқилган. Мавжуд назарий ва амалий маълумотларнинг таҳлили асосида тадқиқот вазифалари шакллантирилган.

«Катта юзали яримўтказгичли детекторларни олишнинг технологик жараёнларини ишлаб чиқиш» номли иккинчи бобда катта юзали ярим ўтказгичли детекторларни ишлаб чиқишга бағишланган. Катта юзали детекторларни олишнинг технологик жараёнлари, механик ва кимёвий ишлов

бериш, контактларни пуркаш ўрганилди. Пластинка юзалари текис параллеллигининг юқори даражасини таъминлаш учун механик ва кимёвий ишлов беришда бир қатор техник муаммоларни ҳал қилиш керак. Қуйма кесилганидан кейин, олинган кремний пластинкаси орасида механик шикастланган қатлам мавжудлиги, текис-параллеллиги бўлмаган, егилиш ва қалинликнинг катта ўзгариши каби бир қатор бузилишларга эга камчилликлар учрайди. Шунинг учун, кесиш жараёнидан сўнг, силлиқлаш мажбурий технологик жараён ҳисобланади.

Кимёвий ишлов беришда уларнинг катта майдонининг бутун юзаси учун бир вақтнинг ўзида бир хил силиқлаш тезлигини таъминлаш керак. Бундай шароитларни таъминлаш учун биз кимёвий моддаларнинг маҳсус аралашмасини ишлаб чиқдик, шунингдек кимёвий силиқлашнинг динамик жараёни ишлаб чиқилди. Бу жараённинг моҳияти шундан иборатки, кремний кристалларининг пластинкалари маълум бурчак остида (40°) бўлиб, 60 айл/мин тезликда айланади. Кимёвий ишлов бериш жараёнининг режимлари кремний кристалларининг дастлабки пластинкаларининг диаметрига мувофиқ танланган.

Сўнги ўн йилликда вакуумли пуркаш йули билан юпқа плёнкаларни(контакт) олиш асосий усулига айланди. Контакт олишнинг энг оддий ва яхши ўзлаштирилган усули юқори вакуумли термал буғланишдир. Ушбу усул пуркаш содир бўладиган шароитларни мослашувчан ва тез ўзгартиришга, пуркалган материалларни ўзгартиришга ва ҳоказоларга имкон беради. Тайёр Si пластинкасига контактларни пуркаш технологияси ВУП-4 вакуумли универсал пост қурилмасида амалга оширилади.

Ушбу бобда сезгир катта юзага эга бўлган уч турдаги; юзабарьерли, кремний-литий α -Si-p-i-n ва гетероструктурага – α Ge-pSi асосланган детекторларнинг тайёрлаш ва ишлаб чиқариш усуллари келтирилган. Ишлаб чиқилган детекторларнинг электрофизик ва радиометрик характеристикалари ўрганилган.

Альфа нурланишини қайд қилиш учун катта диаметрли юзабарьерли детекторларидан (ЮБД) фойдаланиш ҳавода, тупроқда, сувда радоннинг ҳажмий фаоллигини (ХФ), шунингдек ўрганилаётган муҳитда табиий уран, радий таркибини тўғридан-тўғри ўлчаш учун самарали воситадир. p-n структураларига асосланган кремний юзабарьерли детекторлари ҳозирги вақтда турли зарралар ва нурланишни ўрганиш учун асосий қурилмалардан бири ҳисобланади. Уларнинг афзалликлари электрон тешик жуфтлигини ҳосил бўлишига сарфланган кам энергиядир, бу кремнийда тахминан 3,6 эВ, юқори тормозланиш қобилияти, бу детекторни ихчам қилади, статистик маълумотларни йиғишнинг юқори тезлиги, кремний детекторларини ишлаб чиқариш учун етарлича технология мавжудлиги.

Катта сезгир иш юзасига (60см^2) эга диаметри (110 мм) кремнийдан тайёрланган ЮБДлар ўзига хос хусусиятларга эга. Бу юза ва киришмаларнинг бир жинсли эмаслиги, киришмалар тўпланган жойларда дипол тузилмаларининг шаклланиши, шунингдек катта ўлчамдаги кремний

параметрларининг бир хил бўлмаган тақсимланиши билан боғлиқ. Хусусан, юзабарьерли детекторлари учун юқори ҳароратли ишлов берилмайди, юқори ҳарорат бошланғич материалдаги заряд ташувчиларнинг яшаш вақтин қисқартиради. ЮБДларни тайёрлашда n -Si юзасига кимёвий ишлов беришдан сўнг, 5×10^{-5} мм.сим.уст. босимда термал буғланиш усули билан $Al(300\text{\AA})$ қалинликдаги контакт олинади. Икки кун давомида тоза ҳавода тургандан сўнг тескари томонига қалинлиги $Au(\sim 200\text{\AA})$ пуркиланади ва корпусларга жойлаштирилди.

Сезгир соҳаси кенгайтирилган ($W \leq 0,3$ мм) детекторларни олиш учун дастлаб, p -типли кремнийни литий ионлари билан компенсация қилиш усули қўлланилади. Ишлаб чиқарилган детекторларнинг характеристикалари асосан бошланғич материалнинг сифати, хусусан ундаги ҳар хил турдаги структуравий ва киришманинг камчиликлари мавжудлиги ва кристаллнинг ҳажмида тақсимланиши билан белгиланади. Бироқ яримўтказгичли спектрометрик детекторлар учун барча талабларга жавоб берадиган серияли монокристалл кремний ҳозиргача йўқ. Соф монокристалларни ўстириш технологиясининг сўнгги ютуқлари кристалл бўйлаб бир хил тақсимланган (тарқалиши 10% дан кам) дислокациясиз, паст миқдордаги киришма кремний куймаларини олиш имконини беради. p - n ўтишни ҳосил қилиш учун диаметри 80 мм ва қалинлиги 0,6 мм бўлган p -кремнийга 450 °C ҳароратда литий 50 мкм чуқурликкача диффузия қилинди.

Литий ионларининг импульсли текслаш дрейфи 80 - 90 °C ҳароратда, 50 - 60 В кучланишда, кейин 60 °C ҳароратда ва 40 В кучланишда махсус ишлаб чиқилган қурилмада амалга оширилди.

Литий ионларини дрейф қилиш қурилмасининг конструкцияси узида кристаллар жойлаштирилган термостатни намоён этади. Дрейф вақтини қисқартириш ва детекторларнинг хусусиятларини яхшилаш учун дрейф иккала томондан $T = 60 \div 100$ °C ва $50 \div 200$ В тескари кучланишда амалга оширилади. Дрейфнинг тугаш вақтида тескари токнинг кескин ошиши қайд этилади. Дрейф тугагандан сўнг, i -соҳани очиш учун n^+ - i - p структуранинг n^+ -қатламини кристаллнинг бир томони кремний карбид микропорошоги билан шиша дискда сайқалланади. Олиб ташланадиган қатламнинг қалинлиги диффузия профилининг хиралашишини ҳисобга олган ҳолда аниқланади. Сайқалланган қатламининг қалинлиги одатда $50 \div 400$ мкм ни ташкил қилади. n^+ -соҳани олиб ташлаш $HNO_3:HF=1:1000$ кимёвий ишлов амалга оширилади. Агар унинг контурлари диффузия худудининг диаметрига тенг диаметрли доирага яқин бўлса, i -соҳа тўлиқ очилган ҳисобланади. Ток тешилишларини камайтириш учун юза ўтишларни ва олд қисмининг структурасига кимёвий ишлов берилади. n^+ соҳани ёпишқоқ лента билан ҳимояланади. Бундай кимёвий ишлов бериш одатда ижобий натижа бермайди. Юзада Cu , Ag , Au киришмали зарралари билан қопланган, бир неча макроскопик қатламлар бўлиши мумкин, бу эса юза қатламининг заряд ташувчилар билан бойишига олиб келади. Бундай ҳолда, яхши комплекслаштирувчи восита бўлган ва юзада тўпланиб қоладиган адсорбсияга мойил бўлган атом аралашмаларини самарали равишда йўқ

қиладиган анилин билан кимёвий ишлов бериш амалга оширилади. Пластинка 2 кун давомида ҳавода ушлаб турилгандан кейин, вакуумда буғланиш орқали структуранинг олд томонига қалинлиги 200Å бўлган олтин қатлами пуркалади. $n^+ - i$ бирикмасининг юзаси яхши пассивлаштирувчи хусусиятларга эга ЭКЛБ-10Б эпоксид бирикмаси билан ҳимояланади. Детекторнинг корпуси иккита ковар ҳалқасидан иборат бўлиб, улар орасида яхши ёпиштирувчи хусусиятларга эга бўлган ЭКЛБ-10Б эпоксид смоласи ёрдамида детектор маҳкамланади. Орқа юзасига n^+ ҳудудига алюминий пуркаш орқали қалинлиги 300Å бўлган контакт ҳосил қилинади.

ЯЎДларнинг хусусиятларини яхшилаш ва янги турларини яратишга қаратилган йўналишлардан бири бу гетероструктуралардир. Гетероструктура – контакт чегарасидаги потенциал тўсиқ хар хил тақиқланган соҳага эга бўлган, панжара доймиси ва кристалл тузилиши бир хил бўлган икки хил яримўтказгичдир. Ушбу талабларга жавоб берадиган энг кўп ишлатиладиган материаллар Ge ва Si ҳисобланади. вакуумли пуркаш орқали p-Si юзасида гетероструктура олиш учун 5×10^{-5} мм.сим.уст. босимда аморф α Ge(300Å) қатлами ва Al(300Å) асосида контактлар олинган. Контакт учун олди томонига қалинлиги Au(~200Å) қатлам пуркалди. Кейин, тайёр детектор корпусларга жойлаштирилди.

Ишлаб чиқарилган детекторларнинг электрофизик ва радиометрик кўрсаткичлари қуйидагича: $U_{иш} = (15 \div 100)$ В, $I_{тес} = (0,5 - 1)$ мкА, $C = (1000 \div 2500)$ пФ, $E_{иш} = (48 \div 75)$ кэВ. Мос равишда ^{226}Ra , $R_{\alpha} = (85 \div 100)$ кэВ ($E_{\alpha} = 7,65$ МэВ) энергия ўлчамлари, кириш ва чиқиш юзадаги йўқотилишлар $\Delta E_{вх} = (10 \pm 5)$ кэВ, чиқишда $\Delta E_{вых} = (20 \pm 5)$ кэВ. Тадқиқотлар шуни кўрсатдики, энергия ўлчамлар шакли ва спектри детекторларнинг кириш ва чиқиш юзалари томондан сезиларли даражада фарқ қилмайди.

«Катта юзали кремний детекторлари асосида альфа нурланиш радиометрларини ишлаб чиқиш ва турли соҳаларда радон ҳажмий фаоллигини ўрганиш» номли учинчи бобда турли муҳитларда радон ҳажмий фаоллигини ўлчаш учун юқори сезгирликдаги катта юзали детекторларни ишлаб чиқишнинг физик ва технологик босқичлари кўрсатилган.

Радиометрнинг асосий элементи детектордир. Паст интенсивликли зарядланган зарраларни ўлчаш учун катта сезгир юза майдонли, сезгир қатламнинг қалинлигига, «кириш» ва «чиқиш» юзаси «ўлик» қатлами қалинлиги юпқа бўлган, ташқи кучланишларнинг кенг диапазонида юқори электрофизик, радиометрик характеристикалар эга детектор керак бўлади. Al- α Si-p-i-n-Au структура асосидаги детекторли радиометр ишлаб чиқилди. Детекторлар ишлаб чиқаришда p-типли кремний солиштирма қаршилиги $\rho = 5000$ Ом \times см, заряд ташувчиларнинг яшаш вақти $\tau = 700$ мкс, диаметри 80 мм ва қалинлиги 0,6 мм, тигелсиз зонали эритиш (ТЗЭ) усули билан ўстирилган. Ишлаб чиқилган технологиялар асосида пластинка устида литий диффузияси ва дрейфи амалга оширилди.

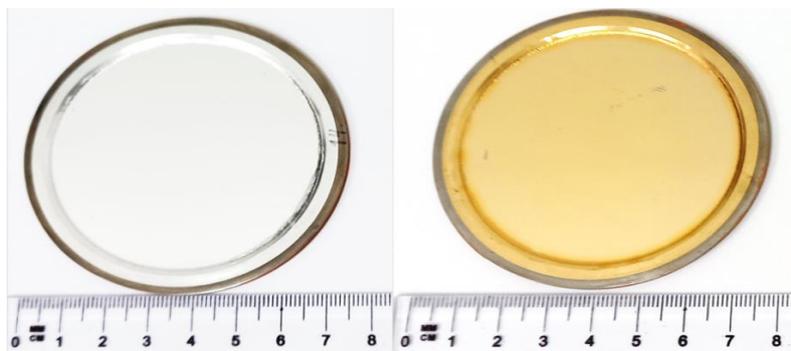
Қалинлиги 100-120 мкм гача бўлган кристаллга тўлиқ компенсацияланган i-соҳа олингандан сўнг, бутун кристал «кириш» ва «чиқиш» юзаларининг

«ўлик» қатламларининг минимал қалинлигини таъминлаш учун, махсус кимёвий ишлов берилди.

Литийнинг диффузия қатлами динамик едириш қурилмасида олиб ташланди. Кремний конструкцияси емирлишдан сўнг гантел шаклига келтирилади, бу пластинани механик мустаҳкамлигини таъминлайди. *i*-соҳага (литий-компенсацияланган кремний) юзасига вакуумда 5×10^{-5} мм.сим.уст. босимда термал буғланиш усули билан аморф кремний қатлами – α -Si ётқизилди, бу ерда ётқизилган α -Si қатламининг қалинлиги ~ 500 Å. Чиқиш юзасига алюминий билан компенсацияланган *p* типдаги кремнийга аморф кремнийни пуркаш яхши омик контактни таъминлайди.

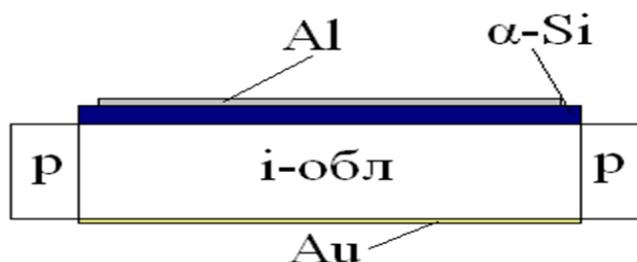
Кейин пластинкалар ковардан ясалган корпусга жойлаштирилди ва вакуумда 5×10^{-5} мм.сим.уст. босимда термал буғланиш орқали «кириш» юзасига Au(~ 200 Å) ва тескари томонидан «чиқиш» юзасига Al(500-1000Å°)-контактлар олинди. Ўлик қатламнинг қалинлиги контактларнинг қалинлиги ва аморф кремний билан аниқланди. Кремний пластинкаларни корпусга жойлаштириш учун яхши ёпиштирувчи хусусиятларга эга бўлган махсус эпоксид аралашмаси ишлатилган.

Юқорида келтирилган усул бўйича ишлаб чиқарилган детекторлар олтин қатлам томондан $\Delta E_{\text{вх}} \sim 6-12$ кэВ ва алюминий қатлам томондан $\Delta E_{\text{вх}} \sim 12-20$ кэВ нисбатан кам энергия йўқотишларига эга бўлиб, бу еса 2π -геометрияда аниқ ўлчовларни таъминлайди. Al- α Si-p-i-n-Au детекторининг ишчи кучланиши 8-10 В ни ташкил қилади. (1-расм)



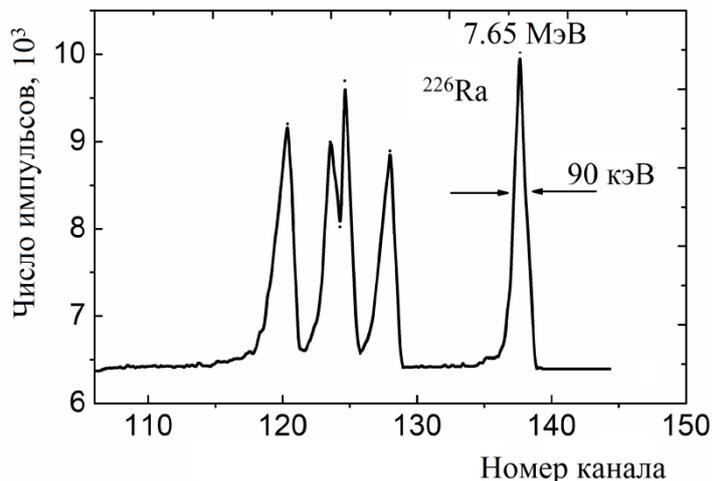
1-расм. Кремний литий детектори Al- α Si-p-i-n-Au олтин ва алюминий контактлар томонидан кўриниши.

Al- α Si-p-i-n-Au детекторининг структураси 2-расмда кўрсатилган



2-расм. Кремний литий детекторининг Al- α Si-p-i-n-Au структураси. *i*-соҳа – литий компенсацияланган *p*-типи кремний, Al контакт – «чиқиш» юзаси, Au контакт – «кириш» юзаси, α Si - аморф кремний, *p* типдаги кремний

Ишлаб чиқарилган детекторларнинг электрофизик ва радиометрик характеристикалари бўйича тадқиқотлар ўтказилди. 50 см² юзага эга бўлган детекторлар энергия ўлчамлари ²²⁶Ra α-заррачалари $E_\alpha \sim 7,65$ МэВ ~ 90 кэВ энергия, $U_{иш} \sim 8-10$ В, иш кучланишида $I_{тес} \sim 0,5-1$ мкА, тескари токка эга, сиғим $C \sim 2400$ пФ, шовқин $E_{ш} \sim 40$ кэВ. Энергия ўлчамлари асосан сиғим шовқини билан аниқланди (3-расм). Ўлчовларда ишлатилган спектрометрик созлашлар ²²⁶Ra α-манбага нисбатан қиёсланган.



3-расм. Al-αSi-p-i-n-Au детекторининг энергетик ўлчамлари $E_\alpha = 7,65$ МэВ бўлган α-заррачалар ²²⁶Ra 100 В кучланишда

ЎЗР ФА Физика-техника институти юқори сезгирликли яримўтказгичли датчиклар лабораториясида ишлаб чиқилган катта ўлчамдаги Al-αSi-p-i-n-Au детекторлари асосидаги RR-4М радиометри ҳаво, тупроқ, сув ва материалдаги радоннинг ҳажмий фаоллигини ўлчаш, шунингдек узоқ вақт давомида мониторинг қилиш имконини беради. Қурилма нисбий намлик ва атроф-муҳит ҳароратини ўлчаши мумкин. Қурилманинг ишлаш принципи ўлчов камерасига текшириляётган ҳавони юбориш ва унинг радиоактивлигини белгиланган вақт ичида ўлчашга асосланган ҳамда қурилма текшираётган ҳавода радон парчаланиш маҳсулотларини селектив ўлчаш учун тузилган. Шунингдек, юзабарьерли, кремний-литий ва αGe-pSi гетероструктурали детекторлар асосида радиометрларнинг лаборатория версиялари ишлаб чиқилди.

«Альфа нурланиш радиометрлари учун электрон блокларни ишлаб чиқиш» номли тўртинчи бобида радиометр учун ўлчов комплекси ва электрон блоклари келтирилган.

Рўйхатга олиш ўлчовларни комплекси ҳаво, сув ва тупроқдаги радон микдорини кузатиш учун мўлжалланган. Ўлчов комплекси радон ва тороннинг парчаланиши пайтида ҳосил бўладиган табиий радиоактив аерозолларнинг ҳажмли фаоллигини ҳам, реал вақт режимида ҳаводаги газсимон радоннинг ҳажмий фаоллигини (ХФ) ўлчаш имконини беради. Комплекс таркибига турли хил муҳитда (сув, ҳаво, тупроқ ҳавоси, тупроқ юзаси) радон намуналарини олиш ва сувдаги радоннинг ҳажмий фаоллигини, тупроқ ҳавоси, тупроқ

кучайтирилишини таъминлайди. Бундан ташқари, дискриминацион тугун шовкин бўлган маълумотни «кесиш» ни таъминлайди.

Детекторнинг сезгир худудида қайд этилган α -нурланиш билан ўзаро таъсирида пайдо бўлган импульслар заряди транзисторларда йиғилган заряд сезгир кучайтиргичнинг киришига берилади.

Маълумки, радон 222 емирилишида энергияси 5,4887 МэВ, радон 220 (торон) емирилишида еса 6,288 МэВ бўлган α -заррача ҳосил бўлади. Бунга асосланиб, заряд сезгир каскаднинг параметрлари ҳисоблаб чиқилган. 5,4887 МэВ α -заррачани рўйхатдан ўтказишда кучайтиргичдан чиқишида амплитудаси 110 милливольт бўлган кучланиш импульси ҳосил бўлади. Импулснинг шакли тез кутарилиш ва секинроқ пасайиши билан боғлиқдир.

Лойиҳалашда кирувчи энергия маълумотларини ажратиш ва танлаб рўйхатга олиш вазифаси қўйилмаган. Бундан ташқари, альфа заррачалар детекторнинг сезгир юзаси билан Броун ўзаро таъсири ҳар доим ҳам ортогонал равишда содир бўлмайди, бу «ўлик» қатламдаги энергиянинг бир қисмини нотекис йўқотишига олиб келади ва бу кўп каналли анализатор экранидаги спектр тасвирида кам энергияли шлейф шаклида аниқ намоён бўлади. Шунинг учун танлов чегарасини – 2 МэВ да белгилашга қарор қилинди. Кейин рўйхатга олинган импулс микроконтроллернинг ахборот портига узатилади.

Микроконтроллер тугуни. Микроконтроллер тугуни рўйхатга олиш мосламасининг тўлиқ автоном ишлашини таъминлайди. Микроконтроллер сифатида 32 килобайт дастурлаштириладиган хотирага эга ATmega 32 микросхема танланди.

Вазифага мувофиқ, микроконтроллерга уланиш ишлаб чиқилди ва бошқарув микроконтроллерида дастурий таъминотни ишлаб чиқиш бўйича техник топшириқлар шакллантирилди. Дастурий таъминот ўлчов иш оқимининг ўзгарувчанлигини таъминлайди. Операторнинг микроконтроллер билан мулоқоти корпусдаги тугмалар ва WC1602 ахборот мозаикали дисплей ёрдамида таъминланади.

Иккиламчи электр таъминоти тугуни. Бутун қурилма умумий кучланиши 12 В, аккумулятор сифими 2600 мА/соат бўлган 18650 аккумуляторлар билан қувватланади. Иккиламчи қувват манбаи ушбу кучланишни барча функционал блокларнинг нормал ишлаши учун зарур бўлган кучланишларга айлантиради: детекторни қувватлантириш учун +30В, микроконтроллер блокининг рақамли блокларини қувватлантириш учун +5В, қурилманинг аналог қисмини қувватлантириш учун +8В. Стационар (лаборатория) шароитида ишлашда ташқи кучланиш манбасидан электр таъминоти имконияти таъминланади.

Ҳаво қабул қилиш мосламаси. Ҳавони тортишни амалга ошириш ва таҳлил қилинган ҳавони кейинчалик янгилаш учун аквариум насосидан фойдаланиш варианты танланган. Ишлаш жараёни микроконтроллер томонидан бошқарилади. Ҳаво қабул қилиш мосламаси 2600 мА/соат сифимли, 18650 аккумуляторли автоном тўпладан қувватланади.

Ўрнатилган дастурий таъминотга эга шахсий компьютер (ШК). Қурилмада тўпланган маълумотларни қайта ишлаш учун у шахсий компьютерга уланади, унга техник шартларга мувофиқ ишлаб чиқилган амалий дастурий таъминот – ADL-V1.9-3.3. дастури ўрнатилади. Ўйилган маълумотлар компьютерга олинади, у ерда кейинчалик қайта ишланади ва ҳужжатлаштирилади.

Ҳавода, тупроқда ва сувда альфа нурланишни ўлчаш учун радиометр ишлаб чиқилди. (5-расм.)

Ишлаб чиқилган РР-8М, РР-4М радонетрлари ёрдамида табиий радиий ўз ичига олган намунадаги фаолликни ўлчаш натижалари кўрсатилган.(6-расм.)



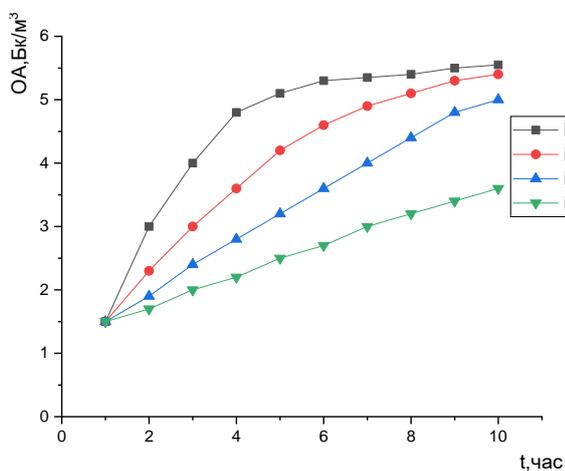
а)



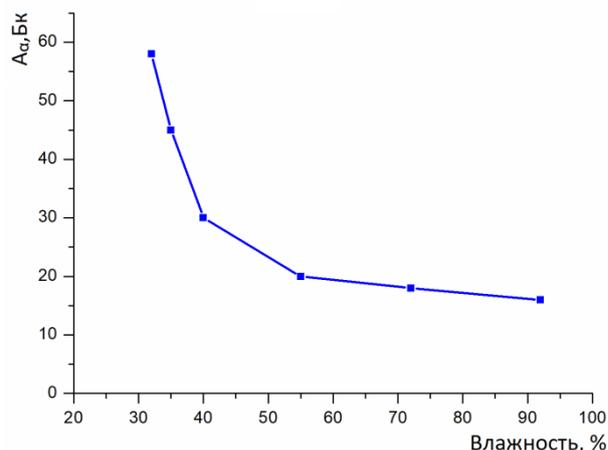
б)

5-расм. а – Онлайн режимда ишлайдиган Радиометр-РР-8М.

б – Ҳавода, тупроқда ва сувда ўлчаш учун Радонетр-РР-4М.



а)



б)

6-расм. Радиий ўз ичига олган намунанинг табиий радиоактивлиги.

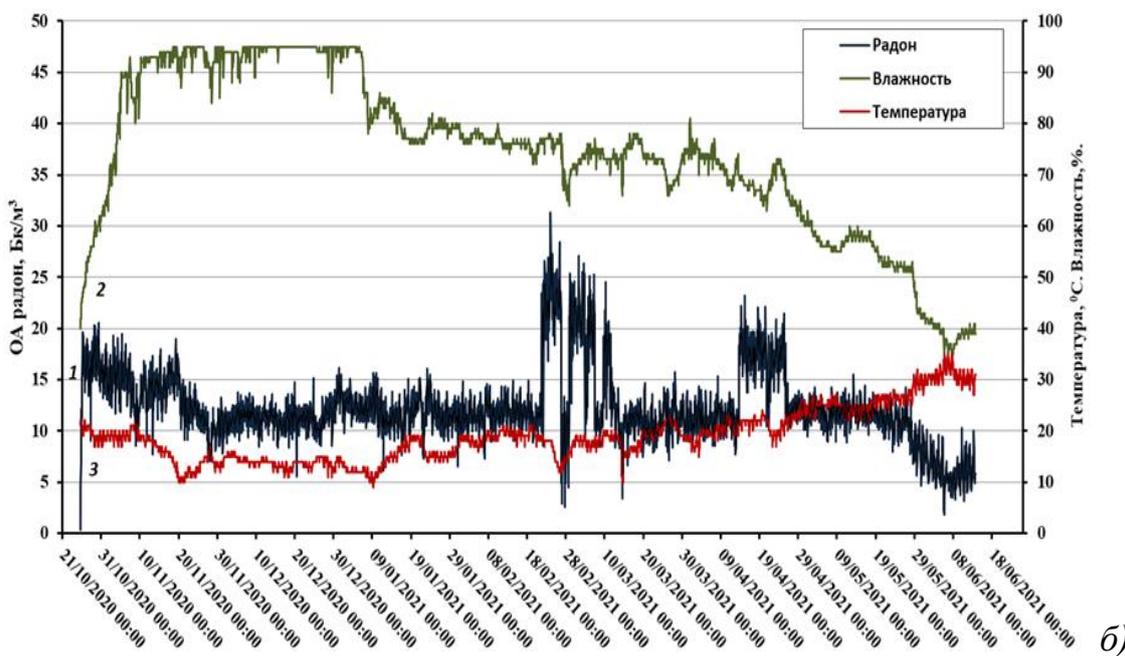
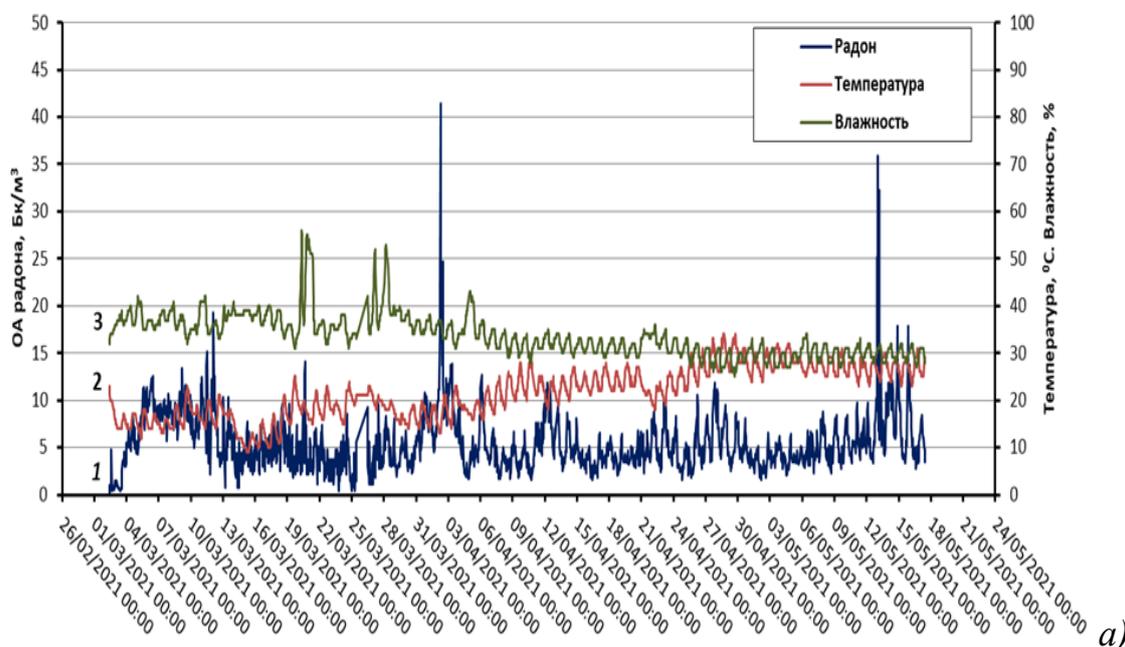
а – вақт ва намлик бўйича радоннинг ҳажмий фаоллиги.

б – альфа радиоактивлик намликдан намуна.

Графиклардан кўриниб турибдики (6а-расм.), намуна намлигининг ошиши билан радоннинг ҳажмий фаоллиги вақт ўтиши билан ортади. Афтидан радон сув молекулаларига ёпишиб, сув билан буғланиб, муҳитнинг ҲФ ни оширади. Шу билан бирга, намуна намлиги ошиши билан альфа фаоллиги камаяди

(бб-расм). Бунинг сабаби намроқ намунадаги альфа зарраларининг юкори ютилиш бўлиши мумкин.

б-расм. Ўрганилаётган объектда радоннинг ҳажмий фаоллигини, ҳароратни ва намлигини ўлчаш натижалари кўрсатилган.



7-расм. 2021-йил 26-февралдан 18-майгача 300 м чуқурликдаги кудукдан радон чиқиши. (а) тупроқдан 1 м чуқурликда 2021 йил 21 октябрдан 18 июлгача радон чиқиши. (б): (1) ҳажмий фаоллик (2) намлик (3) ҳарорат.

Тупроқ қатламидаги радон α -нурланишнинг маълум кунлардаги фаоллигининг ошиши Ўзбекистон Республикаси ер қобиғининг силжиш зоналарида содир бўладиган деформация жараёнлари ва ўрганилаётган объект зонасида радиация оқими билан боғлиқ бўлиши мумкин.

ХУЛОСА

Ионлаштирувчи нурланишларни қайд этувчи ўта сезувчан катта юзали кремний детекторларини ишлаб чиқиш мавзусидаги диссертация иши бўйича ўтказилган тадқиқотлар асосида қуйидаги хулосалар келтирилди:

1. Катта юзали детекторларни ишлаб чиқариш учун зарур бўлган дастлабки материалнинг электрофизик характеристикаси аниқланди. Қалинлиги $W \leq 150$ мкм бўлган катта диаметрли $\varnothing = 40-110$ мм юқори сезгирликли детекторларни тайёрлаш технологияси ишлаб чиқилди.

2. Катта сезгир юзага эга, киришда (олтин контакт томонида) ва чиқишда (алюминий контакт томонида) кам энергия йўқотишларига $\Delta E_{кр} \sim 6-12$ кэВ ва $\Delta E_{чик} \sim 12-20$ кэВ эга бўлган детекторлар ишлаб чиқилди. Бу ЯЎД ларни юқори сезувчанлигини таъминлайди ва 2π -геометрияда кам энергияли зарядланган зарраларни қайд этиш имконини беради.

3. Ўлчов натижаларини тўплаш ва қайта ишлаш учун компьютер дастури ва зарур электрон блоklar билан таъминланган радонметр ишлаб чиқилди. Радонметр ҳаво, сув ва тупроқдаги радоннинг ҳажмли фаоллигини ўлчаш имконини беради.

4. Радонметрнинг техник тавсифи ва фойдаланиш йўриқномаси тайёрланди, қурилма синовдан ўтказилди ва «Радиометр РР-4М» қурилмасига 001-сонли сертификат олди.

5. Ўрганилаётган ҳудуднинг тупроқ ҳавоси РР-4М радиометри ёрдамида радоннинг ҳажмли фаоллигини ўлчаш натижалари келтирилган. Натижалар ушбу ҳудудда тектоник жараёнларнинг фаоллашуви даврида радоннинг ҳажмли фаоллигининг кескин ошишини кўрсатди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc02/27.02.2020.FM/T.110.01
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ
ПРИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ АН РУз**

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

РАДЖАПОВ БЕКЖАН САЛИЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ БОЛЬШИХ РАЗМЕРОВ
РЕГИСТРИРУЮЩИЕ ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЫСОКОЙ
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ**

01.04.10 – «Физика полупроводников»

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ
ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PHD) ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент – 2024

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером В2020.2.PhD/T1503.

Диссертация выполнена в Физико-техническом институте Академии наук Узбекистана.

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

Научный руководитель: **Муминов Рамизулла Абдуллаевич**
доктор физико-математических наук,
профессор, академик АН РУз

Официальные оппоненты: **Ёдгорова Дилбара Мустафаевна**
доктор технический наук, профессор
Рахматов Ахмаджон Зайнидинович
доктор технический наук, профессор

Ведущая организация: **Институт ядерной физики АН РУз**

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2024 года в ____ часов на заседании Научного совета DSc02/27.02.2020.FM/T.110.01 по присуждению ученых степеней при Научно-исследовательском Физико-технического института Академии наук Республики Узбекистан (Адрес: 100084, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Чингиз Айтматов, дом 2Б.) Тел: (+99871) 235-93-61, факс (+99871) 235-42-91, e-mail: ftikans@uzsci.net.

С диссертацией можно ознакомиться в Отделе внедрения информационных технологий института (зарегистрирована за № _____) по адресу: 100084, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Чингиз Айтматов, дом 2Б. Тел: (+99871) 235-93-61

Автореферат диссертации разослан «_____» _____ 2024 г.

(реестр протокола рассылки № _____ от «_____» _____ 2024 г.).

Х.К. Олимов

Председатель Научного совета по
присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н.,
профессор

Ж.С. Ахатов

Ученый секретарь Научного совета по
присуждению ученых степеней, д.т.н.,
с.н.с.

М.Н. Турсунов

Председатель научного семинара при
Научном совете по присуждению ученых
степеней, д.т.н., с.н.с.

ВВЕДЕНИЕ(аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. Решение многих проблем современной науки и техники, прежде всего в экспериментальной ядерной физике, создание новых приборов для регистрации ионизирующих излучений и совершенствование существующих является одной из важных задач. В частности, в мире все шире используются приоритетные разработки в области полупроводникового детекторостроения для решения конкретных задач в различных отраслях фундаментальных и прикладных исследований современной физики.

В настоящее время в мировой практике полупроводниковые детекторы широко используются при проведении ядерных исследований и в задачах экологического мониторинга окружающей среды. Особенно широко применяются полупроводниковые детекторы на основе кремния. Полупроводниковые детекторы (ППД) для измерения радиации находятся вне конкуренции по сравнению с другими типами детекторов. Это обусловлено многими важными параметрами: высокое энергетическое и временное разрешение, малые габариты, относительная простота изготовления, устойчивость по отношению к внешним воздействиям, низковольтное питание. Создание специальных приборов для контроля воздействия естественной радиации заключается не только при работе с радиоактивными изотопами, но и требует исследований воздействия слабого (низкоэнергетичного) радиоактивного излучения на человека. Установлено, что большие дозы радиации опасны для жизни человека, но и действие низкоэнергетических ионизирующих излучений не является полностью безвредным. Радон является естественным источником радиации, опасной для здоровья человека. Воздействие радона на человека составляет более половины дозы облучения, полученной от всех источников радиации. Согласно нормам радиационной безопасности (НРБ), объёмная активность радона в воздухе жилых помещений не должна превышать 80 Бк/м³.

В нашей республике в этой области большое внимание уделяется прикладным исследованиям, приоритетным направлениям развития науки, внедрению результатов научных исследований. При реализации задач, определенных в стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы, в том числе по созданию эффективных механизмов практического применения научных и инновационных разработок, особое внимание уделяется разработке конкурентоспособных на внешнем и внутреннем рынках полупроводниковых приборов, полностью соответствующих требованиям времени, замещающие импорт. С учетом вышесказанного необходимость в разработке кремниевых детекторов, являющихся основным узлом приборов для мониторинга и обеспечения радиационной безопасности населения, являются важнейшей задачей.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, обозначенных в постановлении Президента Республики

Узбекистан ПП-60 «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы» от 28 января 2022 года, в постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-3682 «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы практического внедрения инновационных идей, технологий и проектов» от 27 апреля 2018 года, в ПП-3855 «О дополнительных мерах по повышению эффективности коммерциализации результатов научной и научно-технической деятельности» от 14 июля 2018 года, в указе Президента Республики Узбекистан №319 от 14 июля 2022 года «О мерах по увеличению объемов добычи и переработки урана и его трансформации в государственном предприятии «Навоийуран» в 2022-2030 годах», в постановлении Кабинета Министров Республики Узбекистан № 343 от 3 июля 2021 года «О дальнейшем совершенствовании системы оценки уровня загрязнения окружающей среды», а также в других нормативно-правовых актах, принятыми в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологии республики. Диссертация выполнена в рамках приоритетных направлений развития науки и технологий Республики Узбекистан III. «Энергетика, энергоресурс сбережение, транспорт, машино- и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. Ученые из разных стран занимаются исследованием и разработкой разных типов полупроводниковых детекторов (Акимов Ю.К., Игнатъев О.В., Калинин А.И, Кушнирук В.Ф., Дж. Дирнли, Д. Нортроп, Авдейчиков В.В. и др.), работающих в различных областях физики. Их исследования и результаты служат основой для развития разработок полупроводниковых детекторов. Академик Акимов Ю.К. и Игнатъев О.В. в своих работах исследовали технологию изготовления разных типов полупроводниковых детекторов, в том числе технологию изготовления поверхностно-барьерный детекторов с удельным сопротивлением 3-5 кОм·см, толщиной 150 мкм и чувствительной площадью 30 см² на основе кремния n-типа для регистрации короткопробежных ядерных частицы. Авдейчиков В.В. в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) г. Дубна много лет занимался разработкой и изготовлением «тонких» полупроводниковых детекторов с толщиной < 50 мкм.

В лаборатории высокочувствительных полупроводниковых датчиков Физико-технического института узбекистанскими учеными (Муминов Р.А., Раджапов С.А и др.) более 40 лет ведутся работы по разработке и изготовлению различных типов детекторов больших размеров: поверхностно-барьерных, гетеропереходных, литий-дрейфовых. Ими был разработан маршрут технологического процесса для изготовления детекторов больших размеров.

Несмотря на множество разработок полупроводниковых детекторов-детекторы с большой чувствительной площадью диаметром 110 мм и толщиной 0.1-0.2 мм (тонких) в мировой практике не известны.

Создание детекторов больших размеров позволит изготовить компактные приборы для контроля низкоэнергетического излучения, необходимых при

геологических поисково-разведочных работах, контроле экологии и охране окружающей среды, в металлургии, для регистрации излучения слабой активности.

Связь темы диссертации с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена работа.

Диссертационное исследование выполнено в рамках научно-исследовательских проектов Физико-технического института Академии Наук Республики Узбекистан № ФА-АЗ-Ф025 «Разработка и изготовление термоэлектрически охлаждаемых кремниевых р-і-п детекторных систем для рентгенофлуоресцентных анализаторов» (2015-2017 г,г.); № МП-ЁА-ФА-Ф004 «Разработка технологии формирования и изготовления двухкоординатно-чувствительных детекторов на основе монокристаллического кремния большого диаметра» (2016-2017 г,г.); № ФА-Атех-2018-233 «Разработка и изготовление радиометра на основе кремниевых поверхностно-барьерных детекторов большого диаметра для измерения объемной активности радона и содержания радия в исследуемой среде» (2018-2020 г,г.).

Целью исследований является разработка высокочувствительных кремниевых детекторов большого диаметра и изготовление на их основе измерительного комплекса - радиометра для регистрации альфа частиц, измерение объемной активности радона в различных средах на территории республики.

Задачи исследования:

изучить особенности физических свойств кремниевых пластин больших диаметров и толщин ($\varnothing = 40 - 110$ мм, $W \leq 0.3$ мм) для изготовления детекторов ионизирующих излучений;

определить технологические режимы для изготовления высокочувствительных ППД больших размеров с высокими электрофизическими и радиометрическими характеристиками;

разработать конструкцию и электронные части радиометра, и компьютерную программу для обработки накопленной в устройстве измерительных данных;

разработать и изготовить лабораторные радиометры альфа излучения радона в почве, воде и воздухе и провести измерения объемной активности радона почвенного воздуха на исследуемых территориях республики.

Объектами исследований являются поверхностно-барьерные, гетеропереходные $\alpha\text{Ge-pSi}$ и кремний-литиевые $\alpha\text{Si-p-i-n}$ детекторы больших размеров с толщиной меньше 300 мкм.

Предметом исследования являются механизмы формирования поверхностно-барьерных, гетеропереходных $\alpha\text{Ge-pSi}$ и $\alpha\text{Si-p-i-n}$ структур в детекторах и исследование их электрофизических и радиометрических характеристик.

Методы исследования. В исследовании применены вольтамперные, вольтфарадные, вольт-шумовые, спектрометрические и радиометрические методы определения характеристик детекторов, а также анализ

экспериментальных данных на основе современных теоретических представлений.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработаны химические способы обработки кремниевых пластин с диаметром ($\varnothing=40\div 110$ мм), обеспечивающие их высокую степень плоскопараллельности с точностью $\pm 0,4\div 0,6\%$;

разработаны технологические режимы напыления алюминия и золота, обеспечивающие получения минимальной толщины «мёртвого слоя» «входного» и «выходного» окон детекторов излучения, который позволяет регистрировать малоинтенсивный низкоэнергетический поток заряженных частиц за счет малых потерь энергии во «входном» и «выходном» окнах;

на основе изученных и разработанных научно-технических и технологических особенностей изготовлены три типа ППД: поверхностно-барьерных, гетеропереходных $Al-\alpha Ge-pSi-Au$ и $Al-\alpha Si-p-i-n-Au$ кремний-литиевых детекторов ионизирующего излучения большой площади и толщиной чувствительной области (100-120 мкм);

впервые изготовлен отечественный прибор (радонометр) на основе разработанного полупроводникового детектора, имеющего большую площадь чувствительной поверхности, для измерения объёмной активности радона в воздухе, воде и почве и для регистрации альфа частиц с энергией (3,5-8 МэВ), который оснащен необходимыми электронными узлами и компьютерной программой для накопления и обработки результатов;

впервые проведены измерения объёмной активности радона в почвенном воздухе на территории республики созданным отечественным радонометром, экскалации объёмной активности радона связаны с деформационными процессами земной коры на исследуемой территории в период активации тектонических процессов.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработаны новые методы механической и химической обработки, позволяющие обеспечить высокую плоскопараллельность кремниевых пластин с большой поверхностью;

разработаны три типа кремниевых детекторов: поверхностно-барьерных, гетеропереходных $Al-\alpha Ge-pSi-Au$ и $Al-\alpha Si-p-i-n-Au$ кремний-литиевых детекторов ионизирующего излучения большой площади для радонометра.

Достоверность результатов исследований обеспечивается применением известных и апробированных методик измерения и использованием приборов с высоким классом точности. Совместимость полученных научных результатов основана на сравнении экспериментальных данных с сертифицированным зарубежным прибором.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов заключается в изучении процессов формирования поверхностно-барьерных, $\alpha Ge-pSi$ и $\alpha Si-p-i-n$ структур для изготовления детекторов с высокими электрофизическими, радиометрическими характеристиками в широком диапазоне напряжений внешних электрических

полей, что позволяет измерение заряженных частиц малой энергии и в 2π-геометрии.

Практическая значимость результатов заключается в том, что все разработанные типы детекторов могут быть конкурентоспособными на внешнем рынке. Разработанный радонометр позволяет проводить измерения слабоинтенсивных заряженных частиц и может быть использована для определения объемной активности (ОА) радона в жилых и производственных помещениях, при проведении геологических поисково-разведочных работ урановых и других месторождений, при контроле экологии и охране окружающей среды, в металлургии, пробах воды естественных и искусственных водоемов, краткосрочного предсказания землетрясений.

Внедрение результатов исследования. По результатам исследований кремниевых детекторов больших размеров регистрирующие ионизирующие излучения с высокой чувствительностью, разработки и изготовлению радонометра:

получен патент Агентства интеллектуальной собственности Республики Узбекистан на полезная модель «Устройство для измерения объемной активности радона в воздухе, воде и почве» (№FAP 02142). Детектор, используемый в устройстве имеет, минимальную толщину «мёртвого слоя», что увеличивает чувствительность устройства и позволяет регистрировать малоинтенсивный низкоэнергетический поток заряженных частиц, а конструкция устройства позволяет проводить измерения в 2π-геометрии в режиме реального времени;

выполнен хоз.договор с НГМК № 01-05-02/1 от 04.01.2019 «Разработка и изготовление радиометров на основе полупроводниковых детекторов заряженных частиц для измерения объемной активности радона в воздухе, воде и почве». Впервые разработанный отечественный сертифицированный радиометр (сертификат №001, «O'zstandart») на основе высокочувствительного детектора большой площади работает на территории НГМК, выполняя научные и экологические задачи для обеспечения безопасности сотрудников;

выполнен хоз.договор с АГМК № 63-2144 ЮР от 13-апреля 2021г. «Разработка и изготовление радиометров: радонометра для измерения объемной активности радона в воздухе, воде и почве, альфаметра для измерения малых активностей альфа излучений в материалах, гаммаметра для измерения малых активностей гамма излучений в материалах». Разработаны и изготовлены действующие опытно-лабораторные устройства – Радиометры: два комплекта «Радонометр» и один комплект «Гаммамерт», на основе высокоэффективных кремниевых детекторов (диаметром 110 мм, толщиной 100-120 мкм). Измерения объёмной активности радона разработанными радиометрами не отличаются от результатов, проведенных сертифицированным зарубежным радиометром.

Апробация результатов исследования. Результаты настоящего исследования апробированы и обсуждены на 14 международных и 2 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследований. По теме диссертации опубликованы 25 научных работ, в том числе 9 статей в научных журналах, рекомендованных Высшей Аттестационной Комиссией для публикаций основных научных результатов докторской диссертации, получен 1 патент на полезную модель и 2 свидетельства на программный продукт.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из 121 страниц и включает введение, четыре главы, заключение, список использованной литературы, 40 рисунков, 5 таблиц и 3 приложения.

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 **«Исследование возможности разработки детекторов ядерного излучения больших размеров»** представлены основные параметры полупроводниковых детекторов, изучены влияние параметров исходного кремния на их характеристики. Основными параметрами ППД являются: темновой ток, электрическая ёмкость, энергетический эквивалент шума, энергетическое разрешение, энергетический эквивалент толщины «мертвого слоя» (МС). Для регистрации малоинтенсивного ионизирующего излучения детектор должен иметь минимальный уровень шума. Для получения детекторов с минимальным уровнем шумов необходимо выбирать исходный Si с минимальными размерами локальных неоднородностей, которые малы в исходном Si с $\rho = 3 \div 8$ кОм·см, обеспечивая этим самым минимальный вклад в ёмкостную составляющую шума детекторов, обусловленной этими неоднородностями. В главе приводится обзор литературных данных по изучению физических свойств кремниевых пластин больших диаметров и толщин ($\varnothing = 40-110$ мм, $W \leq 0,3$ мм) для изготовления детекторов больших размеров и использования их в качестве приборов для быстрой оценки радоноопасности территорий. На основе анализа имеющихся теоретических и практических данных формируются задачи исследования.

Вторая глава диссертации **«Разработка технологических процессов получения полупроводниковых детекторов больших размеров»** посвящена разработке полупроводниковых детекторов больших размеров. Были изучены технологические процессы получения детекторов больших размеров – механическая и химическая обработка, напыление контактов. Для обеспечения высокой степени плоскопараллельности пластин необходимо решение ряда технических задач по механическим и химическим обработкам. Полученные

после резки слитка, кремниевые пластины обладают рядом нарушений, к которым относятся: наличие механически нарушенного слоя, неплоскопараллельность сторон, изгиб и большой разброс по толщине. Поэтому после проведения процесса резки, обязательной технологической операцией является шлифовка.

При химической обработке требуется обеспечение равномерной скорости травления одновременно всей поверхности кремниевой пластины. Для обеспечения таких условий, нами были разработаны специальные составы химреактивов, а также был разработан динамический процесс химического травления. Сущность этого процесса заключается в том, что пластины кремния находились под определенным углом (40°) и вращались со скоростью 60 об/мин. Режимы процесса химической обработки подбирались в соответствии с диаметром исходных пластин кристаллов кремния.

За последние десятилетия вакуумное напыление стало основным методом создания тонких пленок. Наиболее простым и хорошо освоенным методом изготовления пленок является высоковакуумное термическое испарение. Этот метод дает возможность гибко и быстро менять условия, при которых происходит напыление, менять распыляемые материалы и др.

Напыление контактов на готовой Si пластине проводилось на вакуумной установке термического испарения ВУП-4.

В главе даны результаты разработок и особенности изготовления 3-х типов детекторов с большой чувствительной площадью: поверхностно-барьерных, на основе гетеропереходов – $\alpha\text{Ge-pSi}$ и структуры $\alpha\text{-Si-p-i-n}$ кремний – литиевых детекторов. Исследованы электрофизические и радиометрические характеристики, разработанных детекторов.

Использование поверхностно-барьерных детекторов (ПБД) большого диаметра для регистрации альфа излучения является эффективным средством для прямого измерения объемной активности (ОА) радона в воздухе, почве, в воде, а также содержания естественного урана, радия в исследуемой среде.

Кремниевые поверхностно-барьерные детекторы на основе p-n структур в настоящее время являются также одним из основных инструментов исследования различных частиц и излучений. Их преимуществами являются небольшая энергия, расходуемая на образование электронно-дырочной пары, которая в кремнии составляет около 3,6 эВ, высокая тормозная способность, что придает компактность детектору, высокая скорость набора статистики, достаточно отработанная технология производства кремниевых детекторов.

Кремниевые ПБД с большой чувствительной рабочей площадью (60см^2) из кремния диаметром (~ 110 мм) имеют свои особенности. Это связано с поверхностными и примесными неоднородностями, образованием дипольных структур в местах скопления примеси, а также неоднородным распределением параметров кремния большого размера. В частности, для поверхностно-барьерных детекторов не применяется высокотемпературная обработка, уменьшающая время жизни носителей заряда исходного материала. Для получения поверхностно-барьерного детектора после химической обработки на

поверхность n-Si, методом вакуумного напыления при давлении 5×10^{-5} мм.рт.ст. наносился контакт Al(300Å). После выдержки в течении двух суток в обеспыленном воздухе на обратную сторону напылялось Au(~200Å). Затем пластины помещались в корпус.

Для получения детекторов с протяженными чувствительными областями ($W \leq 0,3$ мм) применяют способ компенсации исходного кремния р-типа ионами лития. Характеристики изготавливаемых детекторов во многом определяются качеством исходного материала, в частности наличием в нем различного рода структурных и примесных несовершенств и их распределением в объеме кристалла. Однако, до сих пор нет серийного монокристаллического кремния, который бы отвечал всем требованиям предъявляемым полупроводниковым спектрометрическим детекторам. Последние достижения в области технологии выращивания особо чистых монокристаллов позволили получить бездислокационные, с малым содержанием примеси слитки кремния с равномерным распределением по образующей кристалла (величина разброса меньше 10%). Для создания *p-n* перехода на *p*-кремний диаметром 80, толщиной 0,6 мм проводилась диффузия лития при температуре 450 °С на глубину 50 мкм.

Дрейф ионов лития проводился на специально разработанной установке при температуре 80-90 °С, напряжении 50-60 В с последующим импульсным выравнивающим дрейфом при температуре 60 °С и напряжении 40 В.

Конструктивно установка дрейфа ионов лития представляет собой термостат, в который помещаются пластины кремния. Для сокращения времени дрейфа и улучшения характеристик детекторов дрейф может проводиться с двух сторон при $T=60 \div 100^\circ\text{C}$ и напряжении обратного смещения $50 \div 200$ В. Момент окончания дрейфа фиксируется по резкому возрастанию обратного тока. После окончания дрейфа для выявления *i*-области одна из сторон кристалла *n*⁺-области *n*⁺-*i*-р структур шлифуются на стеклянном диске микропорошком карбида кремния. Толщина удаляемого слоя определяется с учетом размытия диффузионного профиля. Толщина сошлифованного слоя составляет обычно $50 \div 400$ мкм. Выведение *i*-области производится с помощью декорирующего травителя $\text{HNO}_3:\text{HF}=1:1000$. *i*-область считается полностью выведенной, когда ее контуры близки к окружности с диаметром равным диаметру диффузионной области.

Производится травление поверхности перехода и лицевой стороны структуры с целью уменьшения токов утечки. *n*⁺ область защищается при этом липкой лентой. Такая химическая обработка обычно не дает положительных результатов. Поверхность покрывается примесными частицами Cu, Ag, Au и может составлять несколько макроскопических слоев, что приводит к обогащению поверхностного слоя носителями зарядов. В этом случае применяется обработка в анилиновом травителе, который является хорошим комплексообразователем и эффективно удаляет атомные загрязнения, склонные к аккумулятивной адсорбции на поверхности.

После выдержки на воздухе в течение 2-х суток на лицевую сторону структуры испарением в вакууме наносится слой золота толщиной 200Å. Защита поверхности n^+i перехода производится эпоксидным компаундом ЭКЛБ-10, обладающим хорошими пассивирующими свойствами. Корпус детектора представляет собой два коваровых кольца, между которыми закрепляется структура детектора с помощью компаунда ЭКЛБ-10, обладающего хорошими адгезионными свойствами. Тыльный контакт создавался напылением на n^+ -область структуры алюминия толщиной 300Å.

Одним из направлений имеющих целью улучшение характеристик ППД и создания их новых видов являются гетеропереходы. Гетеропереход – потенциальный барьер на границе контакта двух различных ПП с различной шириной запрещённой зоны, постоянная решёток которых одинакова, а кристаллическая структура идентична. Наиболее широко используемыми материалами, отвечающими этим требованиям являются Ge и Si.

Для получения гетероперехода на поверхности p -Si, методом вакуумного напыления при давлении 5×10^{-5} мм.рт.ст. наносили контакты на основе аморфного α Ge(300Å) и Al(300Å). На обратную сторону наносили слой Au(~200Å), который является контактом. Затем готовые детекторные структуры помещали в корпуса.

Электрофизические и радиометрические характеристики изготовленных детекторов находились в пределах – $U_{\text{раб}}=(15 \div 100)$ В, $I_{\text{обр}}=(0,5-2)$ мкА, $C=(1000 \div 2500)$ пФ, $E_{\text{ш}}=(48 \div 75)$ кэВ, энергетическое разрешение по ^{226}Ra , $R_{\alpha}=(85 \div 100)$ кэВ ($E_{\alpha}=7,65$ МэВ), потери на входном окне $\Delta E_{\text{вх}}=(10 \pm 5)$ кэВ, выходном $\Delta E_{\text{вых}}=(20 \pm 5)$ кэВ. Исследования показали, что форма и спектр энергетического разрешения не отличаются существенно со стороны входного и выходного окон детекторов.

В третьей главе «**Разработка радиометров альфа излучения на основе кремниевых детекторов больших размеров и исследование объемной активности радона в различных областях**» излагаются физические и технологические этапы разработки высокочувствительных детекторов большого размера для радиометров для измерения объемной активности радона в различных средах.

Основным элементом радиометра является детектор. Для измерения слабоинтенсивных заряженных частиц требуется детектор с большой площадью чувствительной поверхности, значительной толщиной чувствительной области, тонким «мертвым» слоем не только «входного», но и «выходного» окна, а также с высокими электрофизическими, радиометрическими характеристиками в широком диапазоне напряжений внешних электрических полей. Был разработан радиометр с Al- α Si- p - i - n -Au детектором. При изготовлении детекторов использовался кремний p -типа с удельным сопротивлением $\rho=5000$ Ом \times см, временем жизни неосновных носителей заряда $\tau = 700$ мкс, выращенный методом бестигельной зонной плавки (БЗП) диаметром 80 мм, толщиной 0,6 мм. На пластины проводилась диффузия лития и осуществлялся дрейф по разработанной технологии.

После проведения полной компенсации *i*-области, весь кристалл подвергается специальной химико-технологической обработке в целях обеспечения минимальных толщин «мертвых» слоев «входного» и «выходного» окон, толщину кристаллов доводили до 100-120 мкм. На установке динамического травления диффузионный слой лития удалялся. Структуру кремния травлением доводили до гантелеобразного вида, что обеспечивало механическую прочность пластины. На поверхность *i*-области (компенсированного литием кремния), методом термического испарения в вакууме при давлении 5×10^{-5} мм.рт.ст. проводилось напыление аморфного кремния - α -Si, где толщина напылённого слоя α -Si составляла ~ 500 Å.

Напыление аморфного кремния на компенсированный кремний *p*-типа с алюминием на выходное окно обеспечивает хороший омический контакт.

Затем пластины помещались в корпуса, изготовленные из ковара и методом термического испарения в вакууме при давлении 5×10^{-5} мм.рт.ст. наносились контакты Au (~ 200 Å), «входное» окно, а на обратную сторону Al ($500-1000 \text{Å}$)- «выходное» окно. Толщина мертвого слоя определялась толщиной контактов и аморфным кремнием. Для посадки пластин кремния в корпус, использовалась специальная эпоксидная смола, обладающая хорошими адгезионными свойствами.

Детекторы, изготовленные описанным способом, имеют относительно малые потери энергии со стороны золотого слоя $\Delta E_{\text{вх}} \sim 6-12 \text{кэВ}$ и со стороны алюминиевого слоя $\Delta E_{\text{вых}} \sim 12-20 \text{кэВ}$, что обеспечивает точные измерения в 2 π -геометрии. Рабочее напряжение детектора Al- α Si-*p*-*i*-*n*-Au составляет 8-10В. (Рис.1)

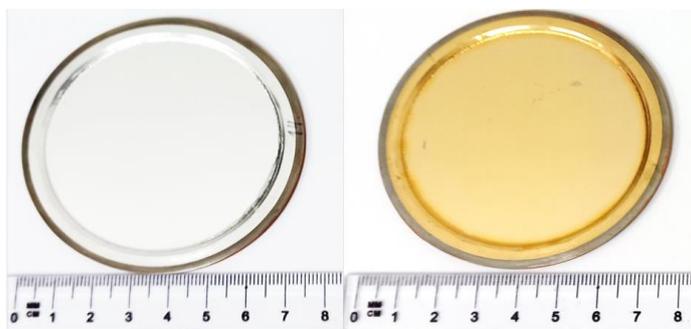


Рис. 1. Кремний литиевый детектор Al- α Si-*p*-*i*-*n*-Au со стороны золотого и алюминиевого контактов

На рисунке 2. представлена структура детектора Al- α Si-*p*-*i*-*n*-Au.

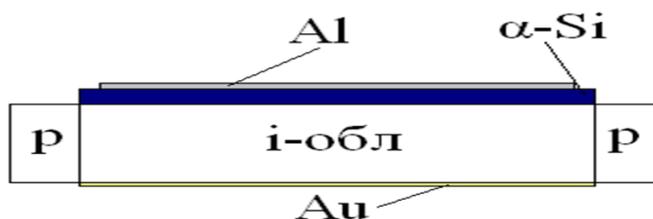


Рис 2. Структура кремний литиевого детектора Al- α Si-*p*-*i*-*n*-Au : *i*-обл – компенсированный литием кремний *p*-типа, Al - контакт («выходное» окно), Au-контакт («входное» окно), α -Si-аморфный кремний, P– кремний *p*-типа.

Были проведены исследования электрофизических и радиометрических характеристик изготовленных детекторов. Детекторы площадью 50 см^2 имели энергетическое разрешение α -частиц ^{226}Ra энергией $E_\alpha \sim 7,65 \text{ МэВ} \sim 90 \text{ кэВ}$, обратный ток при рабочем напряжении $U_{\text{раб}} \sim 8\text{--}10 \text{ В}$, $I_{\text{обр}} \sim 0,5\text{--}1 \text{ мкА}$, емкость $C \sim 2400 \text{ пФ}$, шум $E_{\text{ш}} \sim 40 \text{ кэВ}$. Энергетическое разрешение определялось, в основном, емкостными шумами (рис. 3). Спектрометрическая установка, используемая в измерениях, была откалибрована по образцовому α -источнику ^{226}Ra .

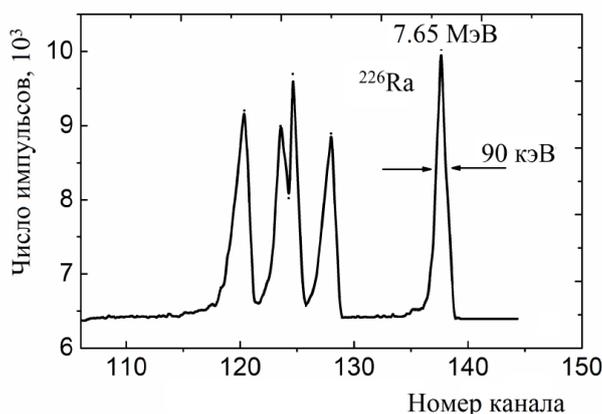


Рис. 3. Энергетическое разрешение Al- α Si-p-i-n-Au детектора по α -частицам ^{226}Ra с $E_\alpha = 7,65 \text{ МэВ}$ при напряжении 100 В.

Разработанный в лаборатории высокочувствительных полупроводниковых датчиков ФТИ АН РУЗ радиометр RR-4М на основе Al- α Si-p-i-n-Au детекторов больших размеров обеспечивает измерение объемной активности радона в воздухе, почве, воде и материале, а также позволяет проводить мониторинг в течение продолжительного времени. С его помощью можно также измерять относительную влажность и температуру среды. Принцип работы прибора основан на закачке исследуемого воздуха в измерительную камеру с последующим измерением его радиоактивности в течение регламентного времени, причем устройство настроено на селективное измерение продуктов распада радона в исследуемом воздухе. Также были разработаны лабораторные варианты радиометров на основе поверхностно-барьерных детекторов, и на основе гетероструктуры $\alpha\text{Ge-pSi}$.

В четвертой главе «**Разработка электронных блоков для радиометров альфа излучения**» дается описание измерительного комплекса и электронных блоков для радиометра.

Измерительный комплекс регистрации предназначен для мониторинга содержания радона в воздухе, воде и в почве. Измерительный комплекс позволяет проводить измерения как объемных активностей естественных радиоактивных аэрозолей, которые образуются при распаде радона и торона, так и измерять объемную активность (ОА) газообразного радона в воздухе в режиме реального времени. В комплекс входит автономная воздуходувка, оснащенная различными пробоотборными устройствами, которые позволяют проводить отбор проб радона в различных средах (вода, воздух, почвенный

воздух, поверхность грунта) и измерять объемную активность радона в воде, почвенном воздухе, плотность потока радона с поверхности грунта (ППР).

Блок схема радиометра приведена на рисунке 4. В его состав входят следующие функциональные элементы:

- рабочая камера с детектором (РК);
- узел усиления и селекции информации (аналоговый узел) (УСИ);
- микроконтроллерный узел (цифровой узел) (МК);
- узел вторичного электропитания (ВП);
- узел воздухозаборника (ВЗ);
- персональный компьютер с установленным программным обеспечением (ПК);
- GSM/SMS-модуль, для проведения измерений в онлайн режиме (GSM/SMS).



Рис.4. Блок схема устройства.

Рабочая камера. Рабочая камера представляет собой пустотелый цилиндр, внутри которого в геометрическом центре, на подвесках укреплен детектор. Расположение в геометрическом центре обусловлено тем, что детектор, в принципе представляющий собой круглую пластину, чувствителен к регистрации альфа частиц с двух сторон. На корпусе цилиндра также укреплены штуцеры для подключения к системе воздухозабора и разъем для подключения детектора к элементам питания и усиления.

Детектором является кремниевый детектор с диаметром чувствительной области 60 мм. Питание детектора обеспечивается напряжением 24-30 Вольт через RC цепи от вторичного преобразователя напряжения, расположенным в конструкции совместно с зарядочувствительным предусилителем.

Для минимизации помех, создаваемых преобразователем на работу предусилителя, он защищен электромагнитным экраном, а подача первичного напряжения и также выходного напряжения осуществляется через проходные конденсаторы.

Узел усиления и селекции информации. Узел усиления и селекции обеспечивает преобразование заряда, возникшего в объёме детектора от взаимодействия с регистрируемой α -частицей, в импульс напряжения и затем его усиление. Далее дискриминирующим узлом обеспечивается «обрезание» информации, представляющей собой шум.

Импульсы заряда, возникшие в чувствительной области детектора от взаимодействия с регистрируемым α -излучением, подаются на вход зарядочувствительного предусилителя, собранного на транзисторах.

Как известно, при распаде радона 222 образуется α – частица с энергией 5,4887 МэВ, а при распаде радона 220 (торон) – 6,288 МэВ. Исходя из этого, были рассчитаны параметры зарядочувствительного каскада. На выходе предусилителя при регистрации α – частицы 5,4887 МэВ образуется импульс напряжения амплитудой 110 милливольт. Форма импульса представляет собой всплеск с крутым фронтом и более медленным спадом.

При проектировании не ставилась задача сепарации и селективной регистрации поступающей информации по энергии. Тем более что взаимодействие альфа частиц с чувствительной поверхностью детектора не всегда происходит ортогонально, что приводит к неравномерной потере части энергии в «мёртвом» слое и что наглядно демонстрируется на изображении спектра на экране многоканального анализатора в виде низкоэнергетического шлейфа. Было принято решение установить порог селекции на уровне – 2 МэВ.

Далее регистрируемый импульс передаётся на информационный порт микроконтроллера.

Микроконтроллерный узел. Микроконтроллерный узел обеспечивает полную автономную работу устройства регистрации. В качестве микроконтроллера выбрана микросхема ATmega 32 с 32 килобайтами программируемой памяти на кристалле.

В соответствии с поставленной задачей была разработана обвязка микроконтроллера и сформулировано техническое задание на разработку программного обеспечения «защитого» в управляющий микроконтроллер. Программное обеспечение позволяет проводить варьируемое управление технологическим процессом измерения. Диалог оператора с микроконтроллером обеспечивается с помощью кнопок на корпусе и информационного мозаичного дисплея WS1602.

Узел вторичного электропитания. Питание всего устройства обеспечивается от встроенной батареи аккумуляторов 18650 с суммарным напряжением 12В и ёмкостью аккумулятора 2600 мА/ч. Узел вторичного электропитания осуществляет преобразование этого напряжения в напряжения, необходимые для нормальной работы всех функциональных узлов: +30В для питания детектора, +5В, для питания цифровых узлов микроконтроллерного узла, +8В, для питания аналоговой части устройства. Предусмотрена возможность электропитания от внешнего источника напряжения при работе в стационарных (лабораторных) условиях.

Узел воздухозаборника. Для осуществления операции нагнетания и последующего обновления анализируемого воздуха, в качестве воздухозаборника был выбран вариант с использованием поршневой аквариумной помпы. Управление процессом осуществляется с помощью микроконтроллера. Питание воздухозаборника осуществляется от автономного комплекта аккумуляторов 18650 ёмкостью 2600 мА/ч.

Персональный компьютер с установленной программой (ПК). Для обработки накопленной в устройстве информации, оно подключается к персональному компьютеру, на котором установлено разработанное в соответствии с техническим заданием прикладное программное обеспечение – программа ADL-V1.9-3.3. Накопленная информация забирается в компьютер, где происходит её дальнейшая обработка и документирование.

Были изготовлены радиометр альфа излучения и радонметр, для измерений в воздухе, почве и воде (рис.5а, б).

На рис. 6 а, б показаны проведенные нами измерения по определению активности в естественной радийсодержащей пробе разработанными радонметрами RR-5M и RR-8M.

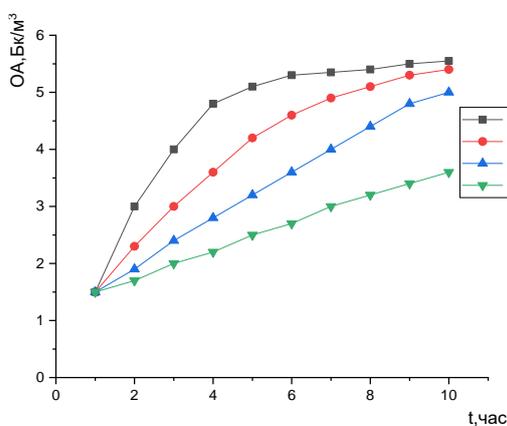


а)

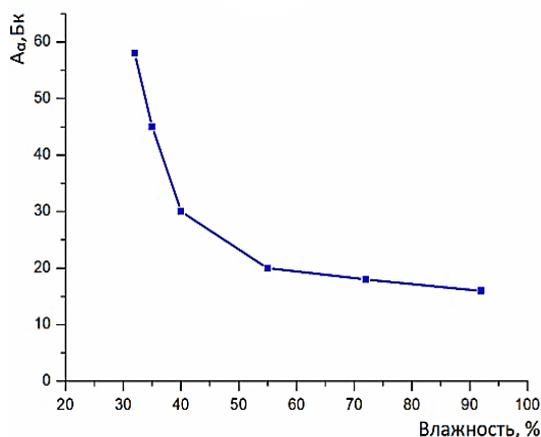


б)

Рис.5. а- Радонметр RR-8M для измерений в онлайн режиме.
б - Радонметр RR-5M для измерений в воздухе, почве и воде.



а)



б)

Рис.6. Естественная радиоактивность радий содержащей пробы.
а - объемная активность радона от времени и влажности.
б - альфа радиоактивность от влажности пробы.

Как видно из графиков (Рис.6а), с увеличением влажности пробы со временем увеличивается объемная активность радона. Известно что радон, прилипая к молекулам воды, испаряется с водой, увеличивая ОА среды. В тоже время альфа активность уменьшается с увеличением влажности пробы (Рис.6б). Это может быть связано с большим поглощением альфа частиц в более влажной пробе.

На рис. 7 показаны результаты измерения объемной активности радона, температуры и влажности исследуемых объектов во времени.

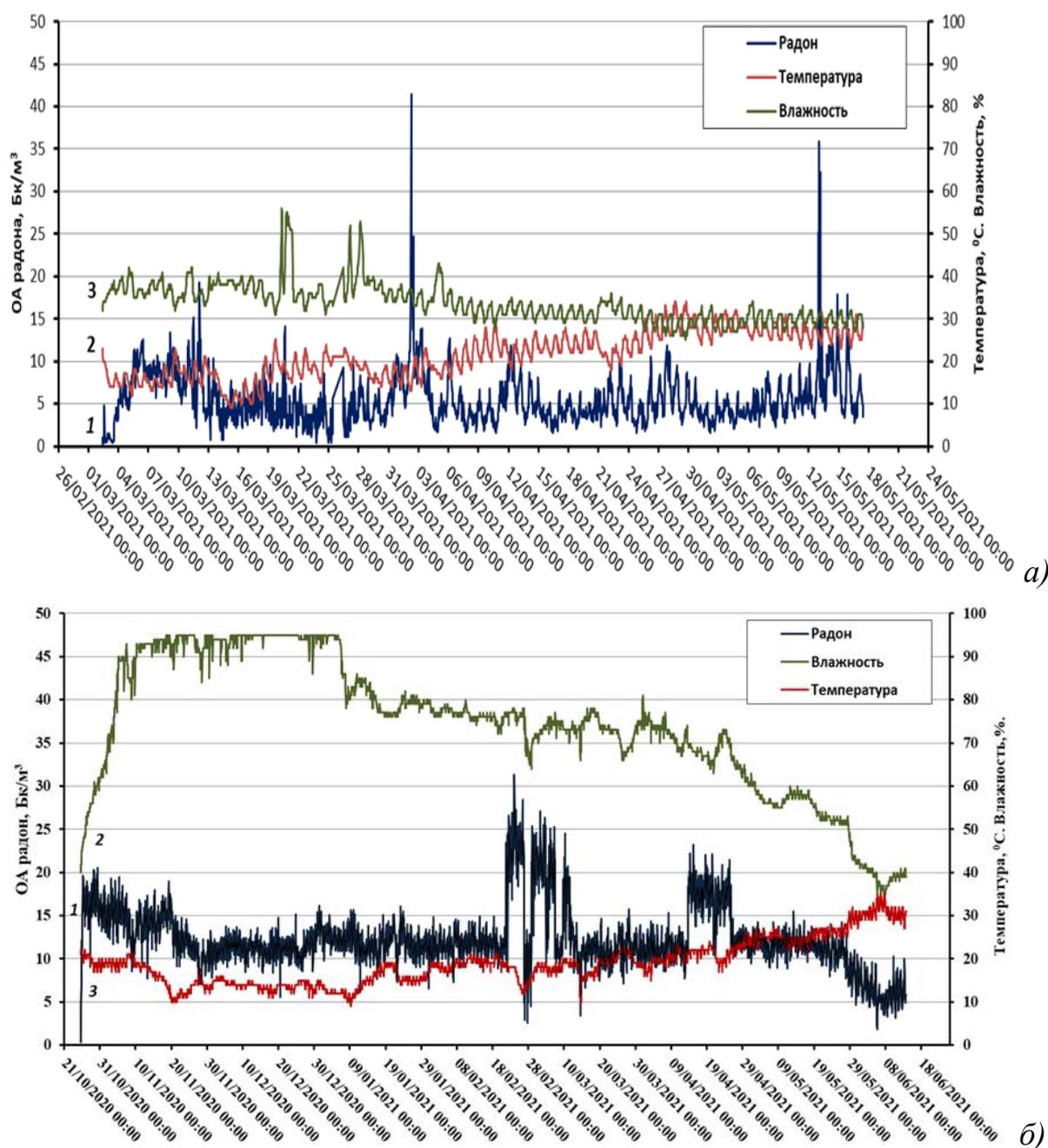


Рис.7. Выход радона из скважины глубиной 300 м с 26 февраля по 18 мая 2021г. (а) и из почвы глубиной 1м с 21 октября по 18 июля 2021г. (б) изменение во времени объемной активности (1), влажности (2), температуры (3).

Увеличение объемной активности альфа излучения радона в почвенном слое в определенные дни может быть связано с деформационными процессами, происходящими в зонах разломов земной коры Республики Узбекистан и потоком излучения в зоне исследуемого объекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по теме диссертации «Разработка кремниевых детекторов больших размеров регистрирующие излучения с высокой чувствительностью» можно сделать следующие выводы:

1. Определены электрофизические характеристики исходного материала, необходимые для изготовления детекторов большой площади. Разработана технология изготовления высокочувствительных детекторов больших диаметров $\varnothing=40-110$ мм с толщиной $W \leq 150$ мкм.

2. Разработаны детекторы с большой площадью чувствительной поверхности, имеющие малые потери энергии во «входном» (со стороны золотого контакта) и «выходном» (со стороны алюминиевого контакта) окнах $\Delta E_{\text{вх}} \sim 6-12$ кэВ и $\Delta E_{\text{вых}} \sim 12-20$ кэВ соответственно. Это обеспечивает высокую чувствительность ППД и позволяет проводить измерение заряженных частиц малой энергии в 2π - геометрии.

3. Разработан и изготовлен радонметр, оснащенный необходимыми электронными узлами и компьютерной программой для накопления и обработки результатов измерения. Радонметр позволяет проводить измерения объемной активности радона в воздухе, воде и почве.

4. Подготовлены техническое описание и инструкция по эксплуатации радонметра и получен сертификат на устройство «Radiometr RR-4M» №001.

5. Представлены результаты мониторинга объемной активности радона радиометром RR-4M почвенного воздуха на исследуемой территории. Измерения показали резкое увеличение объемной активности радона в период активации тектонических процессов на данной территории.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING ACADEMIC DEGREES
DSc02/27.02.2020.FM/T.110.01 AT PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE
ACADEMY SCIENCES OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN**

PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE

RADZHAPOV BEKJAN SALIYEVICH

**DEVELOPMENT OF LARGE AREA SILICON DETECTORS THAT
DETECT IONIZING RADIATION WITH HIGH SENSITIVITY**

01.04.10 – Physics of semiconductors

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

Tashkent – 2024

The theme of the Philosophy doctor dissertation (PhD) was registered by the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2020.2.PhD/T1503.

The dissertation has been prepared at Physical-technical institute of Uzbekistan Academy of Sciences.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at www.fti.uz and on the website of «ZiyoNet» Information and Educational Portal at www.ziynet.uz.

Scientific supervisor:

Muminov Ramizulla Abdullaevich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
professor, academician

Official opponents:

Yodgorova Dilbara Mustafaeva

doctor of technical sciences, professor

Raxmatov Axmadjon Zaynidinovich

doctor of technical sciences, professor

Leading organisation:

Institute of nuclear physics AS RUz

The defense of the doctoral dissertation will be held on «_____» _____ 2024, at _____ at the meeting of the Scientific Council No. DSc02/27.02.2020.FM/T.110.01 at the Scientific Research Physical and technical institute of the Academy sciences of the Republic of Uzbekistan (Address: 2B Chingiz Aytmatov str., 100084 Tashkent city, Uzbekistan. Tel. (+99871) 235-93-61, fax: (+99871) 235-42-91, e-mail: ftikans@uzsci.net)

The dissertation can be looked through in the ICT Implementation Unit (registered under №.____). Address: 2B Chingiz Aytmatov str., 100084 Tashkent city, Uzbekistan. Tel.: (+99871) 235-93-61, e-mail: ftikans@uzsci.net

The abstract of the dissertation was distributed on «_____» _____ 2024 year.

(Registry record No. _____ dated «_____» _____ 2024year).

Kh. K. Olimov

Chairman of the Scientific Council for the award of academic degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

J. S. Akhatov

Scientific Secretary of the Scientific Council for the award of scientific degrees, Doctor of technical sciences

M. N. Tursunov

Chairman of the Scientific Seminar at the Scientific Council for the Awarding of Academic Degrees, Doctor of technical sciences

INTRODUCTION (abstract of the Doctoral (PhD) dissertation)

The aim of the research is to develop highly sensitive large-diameter silicon detectors and to manufacture a measuring complex based on them - a radiometer for registering alpha particles, measuring the volumetric activity of radon in various environments in the republic.

The tasks of the research:

study the peculiarities of the physical properties of silicon wafers of large diameters and thicknesses ($\varnothing = 40 - 110$ mm, $W \leq 0.3$ mm) for the manufacture of ionizing radiation detectors.

specify technological modes for the manufacture of highly sensitive large-sized semiconductor detectors (SCDs) with high electrophysical and radiometric characteristics;

develop the design and electronic parts of the radonimeter, and a computer program for processing the measured data accumulated in the device;

develop and manufacture laboratory radiometers for alpha radiation of radon in soil, water and air and to measure the volumetric activity of radon in soil air in the study areas of the republic.

The objects of the study are surface-barrier, heterojunction $\alpha\text{Ge-pSi}$ and silicon-lithium $\alpha\text{Si-p-i-n}$ detectors of large sizes with a thickness of less than 300 μm .

The subject of the study is the mechanisms of formation of surface-barrier, heterojunction $\alpha\text{Ge-pSi}$ and $\alpha\text{Si-p-i-n}$ structures in detectors and the study of their electrical and radiometric characteristics.

Methods of research. The study used volt-ampere, capacity-voltage, noise-voltage, spectrometric and radiometric methods for determining the characteristics of detectors, as well as analysis of experimental data based on modern theoretical concepts.

The scientific novelty of the dissertation research is as follows:

chemical methods have been developed for processing silicon wafers with a diameter ($\varnothing=40\div 110$ mm), ensuring their high degree of plane-parallelism with an accuracy of $\pm 0.4\div 0.6\%$;

technological modes for sputtering aluminum and gold have been developed to ensure the minimum thickness of the «dead layer» of the «input» and «output» windows of radiation detectors, which makes it possible to register a low-intensity, low-energy flow of charged particles due to low energy losses in the «input» and «output» windows;

based on the studied and developed scientific, technical and technological features, three types of SPDs were manufactured: surface-barrier, heterojunction Al- $\alpha\text{Ge-pSi-Au}$ and Al- $\alpha\text{Si-p-i-n-Au}$ silicon-lithium ionizing radiation detectors of large area and thickness of the sensitive region (100 -120 μm);

for the first time, a domestic device (radonimeter) was manufactured based on the developed semiconductor detector, which has a large sensitive surface area, for measuring the volumetric activity of radon in air, water and soil and for registering alpha particles with energy (3.5-8 MeV), which is equipped with the necessary

electronic components and a computer program for accumulating and processing results;

for the first time, measurements of the volumetric activity of radon in the soil air on the territory of the republic were carried out using a domestically created radon meter; escalations of the volumetric activity of radon are associated with deformation processes of the earth's crust in the study area during the period of activation of tectonic processes.

Implementation of research results. Based on the results of studies of large-sized silicon detectors that recording and ionizing of radiation with high sensitivity, the development and production of a radonometer:

the patent was received from the Intellectual Property Agency of the Republic of Uzbekistan for the utility model «Device for measuring the volumetric activity of radon in air, water and soil» (No. FAP 02142). The detector used in the device has a minimum thickness of the «dead layer», which increases the sensitivity of the device and makes it possible to register a low-intensity, low-energy flow of charged particles, and the design of the device allows measurements in 2π - geometry in real time;

completed business agreement with NMMC No. 01-05-02/1 dated 01.04.2019 «Development and production of radiometers based on semiconductor charged particle detectors for measuring the volumetric activity of radon in air, water and soil». The first developed domestic certified radiometer (certificate No. 001, «O'zstandart») based on highly sensitive. The th large-area detector operates on the territory of the NMMC, performing scientific and environmental tasks to ensure the safety of employees;

the business agreement with AMMC No. 63-2144 YUR dated April 13, 2021 was completed. «Development and production of radiometers: a radonometer for measuring the volumetric activity of radon in air, water and soil, an alphaspectrometer for measuring small activities of alpha radiation in materials, a gammameter for measuring small activities of gamma radiation in materials.» Operating experimental laboratory devices have been developed and manufactured - Radiometers: two sets of «Radonometer» and one set of «Gammameter», based on highly efficient silicon detectors (diameter 110 mm, thickness 100-120 microns). Measurements of volumetric radon activity by the developed radiometers do not differ from the results carried out by a certified foreign radiometer.

Publication of research results. On the topic of the dissertation, 25 scientific papers have been published, including 9 articles in scientific journals recommended by the Higher Attestation Commission for publication of the main scientific results of the doctoral dissertation, 1 patent for a utility model and 2 certificates for a software product have been received.

The structure and volume of dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, findings by chapter, conclusion, list of references and applications. The volume of the dissertation is 121 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть, part I)

1. Полезная модель РУз №FAP 02142 Муминов Р.А., Раджапов С.А., Муллағалиева, М.А. Зуфаров, Раджапов Б.С./ Устройство для измерения объемной активности радона в воздухе, воде и почве.//Бюлл №11. – с.131. 30.11.2022 й.

2. Muminov R. A., Radzhapov S. A., Mullagalieva F. G., Radzhapov B. S., and Zufarov M. A. Development of a large-sized highly sensitive detector based on α -Si-*p-i-n* heterostructures for radonometers// Atomic Energy, Vol. 131, No. 6, pp. 354-357. April, 2022. doi 10.1007/s10512-022-00892-2. (Scopus IF 0.55)

3. Radzhapov B. S., Radzhapov S. A., Mullagalieva F. G., Zufarov M. A. The development of semiconductor detectors for radiometers of alpha-radiation and the examination of the volumetric activity of radon in various areas// Radiation Detection Technology and Methods, vol. 7, pp.457-463 <https://doi.org/10.1007/s41605-023-00406-z>. (Scopus IF 0.822)

4. Раджапов С.А., Раджапов Б.С., Рахимов Р.Х. Особенности технологии изготовления кремниевых поверхностно-барьерных детекторов с большой чувствительной рабочей площадью для измерения активности естественных изотопов. //Computational Nanotechnology. – Москва. – 2018. – №1. – 151-154с. (01.00.00, №60)

5. Раджапов С.А., Раджапов Б.С., Джанклич М., Зуфаров М.А., Рахимов Р.Х. Полупроводниковые детекторы ядерного излучения на основе гетерепереходных структур Al- α Ge-*p*Si-Au для измерения мало интенсивных ионизирующих излучений. //Computational Nanotechnology. – Москва. – 2018. – №3, – 65-67с. (01.00.00, №60)

6. Muminov R.A., Radzhapov S.A., Mullagalieva F.A., Radzhapov B.S., Zufarov M.A., Nurboev K.M., Akhmedov G.M., Development of High-Efficiency Silicon Detectors and Electronic Components for Radiometer of Alpha Radiation// Instruments and Experimental Techniques, 2021, Vol. 64, № 3, – pp 444-449. <https://doi.org/10.1134/S0020441221030222> (Scopus IF 0.57)

7. Раджапов С.А.,Рахимов Р.Х., Раджапов Б.С., Зуфаров М.А., Шарифов Ш.Ф. Разработка радиометра на основе кремниевых детекторов с большой чувствительной площадью. //Computational Nanotechnology. – Москва – 2019. – №1. – 65-68с. (01.00.00, №60)

8. Муминов Р.А., Раджапов С.А., Муллағалиева Ф.Г., Раджапов Б.С., Зуфаров М.А, Разработка радиометра для экологических и геофизических исследований// ДАН РУз, 2021, №1. – 30-34с. (01.00.00, №7)

9. Раджапов С.А.,Рахимов Р.Х., Раджапов Б.С., Зуфаров М.А. Кремний-литиевые ΔE - детекторы альфа излучения для радиометра. //Computational Nanotechnology. – Москва – 2019. – №2, – 157-159с. (01.00.00, №60)

10. Раджапов С.А., Рахимов Р.Х., Раджапов Б.С., Зуфаров М.А. Расчет этапов технологического процесса изготовления ПП-детекторов с использованием компьютерного математического моделирования и изготовление альфа радиометра на их основе. //Computational Nanotechnology. – Москва – 2020. Vol.7. – №2, – 21-28с. (01.00.00, №60)

II бўлим (II часть, part II)

11. Свидетельство на программные продукты РУз № **DGU 05946** Раджапов Б.С., Эргашев К. Программа для микроконтроллера радиометра радона и радия.

12. Свидетельство на программные продукты РУз № **DGU 18817**. Раджапов Б.С, Эргашев К. Э./Ионлаштирувчи нурланишни қайд қилувчи GSM модулли «Алфаметр», «Бетаметр» ва «Гаммаметр» қурилмаларининг микроконтроллера дастури таъминоти.

13. Муминов Р.А., Раджапов С.А., Раджапов Б.С., Зуфаров М., Мирзаев А.У. Исследование электрофизических и радиометрических характеристик кремниевых поверхностно-барьерных детекторов с большой чувствительной площадью. //IV Международная конференция «Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниковых микро– и наноструктурах» 25-26 мая, 2018 г. – Фергана. – с.224-226.

14. Раджапов С.А., Раджапов Б.С., Джанклич М. Полупроводниковые детекторы ядерного излучения на основе гетерепереходных структур Al- α Ge-pSi-Au для измерения мало интенсивных ионизирующих излучений. //Научно практическая конференция «Использование возобновляемых источников энергии: новые исследования, технологии и инновационные подходы» 25-26 сентября, 2018 г. – Ташкент. – с.169-171.

15. Раджапов С.А., Раджапов Б.С., Зуфаров М., Музафаров А.М., Шарифов Ш.Ф., Бурханов А.К. Исследование электрофизических и радиометрических характеристик детекторов ядерного излучения на основе гетерепереходных структур Al- α Ge-pSi-Au большого диаметра. //Материалы международной конференции «Перспективы инновационного развития горно-металлургического комплекса» 22-23 ноября. – Навои: 2018. – с. 472-473.

16. Раджапов С.А., Раджапов Б.С., Зуфаров М., Эргашев К., Шарифов Ш.Ф. Радиометр радона на основе кремниевых детекторов с большой чувствительной площадью. //Материалы международной научно-практической конференции «Ауэзовские чтения-17» 11-12 апреля, 2019 г. – Шымкент, – с. 267-270.

17. Раджапов Б.С., Эргашев К. Разработка и изготовление кремний-литиевых детекторов больших размеров для радиометра радона. //Сборник материалов республиканской конференции «Роль одаренной молодежи в развитии физики». Ташкент, НУУз, 18 мая 2019 г. – с.361-363.

18. Муминов Р.А., Раджапов С.А., Раджапов Б.С., Чепунова В.И., Гурская А.В., Долгополов М.В. Кремниевые детекторы заряженных частиц с небольшими утечками, измерение бета-спектров преобразователей. //

VI Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2020» 11-14 февраля, 2020 г. – Москва. – с.250-251.

19. Раджапов С.А., Раджапов Б.С., Зуфаров М.А. Разработка высокоэффективных кремниевых детекторов и электронных блоков для радиометра альфа излучения.//Международная конференция «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» в онлайн режиме (ZOOM платформе) 22-23-сентября, 2020 г. – Ташкент. – с. 122-126.

20. Муминов Р.А., Эргашев Г.Ж., Раджапов Б.С., Румянцева Е.В. Особенности кремниевых p-n структур с большой чувствительной поверхностью и областью объемного заряда.// Международная научно-рецензируемая онлайн конференция «Тенденции развития современной физики полупроводников: проблемы, достижения и перспективы» 28 мая 2020 г. – Ташкент. – с. 10-17

21. Раджапов С.А., Муллағалиева Ф.Г., Раджапов Б.С., Зуфаров М.А. Разработка радиометр альфа излучения //VII-Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛАПЛАЗ-2021, Москва 2021 г. – с.470-471.

22. Раджапов С.А., Муллағалиева Ф.Г., Раджапов Б.С., Зуфаров М.А., Эргашев К.Э. Разработка и изготовление системы сцинтиллятор –Si(Li) p-i-n фотодетектор для спектрометрии гамма излучений в материалах и для экологических исследований// Международная конференция «Новые материалы и гелиотехнологии», г.Паркент, Узбекистан. 2021 г, – 143-145с.

23. Раджапов С.А., Муллағалиева Ф.Г., Раджапов Б.С., Зуфаров М.А. Разработка высокочувствительных детекторов больших размеров на основе гетероструктур αSi –p-i-n для радиометров и исследование объемной активности радона в различных средах. //III International Scientific Forum «NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGIES» dedicated to the 30th anniversary of Independence of the Republic of Kazakhstan. – 2021, pp.227.

24. Radzhapov S.A., Mullagalieva F.G., Radzhapov B.S., Zufarov M.A., Nurboev K.M. Development of high efficiency radiometers for examination of the volumetric activity of radon decomposition products in various areas. //Международная конференция «Современные проблемы ядерной энергетики и ядерных технологий», Ташкент 23-25 ноября 2021 г. – pp. 275-277.

25 Раджапов С.А., Муллағалиева Ф.Г., Раджапов Б.С., Зуфаров М.А. Разработка высокоэффективных полупроводниковых детекторов и радиометров ионизирующих излучений// VIII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛАПЛАЗ-2022. стр. 394-395, Москва – 2022.

26. Раджапов С.А., Зуфаров М.А., Раджапов Б.С., Нурбоев К.М. Разработка высокоэффективных кремниевых детекторов и электронных блоков для радиометра альфа, бета и гамма излучения./ Международная научно-практическая конференция «Интеграция науки, образования и производства – залог прогресса и процветания», посвященная 5-летию основания Навоийского отделения Академии наук Республики Узбекистан. 9-10 июня, стр. 125-128, Навои – 2022.

27. Муминов Р.А., Раджапов С.А., Муллағалиева Ф.Г., Раджапов Б.С., Зуфаров М.А. Разработка радиометров для экологических исследований на основе высокоэффективных кремниевых детекторов больших размеров./ Fizika – 2022 ikkinchi Forumi, 4-5 октябрь, Наманган 2022.

28. Раджапов С.А., Муллағалиева Ф.Г., Раджапов Б.С., Нурбоев К.М., Отабоев С.К. Разработка радиометрического устройства на основе кремниевых детекторов больших размеров для экологических исследований./Science and education in the modern world: challenges of the XXI century», Astana, Kazakhstan, 10-15 February 2023. с. 35-37.

Автореферат «_____» журнали таҳририяида таҳрирдан ўтказилди
(«___»_____2024 йил).

Босишга рухсат этилди: «___»_____2024 йил.
Бичими 60x84 ¹/₁₆, «Times New Roman»
гарнитура рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табағи 3,5. Адади: 100. Буюртма: № _____.

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.