

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ  
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА  
ИЛМИЙ -ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ  
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.03/30.12.2019.FM/Т.01.12 РАҚАМЛИ  
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**ИБОДУЛЛАЕВ ШАХБОЗ НИЗОМ ЎҒЛИ**

**НАНОСТРУКТУРАЛИ КРЕМНИЙ АСОСИДА ФИЗИКАВИЙ  
КАТТАЛИКЛАРНИ ЎЛЧАЙДИГАН ЮҚОРИ СЕЗУВЧАНЛИККА ЭГА  
ДАТЧИКЛАР ЯРАТИШ**

**01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси**

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

**Тошкент – 2022**

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

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

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

**Ибодуллаев Шахбоз Низом ўғли**

Наноструктурали кремний асосида физикавий катталикларни  
ўлчайдиган юқори сезувчанликка эга датчиклар яратиш. .... 3

**Ибодуллаев Шахбоз Низом угли**

Разработка высокочувствительных датчиков физических величин на  
основе кремния с наноструктурами. .... 21

**Ibadullaev Shakhboz Nizom ugli**

Development of highly sensitive sensors of physical quantities based on  
silicon with nanostructures. .... 39

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

Список опубликованных работ  
List of published works. .... 44

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ  
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА  
ИЛМИЙ -ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ  
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.03/30.12.2019.FM/Т.01.12 РАҚАМЛИ  
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**ИБОДУЛЛАЕВ ШАХБОЗ НИЗОМ ЎҒЛИ**

**НАНОСТРУКТУРАЛИ КРЕМНИЙ АСОСИДА ФИЗИКАВИЙ  
КАТТАЛИКЛАРНИ ЎЛЧАЙДИГАН ЮҚОРИ СЕЗУВЧАНЛИККА ЭГА  
ДАТЧИКЛАР ЯРАТИШ**

**01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси**

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

**Тошкент – 2022**

Фалсафа доктори (PhD) диссертация мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2019.2.PhD/T1049 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Тошкент давлат техника университети бажарилган.

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

Илмий раҳбар:

**Муҳаммад Кабир Баҳадирханов**

физика-математика фанлари доктори, академик

Расмий оппонентлар:

**Зайнабидинов Сирожиддин Зайнабиддинович**  
физика-математика фанлари доктори, академик

**Мамадалиева Лола Камилжоновна**  
техника фанлари доктори, доцент

Етакчи ташкилот:

**Муҳаммад Ал-хоразмий номидаги Тошкент ахборот технологиялари университети**

Диссертация ҳимояси Ўзбекистон Миллий университети ҳузуридаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 рақамли Илмий кенгашнинг 2022 йил « 4 » 04 соат 10<sup>00</sup> даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 100057, Ўзбекистон, Тошкент шаҳри, Янги Олмазор кўчаси, 20-уй. Тел. (99871) 248-79-94, факс: (99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz, ЎЗМУ қошидаги ЯФМ ИТИ мажлислар зали).

Диссертация билан Рақамли таълим технологияларини жорий этиш бўлимида танишиш мумкин. (38 рақам билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100057, Ўзбекистон, Тошкент шаҳри, Янги Олмазор кўчаси, 20-уй. Тел.: (+99871) 248-79-59; e-mail: info@ispm.uz.)

Диссертация автореферати 2022 йил « 16 » 03 . \_\_\_\_\_ кунни тарқатилди.  
(2022 йил « 16 » 03 даги 38 рақамли реестр баённомаси).



**Ш.Б. Утамурадова,**

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

**Ж.Ж. Хамдамов,**

Илмий даражалар берувчи  
Илмий кенгаш илмий котиби, PhD

**Х.К. Арипов,**

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

## **КИРИШ (Фалсафа доктори диссертациясининг (PhD) аннотацияси)**

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Ҳозирги кунда жаҳонда ҳажмий наноструктурали яримўтказгич материалларни олиш технологиясини ишлаб чиқиш ва уларнинг хоссаларини ўрганиш бўйича жуда жадал ишлар олиб борилмоқда. Бу эса бир ўлчамли наноструктурали материалларга қараганда бундай материалларнинг жуда кенг имкониятлари билан боғлиқ бўлиб, улар асосида янги оптоэлектроник ва фотوماгнит қурилмалар ва ҳамда юқори самарали датчикларларни яратиш билан боғланган.

Дунё миқёсида мавжуд датчиклар электр параметрлари фақат бир турдаги физик катталикларни (ҳарорат, ёруғлик, босим, магнит майдон) сезадиган яримўтказгич материаллар асосида яратилмоқда. Бир вақтнинг ўзида бир неча физик катталикларни қайд қилувчи датчиклар, яъни кўп функцияли датчиклар яратиш учун физикавий параметрлари бир вақтнинг ўзида бир неча физик катталикларга юқори сезувчанликка эга бўлган материаллар талаб қилинади. Бироқ, кўпчилик яримўтказгич материаллар бундай хоссаларга эга эмас. Шунинг учун битта яхлит кристалл асосида кўп функционалли датчикларни ишлаб чиқиш ва яратиш учун янги турдаги яримўтказгич материаллар талаб қилинади.

Битта яхлит кристалл асосида янги кўп функцияли датчиклар яратишнинг замонавий истиқболли усулларида бири марганец киришма атомларининг нанокластерларига эга бўлган кремнийдир. Бу муаммоларни ҳал қилиш нафақат ҳар хил янги турдаги кўп функцияли датчикларни ишлаб чиқишда бу материаллардан амалий фойдаланиш, балки киритилган марганец киришма атомлари нанокластерларини шаклланиши механизмини янада чуқурроқ тушуниш учун жуда муҳим ва долзарбдир.

Сўнгги йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегиясига мувофиқ илмий-тадқиқот ва истиқболли инновацион фаолиятни рағбатлантириш, инновацион ютуқларни амалиётга жорий этишнинг самарали долзарб механизмларини яратиш масалаларига алоҳида эътибор қаратилмоқда. Замонавий талабларга жавоб берадиган илмий натижалар олишга қаратилган фаол реал тадбиркорлик, истиқболли инновацион ғоя ва технологияларни қўллаб-қувватлаш. Хусусан, наноэлектрониканинг энг муҳим вазифаси ташқи таъсирларга чидамли нанокластерларли (квант нукталари) кремнийни олиш, яъни барқарор параметрларга эга яримўтказгичли қурилмаларни ва айниқса кўп функцияли датчикларни тайёрлашда ундан фойдаланиш мумкин. Шу жиҳатдан бир вақтнинг ўзида бир неча физик катталикларни қайд қилувчи датчикларни яратиш, яъни микроэлектроника ва оптоэлектроника учун кўп функцияли датчикларни яратиш долзарб масаладир.

Диссертация ишида олиб борилган тадқиқотлар маълум даражада Ўзбекистон Республикаси Президентининг ПҚ-4947 7 февралдаги "2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида" ги Фармони ва ПҚ-3875 "Миллий

тадқиқот ядро университети "МТЯУ" Федерал давлат таълим автоном Олий таълим муассасасининг Тошкент филиалида 20 июл 2018 йилдаги фаолиятини йўлга қўйиш ва ташкил этиш тўғрисида" Президент қарорларида, ПҚ-5234" сунъий интеллект технологияларидан фойдаланиш учун махсус режимни жорий этиш чора-тадбирлари тўғрисида " 26.08.2021 й. ПҚ-5241 "олий, ўрта махсус, касб-хунар таълими муассасалари, шунингдек, саноат ташкилотлари билан ўқув жараёнининг алоқасини мустаҳкамлаш чора-тадбирлари тўғрисида" ги 31.08.2021, ПҚ-3151, ПҚ-3365-сонли "илмий-тадқиқот муассасалари инфратузилмасини янада мустаҳкамлаш ва инновацион фаолиятни ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида" ги 1 ноябр 2017 йил, 3899 йил 6 августдаги "илмий ва инновацион фаолиятни интеграциялаш тизими самарадорлигини ошириш чора-тадбирлари тўғрисида" ги ПҚ-2018-сон, шунингдек, физика соҳасида фундаментал ва амалий тадқиқотларни янада чуқурроқ олиб бориш, мамлакат иқтисодиётининг турли тармоқларининг реал эҳтиёжлари асосида истиқболли инновацион технологияларни ишлаб чиқиш ва илмий жараёнга иқтидорли ёш олимлар ва иқтидорли талабаларни кенг жалб этиш каби вазифаларни бажаришга хизмат қилади.

**Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги.** Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг III. «Энергия, энергия ресурсларини тежаш, транспорт, ракета ва космик техникаси, авиация, робототехника, машинасозлик ва асбобсозлик; замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника, электрон асбобсозликни ривожлантириш» устувор йўналишларига мувофиқ бажарилган.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Ҳозирги кунда нанотехнология ва наноэлектроника соҳаси мутахассислари киришмали кластерларини олиш муаммоларига ва хусусан, бошқарилувчи структура ва таркибга эга бўлган турли киришмалар асосида нанокластерлар олиш технологиясига катта эътибор қаратмоқдалар. Қуйидаги ишларида М.Г. Милвидский, И.В. Бажин, Ю.А. Астров турли яримўтказгичларда киришмали кластерларининг кристалл панжарада тақсимланишини ва ҳолатини ўрганиб чиқдилар. Нанокластерларнинг атом тузилиши ва уларнинг турли киришмали атомлар билан атомлараро ўзаро таъсири Е. А. Михайлов, А. Т. Косилов, Т. Тишковский томонидан тадқиқ қилинди. Киришмали атомларининг кремнийдаги турли радиацион нуқсонлар билан ўзаро таъсири Т.Е. Пагава, А. А. Лебедев, А. Р. Долголенко, кремнийда кадмий атомининг мавжудлиги Баю Л. Б, Уолзе Ж. Б, Лин Й. Р, Чен Л. С, Накаи К, Хрант Н, термик нуқсонлар литий ўзаро таъсири Е. А. Климанов, Вебер Е, Ритте Х. Г, Чжан Сянли, Сун Зха\*Вей томонидан ўрганилган.

Яримўтказгичли датчикларни ишлаб чиқариш фаолияти билан асосан Ендевсо, Соолите (Ақш), Хумисар (Япония), Мида, Метран, Signal (Россия) каби хорижий фирмалар, тадқиқот гуруҳлари ва олимлар жалб қилинган. Ҳозирги кунда ўлчов қурилмаларни ишлаб чиқиш ва моделлаштириш соҳасида ушбу йўналишга катта ҳисса қўшган рус олимларидан А. Е. Панич,

В. М. Стучебникова, В. Я. Распопов, П. Г. Михайлов, шунингдек хорижий Е. Е. Еллер, Н. Jaffe, Р. G. Jacks, Ж. Фраден, А. D. Kurtz ва бошқаларни мисол қилиб келтириш мумкин.

Ўзбекистонда академик А. Т. Мамадалимов ҳар хил киришмалар билан легирланган кремнийда фотоўтказувчанликни температура сўнишини тадқиқ қилди, академик Р. А. Муминовнинг илмий мактабида эса литий билан легирланган кремний асосида ядровий нурланиш детектори ишлаб чиқилган. Ш. Махкамов, Н. А. Турсунов, К. Р. Абдурахманов ишларида кремнийли курилмаларда радиацион нуқсонларни назорат қилиш усули ишлаб чиқилган. Академик С. Зайнобиддинов ва профессорлар С. В. Утамурадова ва Н. А. Тургуновлар кремний таркибида никел ва марганецнинг киришма атомларини микроразрларини ҳосил бўлиш механизмларини ўрганишган. Академик М. К.Баҳодирхонов илмий мактабида, профессорлар Н. Ф. Зикриллаев, Г. Х. Мавлонов ва Х. М. Илиев кремнийда магнит нанокластерлар ҳосил бўлишини илмий асослаб бердилар. МДП тузилмаларни ташқи омилларга таъсирини физик жараёнларини профессорлар К. А. Исмоилов ва С. I. Власовлар томонидан батафсил ўрганилди.

**Диссертация мавзусининг бажарилган олий таълим муассасаси илмий тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги.** От-Ф2-55 "Ноёб функцияларга эга наноматериалларнинг янги синфи сифатида киришмали кластерларини шакллантириш асосида ҳажмий наноструктурали кремний олишининг илмий асосларини ишлаб чиқиш" (2017-2020) давлат грантлари дастурига мувофиқ диссертация иши ТошДТУнинг "Рақамли электроника ва микроэлектроника" кафедрасида тўлиқ бажарилди.

**Тадқиқотнинг мақсади** ягона кремний кристали асосида физик катталарни (ҳарорат, ёруғлик, магнит майдонлар) ўлчайдиган кўп функцияли датчикларини яратиш имкониятларини физик ва технологик асосларини аниқлаш.

**Тадқиқот вазифалари:**

марганец киришма атомлари ( $Si\langle B, Mn \rangle$ ) нанокластерларига эга кремний олиш;

ушбу ( $Si\langle B, Mn \rangle$ ) материалнинг магнит, ҳарорат ва фотоэлектрик хусусиятларини тадқиқ қилиш ва унга асосланган физик катталарни ўлчайдиган янги датчикларини ишлаб чиқиш;

турли хил ташқи таъсирларни (ҳарорат, электр майдони ва ёруғлик) бир вақтнинг ўзида қўллаш орқали манфий магнит қаршилиқни ўзгаришини тадқиқ қилиш;

марганец атомларининг нанокластерлари мавжуд ягона кремнийли кристалл асосида физик катталарни ўлчайдиган кўп функцияли датчикларини ишлаб чиқиш ва яратиш имкониятини кўрсатиш;

ишлаб чиқилган кўп функцияли датчикларнинг физик параметрлари ва сезгирлигини аниқлаш;

**Тадқиқот объекти** сифатида кўп функцияли датчик яратиш учун КДБ – 3 маркали монокристалл кремний танлаб олинди (бор концентрацияси  $7 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>). Марганец киришма сифатида танланган.

**Тадқиқот мавзуси** кремний кристалл панжарасидаги марганец атомлари нанокластерларининг параметрлари ва хусусиятларини бошқаришнинг технологик жараёни орқали ўта юқори сезувчанликка эга физикавий катталикларни ўлчайдиган датчиклар яратиш

**Тадқиқот усуллари.** Наъмуналарнинг хусусиятларини экспериментал тадқиқ қилиш фототок кинетикасини таҳлили, вольт–ампер, магнит, ҳарорат ва спектрал характеристикалари таҳлили тўлиқ ўрганилди. Намуналарнинг электр параметрлари Холл эффекти усули ёрдамида тадқиқ қилинди. Фототокнинг спектрал боғлиқлигини ўрганиш учун махсус криостат билан таъминланган ИКС-21 монохроматордан фойдаланилди (ўлчашлар вақтида намуналарнинг ҳарорати суюқ азот (77 К) ва хона ҳарорат оралиғида бўлди).

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** куйидагилардан иборат:

марганец атомлари билан легирланган кремнийли фоторезисторга берилган кучланиш 0.1-30 В оралиғида ва уни ўзгартириш орқали ҳарорат  $T=100$  К да фотосезгирлик қизил чегарасини  $\lambda=4.6$  мкм дан 12 мкм гача ошириш мумкинлиги аниқланган;

диффузия технологиясини яхшилаш туфайли кремнийда манфий магнитқаршилиқнинг хона ҳароратида  $T = 300$  К да 500% энг катта қиймати аниқланган;

диффузия технологияси орқали ҳосил қилинган марганец атомларининг нанокластерларига эга кремний асосида физик катталикларни ўлчайдиган кўп функцияли датчикларни яратиш учун энг оптимал солиштирма қаршилиқ  $5 \cdot 10^3$  Ом·см материал еканлиги аниқланган;

кремнийда манфий магнитқаршилиқ эффектига асосланган кўп функцияли датчик яратиш имконияти кўрсатилган;

илк бор кремний кристалл панжарасида марганец атомларининг нанокластерларига эга яхлит кремний кристали асосида физик катталикларни ўлчайдиган кўп функцияли датчиклар конструкцияси ишлаб чиқилган ҳамда ташқи таъсирлар мавжудлигида ( $T = 300$  К) асосий параметрлари аниқланган;

**Тадқиқотнинг амалий натижалари:**

илк бор кремнийни кристалл панжарасида марганец атомларининг нанокластерларига эга битта яхлит кремний кристали асосида физик катталикларнинг кўп функцияли датчиклар конструкцияси ишлаб чиқилган;

ўтказилган тадқиқотлар марганец киришма атомларининг нанокластерларига эга кремний ҳарорат ва ёруғлик учун юқори сезувчанликка эга ва кўп функцияли датчикларни яратишда ундан фойдаланиш мумкинлигини кўрсатилди, яъни ўлчов каналлари (ҳарорат ва ёруғлик) кўрсаткичларининг рақамли тузатишларидан ва ҳар бир каналнинг нозизиқийлигидан фойдаланиш шарт асосида;

**Олинган тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** анъанавий, яхши синовдан ўтган экспериментал усуллардан фойдаланиш, шунингдек олинган катта миқдордаги экспериментал маълумотлар ва олинган натижаларнинг

кайта тикланиши билан таъминланади. Экспериментал натижаларнинг физик талқинининг замонавий назарий тушунчаларга мослиги. Олинган натижалар Тошкент Давлат техника университетида етакчи мутахассислар (М.К. Баходирхонов, Н.Ф. Зикриллаев, Ҳ.М. Илиев, К.С. Аюпов, Г.Х. Мавлонов, С.В. Исомов, Б.К. Исмаилов ва бошқалар) иштирокида ўтказилган кўплаб халқаро илмий анжуман ва семинарларда кенг муҳокама қилинган.).

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

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти шундан иборатки, бир хил турдаги намунада бир қатор қизиқарли электр, фотоэлектрик ва магнит ҳодисалар кузатилди, шунингдек, маълум бўлган яримўтказгич материалларидан ҳеч бирида ҳали аниқланмаган янги фотомагнит ва термо-фотомагнит ҳодисалар кузатилди. Мавжуд шароитларда юқоридаги айtilган ҳодисаларни кузатиш учун махсус танланган киришма атомлари билан легирланган турли хил яримўтказгич материаллар талаб қилинади. Бундай ҳолда, солиштира қаршилиги  $\rho=5 \cdot 10^3$  Ом·см  $p$ -типи бўлган нанокластерли кремний жуда юқори киришмали фотосезгирликка ва ҳона ҳароратида аномал юқори магнитқаршилиқка эга эканлиги кузатилди.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти олинган материаллар асосида юқори сезгирликка эга физик катталикларни ўлчайдиган кўп функцияли датчикларнинг тубдан янги синфлари яратилиши мумкин. Кенг доирадаги ёритиш ёки ҳарорат ёрдамида материалларни магнитқаршилигини назорат қилиш ёрдамида фотоспиритроника ва магнетофотониканинг янги илмий йўналишларини яратиш учун асос бўлиб хизмат қилиши мумкин.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Марганец атомларининг нанокластерларига эга кремний асосида физик катталикларни ўлчайдиган юқори сезгирликка эга датчикларини тадқиқ қилиш натижалари куйидаги ишлаб чиқаришда жорий қилинди:

Фотон акциядорлик жамоаси томонидан яримўтказгичли асбобларни ишлаб чиқаришда солиштира қаршилиги  $\rho=5 \cdot 10^3$  Ом·см бўлган легирланган марганец атомларининг нанокластерига эга кремнийнинг параметрларидан фойдаланилган. (Ўзэлтехсаноат акциядорлик жамоасининг 2021 йил 22 июльдаги № 01/9-14-2420 - сон малумотномаси). Илмий натижаларни қўллаш асосида «ФОТОН» АЖ томонидан марганец атомларининг нанокластерлари мавжуд кремний билан юқори ҳароратли яримўтказгичли датчикларни олиш имконини беради;

марганец атомларининг нанокластерлари мавжуд ягона кремний кристали асосида физик катталикларни ўлчайдиган кўп функцияли датчиклар ишлаб чиқилган ва "ФОТОН" акциядорлик компаниясида жорий етилган ("Ўзелтехсаноат" аксиядорлик жамоасининг № 345 2021 йил -25 июлдаги сонли маълумотномаси). Олинган илмий натижалар бутунлай янги кўп функционалли датчикларларни (ҳарорат ва ёруғлик) ишлаб чиқишда қўлланилди.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Диссертация ишини бажаришда олинган асосий илмий натижалар 6 та халқаро, 3 та Республика

тоифасидаги илмий-амалий анжуманларда ҳамда ТДТУда мунтазам ўтказиладиган илмий семинарларда маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.** Диссертация мавзуси бўйича жами 24 та илмий ишлар, Ўзбекистон Республикаси Олий Аттестация Комиссияси ҳузуридаги докторлик диссертациялари илмий натижаларининг нашр этишга тавсия этилган илмий нашрларда 9 та мақола эълон қилинди, шу жумладан улардан 3 таси республика ва 6 таси хорижий журналларда чоп этилган.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Тақдим этилган диссертация иши кириш, 4 та боб, хулоса ва 94 номдаги адабиётлар рўйхатини ўз ичига олган.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

**Кириш қисмида** диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурлиги асосланган, тадқиқотнинг республика фан ва техника ривожланишининг устувор йўналишлари билан боғлиқлиги белгиланган, муаммони ўрганиш даражаси очиқ берилган, мақсад ва вазифаларни шакллантирилган, тадқиқот объектлари, мавзулари ва тадқиқот усуллари тақдим этилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий аҳамияти баён этилган, натижаларни амалиётга жорий этиш, ишни тасдиқлаш ва нашр этиш, шунингдек диссертациянинг ҳажми ва тузилиши ҳақида қисқача маълумот берилган.

Диссертациянинг **"Яримўтказгичли датчиклар, муаммолари ва истикболлари"** деб номланган биринчи бобида, яримўтказгичли датчикларни (ЯД) ривожланишидаги ҳозирги ҳолати ва сўнгги илмий ютуқлари, ЯД сезгирлигини чекловчи омиллар ва сезгирлигини ошириш йўллари таҳлил қилинган. ЯД нинг сезгирлигини баъзи технологик ечимлар билан ошириш имкониятлари ҳам таҳлил қилинган. Мавжуд назарий ва экспериментал маълумотларни таҳлил қилиш асосида диссертация ишининг вазифалари шакллантирилган.

Диссертациянинг **"Марганец атомлари кластерлари мономагнит структуралари ва нанокластерлари мавжуд кремнийни ишлаб чиқариш технологияси"** деб номланган иккинчи бобида марганец атомлари кластерлари мавжуд кремний материални олишнинг диффузия технологиясининг хусусиятлари тадқиқ қилинган.

Марганец атомларининг нанокластерлари мавжуд кремний олиш учун  $\rho=2,3,5,10$  Ом·см (бор концентрацияси мос равишда  $1 \cdot 10^{16}$ ,  $4 \cdot 10^{15}$ ,  $2 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>) солиштирма қаршиликка эга бўлган саноат монокристалли кремнийдан фойдаланилган. Намуналарнинг ўлчамлари  $8 \times 3 \times 0,8$  мм<sup>3</sup>. Марганец диффузияси газли фазада ҳавоси сўрилган кварцли ампулаларда (вакуум  $-10^{-6}$  мм.см.уст.) амалга оширилган.

Марганец диффузияси  $T=1055 \div 1080$  °С оралиғида  $40 \div 50$  °С қадам билан кафедрада ишлаб чиқилган ҳамда патентланган технологияга мувофиқ ва бир хил тезликда совутиш ва *p*- турдаги кремнийни олиш амалга оширилган.

Марганец нанокластерлари мавжуд кремний намуналарининг асосий параметрлари 1-жадвалда келтирилган.

1-жадвалдан кўришиб турибдики барча намуналарнинг ўтказувчанлик ва солиштирма қаршилик туридан қатъий назар, электронлар ва ковакларнинг ҳаракатчанлиги сезиларли даражада кам легирланмаган кремний электронлар ва ковакларининг ҳаракатчанлигига нисбатан.

1-жадвал

Mn наносластерлари мавжуд кремний намуналарининг асосий параметрлари.

Намуналар гуруҳ рақами	$\rho$ , Ом·см	Ўтказувчанлик тури	Заряд ташувчиларнинг концентрацияси, см <sup>-3</sup>	$\mu$ , см <sup>2</sup> /В·с
1	$1,5 \div 2 \cdot 10^2$	$p$	$1,69 \cdot 10^{14}$	180÷190
	$2,5 \div 3 \cdot 10^2$	$p$	$1,26 \cdot 10^{14}$	160÷167
	$8 \div 9 \cdot 10^2$	$p$	$7,98 \cdot 10^{13}$	85÷90
	$7 \div 8 \cdot 10^3$	$p$	$1,22 \cdot 10^{13}$	63÷64
	$1 \div 1,2 \cdot 10^4$	$p$	$6,85 \cdot 10^{12}$	75÷78
	$1,5 \div 2 \cdot 10^4$	$p$	$3,86 \cdot 10^{12}$	80÷82
2	$3 \div 4 \cdot 10^4$	$p$	$1,59 \cdot 10^{12}$	95÷100
	$1 \div 1,2 \cdot 10^5$	$p$	$3,28 \cdot 10^{11}$	158÷160
3	$1 \div 1,2 \cdot 10^5$	$n$	$6,76 \cdot 10^{10}$	750÷800
	$4 \div 5 \cdot 10^4$	$n$	$1,44 \cdot 10^{11}$	850÷900
	$2 \div 3 \cdot 10^3$	$n$	$2,08 \cdot 10^{12}$	~1000

Диссертациянинг "Марганец атомлари нанокластерлари мавжуд кремнийнинг функционал имкониятлари" номли учинчи бобида киришма атомлари нанокластерлари мавжуд кремнийнинг электрик, фотоэлектрик, (фотосезгирлиги, чегаравий сезгирлиги квант самарадорлиги), термо ва магнит хусусиятларини ўрганиш бўйича экспериментал натижалар кенг маънода тақдим этилган ҳамда бундай материаллар асосида датчиклар яшашда кенг имкониятлар мавжудлиги ва албатта ноёб материаллар сифатига эга эканлиги кўрсатиб берилган.

ИҚ фоторезисторни яратиш учун Чохралский усилида ўстирилган солиштирма қаршилиги с  $\rho=3$  Ом·см ( $p=7 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>)  $p$ -монокристалли кремний ишлатилган. Дастлабки намуналар параллелепипед шаклида кесилган  $a = 1$  м,  $b = 3$  мм,  $c = 2$  мм. марганец диффузияси газ фазасида ҳароратни аста-секин кўтариб,  $T = 1075 \div 1080$  °С да  $t=10 \div 20$  дақиқа мобайнида ушлаб, тез совутиш 200°С/сек билан амалга оширилди.

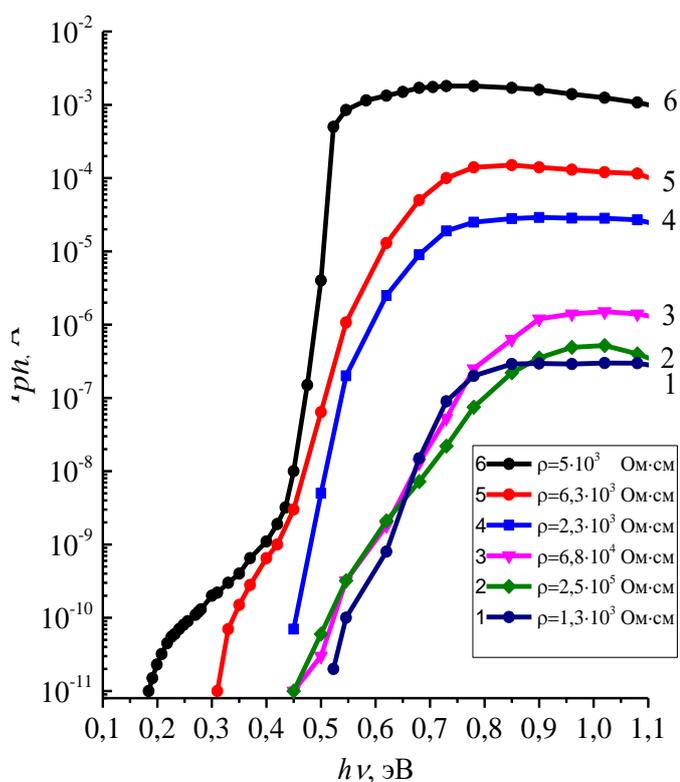
Диффузия ҳарорати ва вақти шундай танланганки, диффузиядан сўнг намуналарнинг  $p$ - типли ўтказувчанлиги сақланиб қолинди ва солиштирма қаршилик  $\rho \sim (10^3 - 10^4)$  Ом·см оралиғида бўлди. 2-жадвалда олинган марганец атомларининг нанокластерлари мавжуд кремний намуналарининг хона

хароратидаги  $T=300$  К асосий электр параметрлари кўрсатилган. Олинган намуналардаги фототокнинг ФТ спектрал боғлиқлигини тадқиқ қилиш учун махсус криостат билан таъминланган ИКС-21 монохроматор қурилмасидан фойдаланилган (ўлчаш жараёнидаги намуналарнинг ҳарорати  $T=100 \pm 5$  К).

2-Жадвал

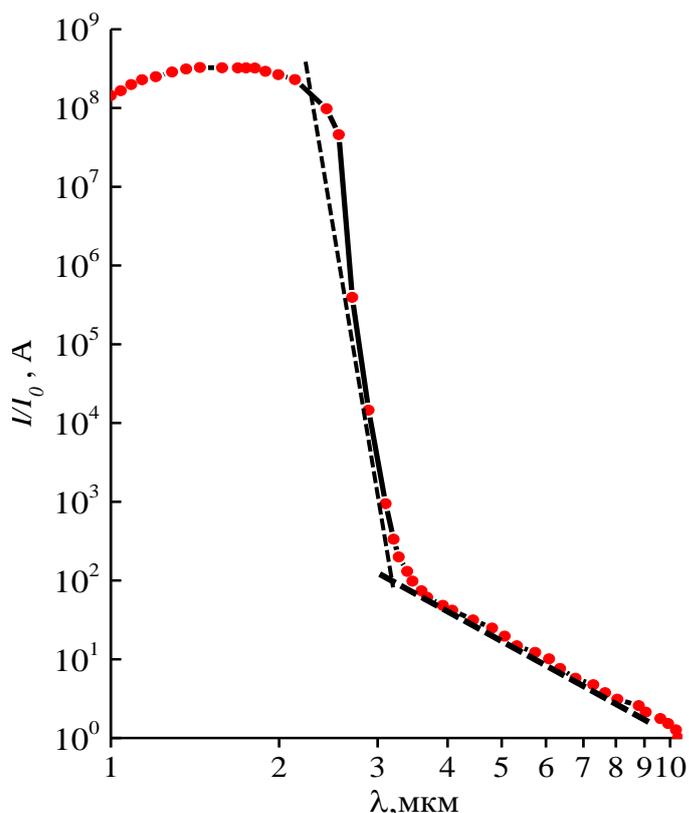
$T=300$  К ҳароратда олинган марганец атомларининг нанокластерлари мавжуд кремний намуналарининг асосий электр параметрлари.

№	Солиштирма қаршилиги, $\rho$ (Ом·см)	Заряд ташувчиларнинг концентрацияси $p, n, \text{см}^{-3}$	Заряд ташувчиларнинг ҳаракатчанлиги $\mu, \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	Ферми даражасининг ҳолати, эВ
1	$5,0 \cdot 10^3$	$1,30 \cdot 10^{13}$	70	$E_v + 0,358$
2	$6,3 \cdot 10^3$	$1,180 \cdot 10^{13}$	55	$E_v + 0,350$
3	$5,8 \cdot 10^4$	$1,60 \cdot 10^{12}$	64	$E_v + 0,386$
4	$2,0 \cdot 10^5$	$1,40 \cdot 10^{11}$	184	$E_v + 0,476$
5	$2,5 \cdot 10^5$	$2,55 \cdot 10^{10}$	980	$E_v - 0,529$



1-расм. Турли солиштирма қаршилиқларда марганец нанокластерли кремний намуналари фототокини спектрал боғлиқлиги.

1-расмда марганец атомларининг нанокластерларидан иборат кремний намунасининг фототокини спектрал боғлиқлиги турли солиштирма қаршилиқларга эга материалларда кўрсатилган. 1-расмдан кўриниб турибдики материалларнинг фотосезгирлигини бошланиши, турли хил солиштирма қаршилиқка эга материалнинг катталигига қараб, фотон энергиясининг турли қийматларида бошланган ва фототокнинг қиймати намуналарнинг солиштирма қаршилиги ортиши билан сезиларли даражада ўзгарган ва максимал қиймати  $\rho=5 \cdot 10^3$  Ом·см турли материалда кузатилган.



**2-расм.  $T=100\text{K}$  бўлганда марганец нанокластерли кремний намунасидаги фототокни спектрал боғлиқлиги.**

2-расмда марганец атомлари нанокластерлари мавжуд кремний намуналари фототокининг спектрал боғлиқлиги келтирилган бўлиб, берилган электр майдон  $6,5 \text{ В/см}$  ни ташкил қилган.

2-расмдан кўришиб турибдики, фотосезгирлик  $\lambda=10 \text{ мкм}$  ( $h\nu = 0.12 \text{ эВ}$ ) дан бошланган.

Шу билан бирга бир-биридан сезиларли даражада фарқ қилувчи учта спектрал сезгирлик оралиғи кузатилди:

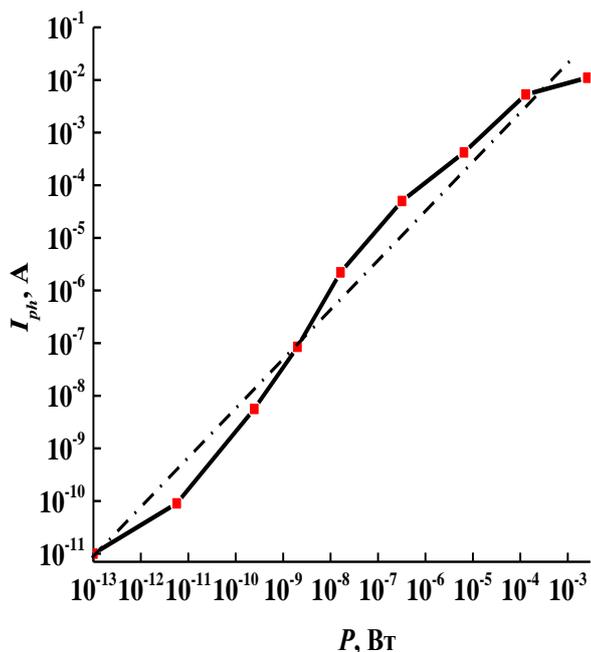
1. Биринчи соҳа  $\lambda=10 \div 3,1 \text{ мкм}$  ( $h\nu=0.12 \div 0.4 \text{ эВ}$ ) бўлиб, унда фототокнинг қиймати аста-секин белгиланган спектрал соҳагача, деярли 100 марта ортиб борди.

2. Иккинчи соҳа  $\lambda=3,1 \div 2 \text{ мкм}$  ( $h\nu=0.4-0.6 \text{ эВ}$ ) бўлиб, бу ораликда, яъни тушаётган фотон энергиясини  $\Delta h\nu = 0.2 \text{ эВ}$  ҳисобига фототокнинг қиймати қарийб  $10^6$  марта ошди, бундай тез ўсиш фототокни катта қиймат билан ўзгарганлигини аниқлатади.

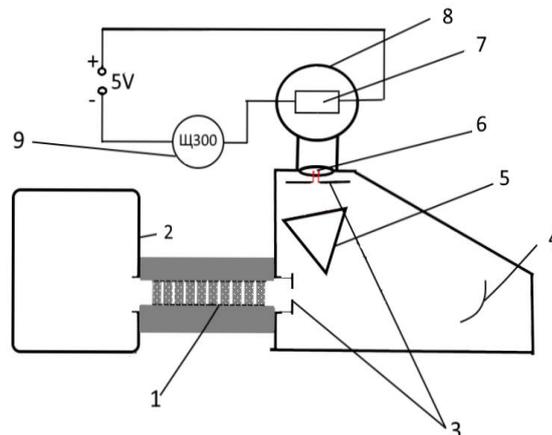
3. Учинчи соҳа  $\lambda=2.06 \div 1.2 \text{ мкм}$  ( $h\nu=0.6-1 \text{ эВ}$ ) бўлиб, бунда фототокнинг жуда кучсиз фотон энергиясига боғлиқ ҳолда аномал катта қиймати  $\sim 10^{-3} \text{ А}$  сақланиб қолинган.

Чегаравий сезгирлигини тадқиқ қилиш учун тушаётган ёруғлик интенсивлигини кучсизлантирувчи сифатида ишлайдиган кремнийли филтрлар ёрдамида ўзгартирилди. 3-расмда фоторезисторнинг пороговий сезгирлигини аниқловчи қурилманинг блок схемаси кўрсатилган. Филтрлар металл корпусда жойлашган бўлиб, бу ўрганилаётган объектда мумкин бўлган фоннинг тушишини бутунлай йўқ қилиш имконини берди.

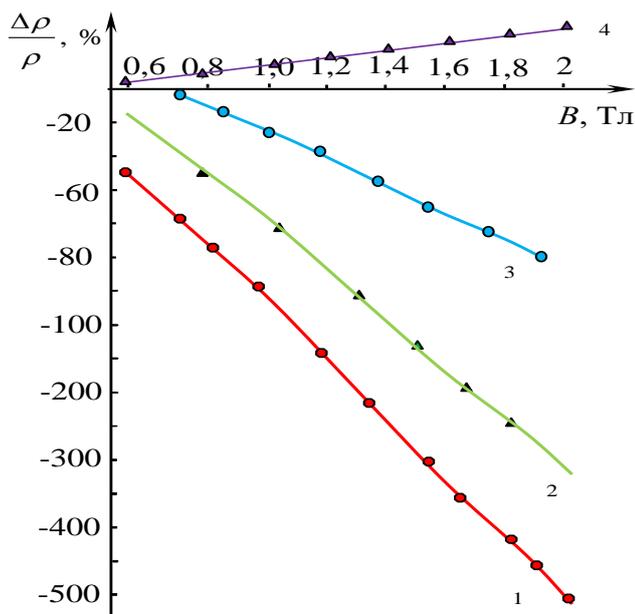
4-расмдан кўришиб турибдики, тушаётган ёруғлик қуввати  $P=(10^{-11} \div 10^{-4}) \text{ Вт/см}^2$  оралиғида фоторезистордаги фототок қиймати берилаётган ёруғлик қувватига боғлиқлиги деярли чизикли ўзгаришига мос келади, фақат  $P > 10^{-4} \text{ Вт}$  ёруғлик қувватида чизикли ўзгаришини оғиши кузатилди бу эса бевосита фон ёритилиши ёки глобар нурланиши туфайли биринчи филтр орқали узатилишининг ўзгариши билан боғлиқ бўлиши мумкин. Марганец атомларининг нанокластерлари мавжуд Si асосидаги фоторезисторнинг чегаравий сезгирлиги  $10^{-11} \text{ Вт/см}^2$  эканлиги аниқланди.



4-расм.  $h\nu=0,78$  эВ бўлганида фоторезистор фототокини тушаётган нурланишни кувватига боғлиқ.



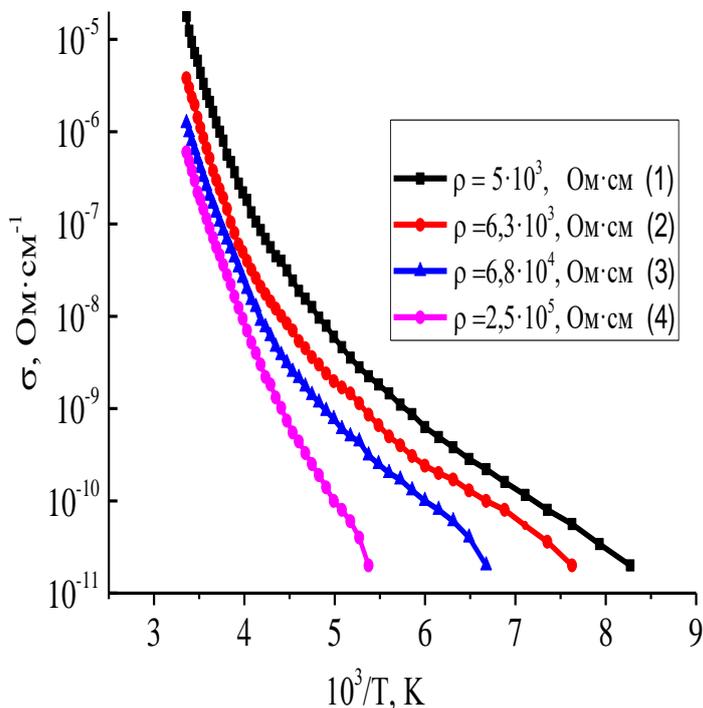
3-расм. Si<B,Mn> фоторезисторини сезгирлик чегарасини аниқлайдиган қуримани блок схемаси 1- кремнийли филтр. 2- манба корпуси (глобар). 3- тирқиш. 4- ойна. 5-призма. 6-LIF линза. 7- фоторезистор. 8- криостат. 9-ток ўлчагич (Щ-300 асбоби).



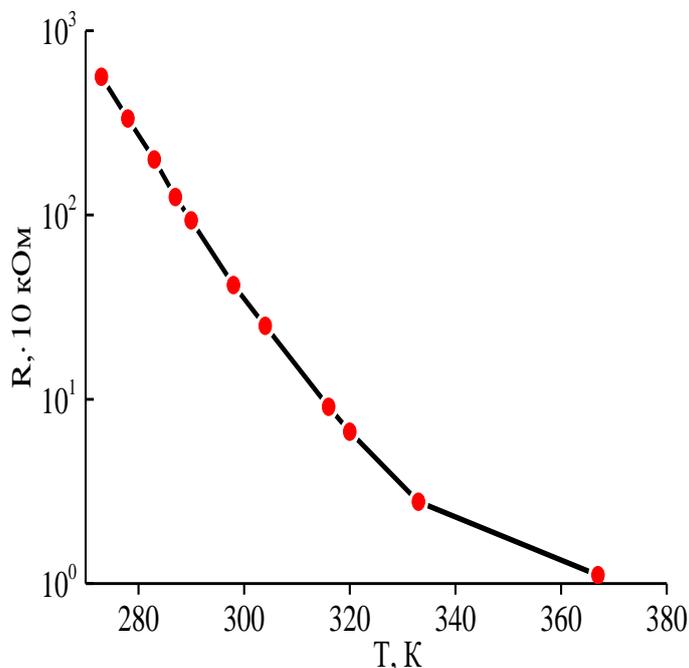
5-расм. Нанокластерларга эга бўлган намуналарда  $E=100$  В/см  $T=300$ К бўлганида магнит қаршиликни магнит майдонга боғлиқлиги: 1 -  $\rho=5 \cdot 10^3$  Ом·см,  $p$ -тип, 2 -  $\rho=6,3 \cdot 10^3$  Ом·см,  $p$ -тип. 3 -  $\rho=6,8 \cdot 10^4$  Ом·см,  $p$ -тип, 4 -  $\rho=2,5 \cdot 10^5$  Ом·см,  $n$ -тип.

5-Расмда нанокластерлари мавжуд намуналарни магнитқаршилигини (МК) магнит майдонга боғлиқлиги кўрсатилган. Ушбу 5 – расмдан кўришиб турибдики, намуналарнинг солиштирма қаршилиги ошиши туфайли манфий магнитқаршилиқни (ММҚ) ўзгаришига олиб келди ва ММҚ қиймати магнит майдоннинг ўсиши билан ортди. ММҚ нинг максимал қиймати хона ҳарорати  $T=300$ К да  $\rho=5 \cdot 10^3$  Ом·см материалида кузатилди. Бунда магнит сезгирлиги  $\alpha \sim 250$  % / Тл етди. Шундай қилиб, нанокластерли материалларда аномал юқори қийматли ММҚ (500%) кузатилди.

6- расмда турли хил солиштирма қаршиликларга  $\rho=10^3 \div 10^5$  Ом·см эга бўлган намуналарнинг  $\sigma$  ўтказувчанлигининг ҳароратга боғлиқлиги кўрсатилган. Ушбу расмдан кўриниб турибдики, материалнинг солиштирма қаршилиги ортиши билан  $\sigma(T)$  боғлиқлик ҳарорат юқорирак томонга силжийди ва хусусий ўтказувчанлик хусусияти каби бўлиб қолади.



**6-расм. Турли солиштирма қаршиликка эга бўлган намуналар ўтказувчанлигини ҳароратга боғлиқлиги.**



**7-расм. Si<B,Mn> асосида солиштирма қаршилиги  $\rho=5 \cdot 10^3$  Ом·см бўлган термодатчикни ҳароратга боғлиқлиги.**

Яримўтказгичли термодатчик яратиш учун солиштирма қаршилиги  $\rho=(5 \div 8) \cdot 10^3$  Ом·см бўлган марганец атомларининг нанокластерлари мавжуд кремний ишлатилган. Бундай материални танлаш, берилган ҳароратнинг ўзгаришига жуда сезгирлиги билан боғлиқ бўлди (3-жадвал). Омик контактларни солиштирма қаршилиги  $\rho=(5 \div 8) \cdot 10^3$  Ом·см бўлган марганец киришма атомлари билан легирланган кремний материалига кимёвий усулда киритилган никел моддасидан фойдаланилган.

Термодатчикларини устки қисмини герметик қоплаш учун таркибида 10% га яқин қурум ва 20% темир оксидини ўз ичига олган эпоксидли бирикмадан фойдаланилди.

Пигментларнинг юқори консентрацияси компаундларнинг яхши ўтказувчанлигига олиб келади.

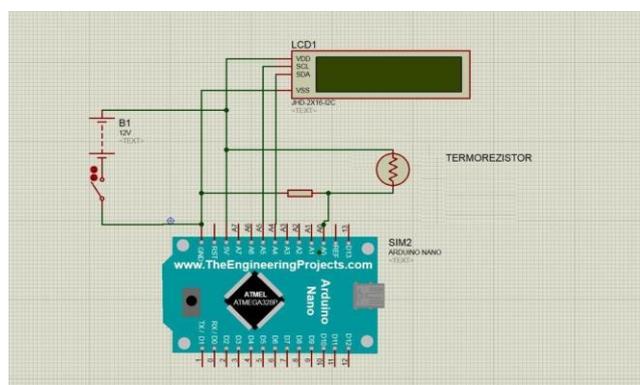
7-расмда солиштирма қаршилиги  $\rho=5 \cdot 10^3$  Ом·см бўлган Si<B,Mn> асосида ясалган термодатчикнинг ҳарорат тавсифлари келтирилган.

Олинган натижалар таҳлили шуни кўрсатадики, марганец атомларининг нанокластерлари бўлган кремний асосидаги ишлаб чиқилган термодатчиклар юқори ҳарорат сезгирлигига эгадир. Термодатчикнинг ҳарорат сезгирлиги  $\beta=8750 \text{ K}^{-1}$   $0 \div 25 \text{ }^\circ\text{C}$  температура оралиғида аниқланган. Ишлаб чиқилган термодатчикларнинг ўртача қаршилиги  $5000 \text{ кОм}$  ташкил қилди. Барча ишлаб чиқилган термодатчиклар учун ишлаш тезлиги тахминан  $\Delta T=25 \text{ }^\circ\text{C}$  да бир хил  $25\text{-}40$  сония оралиғида кузатилди (3-жадвал).

3-жадвал

Ишлаб чиқилган термодатчикнинг параметрлари

Датчик	Термодатчик параметрлари				
	$20^\circ\text{C}$ $\alpha_t$ , %/К ҳароратда ТКС	Ҳароратга сезувчанлик $\beta$ , К	Тезкорлик секунд	Ўлчами $\text{мм}^2$	Ҳарорат интервали $^\circ\text{C}$
Si<B,Mn>	-3 %/К	8600 К	25-40	2x1	-150-100



8-расм. Термодатчик асосида ишлаб чиқилган (марганец билан легирланган кремний) қурилма схемаси.



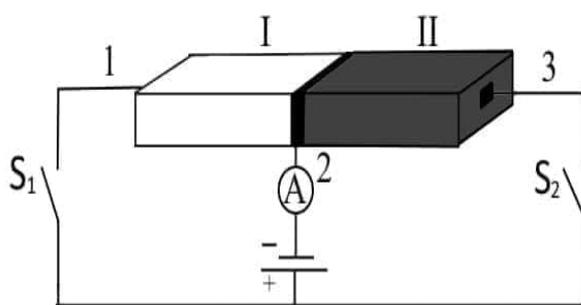
Si<B,Mn> термодатчик асосида олинган термометрнинг ташқи кўриниши.

Олинган маълумотларнинг таҳлили шуни кўрсатадики, ишлаб чиқилган термодатчикларнинг параметрлари мавжуд ўхшашларига қараганда анча юқори. 8-расмда ишлаб чиқилган термодатчикнинг уланиш схемаси келтирилган.

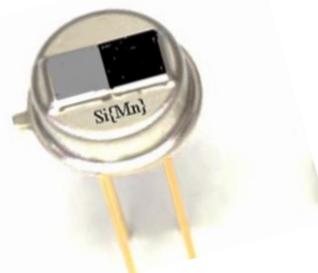
Диссертациянинг "Марганец атомларининг нанокластерлари мавжуд кремний материалга асосланган резистор тузилишига эга кўп функцияли датчик ва унинг тавсифий параметрларини аниқлаш" деб номланган тўртинчи бобида ташқи таъсирларни кайд этадиган кўп функционалли датчикларни яратиш, илмий ва амалий томондан қизиқиш уйғотади. Турли физикавий катталикларни (ҳарорат, ёруғлик, электр ва магнит майдонларни) ўлчаш ва назорат қилиш учун кўп функционалли (КФ) датчикларни ишлаб чиқиш ва яратиш, уларни техника ва халқ хўжалигининг кўплаб соҳаларида қўллаш имкониятини очади.

КФ датчикларини ишлаб чиқиш ва яратиш учун ўлчамлари  $8 \times 4 \times 0,9 \text{ мм}^3$ , солиштирма қаршилиги эса  $5 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  бўлган марганец атомларининг нанокластерлари мавжуд кремний намунаси танлаб олинди. 9-расмда

марганец атомларининг нанокластерлари бўлган кремний асосида ишлаб чиқилган кўп функцияли датчикнинг конструкциса схематик тарзда кўрсатилган. Ушбу датчикнинг чап ярми (1-соҳа) 1 ва 2 контактларига эга ва бў соҳа ёруғликга боғлиқ бўлган сигнални олиш учун ишлатилади. Ушбу датчикни ярмига ўлчанаётган ёруғлик оқими йўналтирилади. датчикнинг ўнг ярми (2- соҳа) эса ёруғлик ютмаслиги учун шаффоф бўлмаган компаунд билан қопланган ва у соҳа ҳароратга боғлиқ сигнални беради. Ўнг ярим соҳа 2 ва 3 контактлардан иборат. Электр ўлчаш схемаси, ҳосил қилинган учта симлар билан уланади, улардан (фақат 2 чиси) минус кутбга уланган. Ўлчанган ҳарорат маълумотларидан ёритиш каналида ҳароратни рақамли компенсация қилиш учун фойдаланилди, бунда Амега328 микроконтролери ишлатилди. 1, 2 ва 3 омик контактлар марганец билан легирланган кремний кристаллига никелни кимёвий гипофосфит эритмаси ёрдамида ҳосил қилинган. Никелланишдан кейин кристалл сиртига никелнинг адгезиясини ошириш учун датчикларга вакуум шароитида 120 °С 36 соат давомида термик ишлов берилди. Ҳосил бўлган никел контакт қатламининг сирт қаршилиги 0.5-0.8 Ом квадрат бўлди.



а)



б)

**9-расм. а) Ишлаб чиқилган кўп функцияли датчикнинг схематик конструкциса, б) Si<B,Mn> асосида ишлаб чиқилган кўп функцияли датчикнинг ташқи кўриниши.**

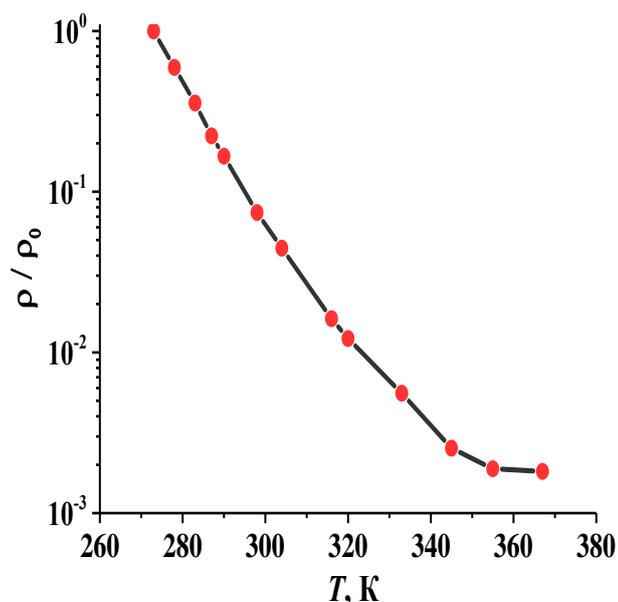
10-расмда датчик солиштирма қаршилигининг  $\rho(T)$  температурага боғлиқлиги кўрсатилган. Ҳозирги замонавий термодатчиклар учун асосий параметр бу ҳароратнинг сезгирлик коэффиценти ҳисобланади ва уни экспериментал равишда  $\rho_1$  ва  $\rho_2$  терморезисторнинг солиштирма қаршиликларини  $T_1, T_2$  икки ҳарорат оралиғи орқали ўлчаш мумкин:

$$\beta = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1} \cdot \frac{\ln \rho_1}{\rho_2}$$

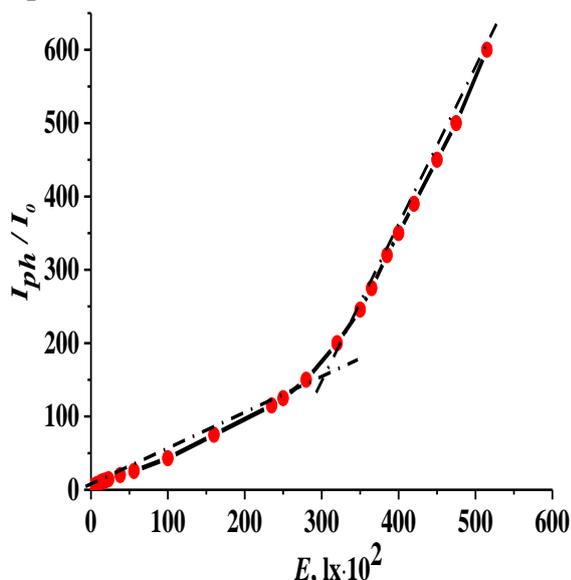
Марганец билан легирланган кремний асосида олинган Si<B,Mn> структурали датчикнинг терморезистор қисми куйидаги параметрларга эга: ўртача ҳисобланган ҳароратни сезгирлик коэффиценти  $\beta \sim 6670 \text{ K}^{-1}$ ,  $T=273 \div 315 \text{ K}$  оралиғида эса  $\beta \sim 8120 \text{ K}^{-1}$  ортиши кузатилди.

Марганец атомларининг нанокластерлари мавжуд кремний асосида яратилган КФ датчикнинг фотоактив соҳасига туширилган ёруғлик таъсири тадқиқ этилди. 11 расмда кўриниб турибдики, марганец атомларининг

нанокластерлари мавжуд кремний асосидаги p-Si<B,Mn> КФ датчикни фоторезистор соҳасининг ёруғлик тавсифи нозизиқли характер кўринишида ўзгарган. Тадқиқот натижасида фоторезистор соҳасида ёритилганлик бир хил қийматда ўзгарганда фототок турлича ўзгарди.



**10-расм. Датчикни терморезистор қисмининг солиштирма қаршилигини ҳароратга боғлиқлиги.**

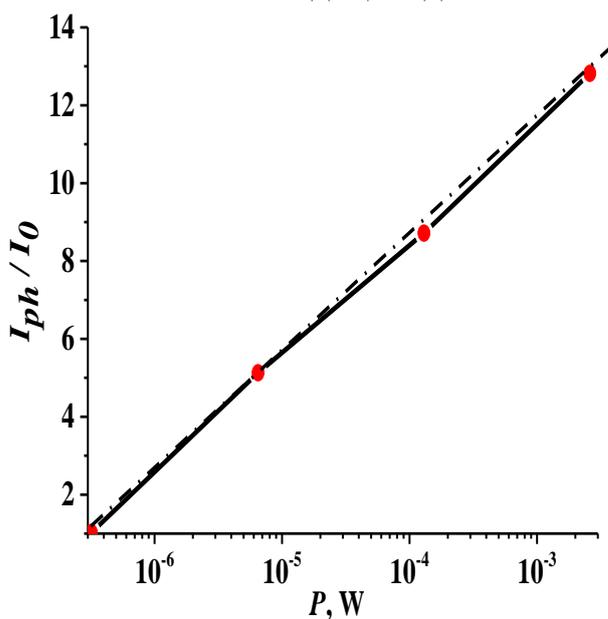


**11-расм. p-Si<B,Mn> асосида ишлаб чиқилган датчикнинг фоторезистор қисмини ёруғлик тавсифи.**

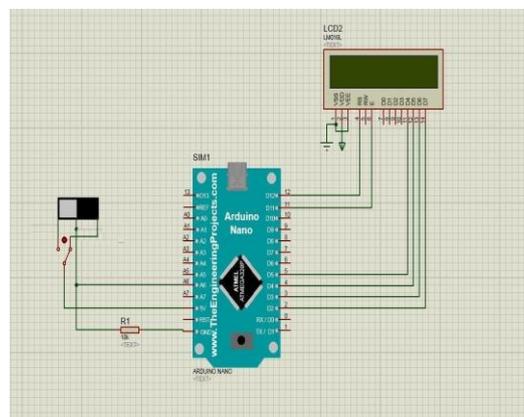
Бу заряд ташувчилар диффузия узунлигини ўзгариши фотогенерацияланган заряд ташувчилар концентрацияси ортиб бориши таъсирида рекомбинация марказлари тўлдирилганлик даражасининг ўзгариши билан тушунтирилади. 11- расмдан кўриниб турибдики., шунга ўхшаш ҳодисалар датчик структурасининг фоторезистор қисмида рўй берди, яъни қуйидаги соҳаларда кузатилади. Ёритилганлик даражаси кичик бўлганда 350 lx гача  $I_{ph} \sim E^{1.5}$  чизиқли характер кўринишида ўзгарди, ёритилганлик даражаси 350 lx дан ошганда эса  $I_{ph} \sim E^{2.7}$  фотокни қиймати супер чизиқли кўринишда ўзгарди. Ёруғлик тавсифи чизиқли бўлгани учун датчикнинг сезирлиги (S) аниқланди. Датчикнинг сезирлик коэффициенти  $S \sim 2 \text{ мкА/лх} \cdot 10^2$  ни ташқил қилди.

Шунингдек,  $T=300 \text{ К}$  хона ҳароратида датчикнинг фоторезистор қисмининг чегаравий сезирлиги тадқиқ қилинди. p-Si<B,Mn> асосида яратилган датчикнинг фоторезистор қисмининг тушаётган ёруғлик интенсивлигига боғлиқ ҳолда чегаравий сезирлиги нурланишни кучсизлантириш сифатида ишлайдиган кремнийли филтрлардан фойдаланиш ёрдамида ўлчанди. Шундай қилиб ушбу кетма-кет фойдаланилган 5 та филтр тушаётган ёруғлик қувватини  $P=10^{-7} \div 10^{-3} \text{ Вт}$  оралиғигача камайтириш имконини берди. 12- расмдан кўриниб турибдики фоторезисторнинг фототокини тушаётган ёруғлик қувватининг  $P = (10^{-7} \div 10^{-3}) \text{ Вт}$  оралиғида боғлиқлиги, назарий жиҳатдан мос келадиган чизиқли характерга эга

эканлигини ва у олинган тадқиқот натижаларининг жуда юқори ишончилигини тасдиқлайди.



**12-расм.  $p$ -Si <B, Mn> асосида датчикнинг фоторезистор қисми фототокининг спектрал соҳасини  $h\nu=0,78$  эВ квант энергияси ҳолида ИҚ- нурланиш қувватига боғлиқлиги.**



**13-расм. Si <B, Mn> кўп функцияли датчикнинг асосида олинган қурилмани уланиш схемаси.**

Юқорида келтирилган барча натижаларни рақамли қийматларини жадвал шаклида микроконтроллер хотирасига юклаш асосида ишлаб чиқилган кўп функционал датчикларнинг функционал имконини кўрсатадиган қурилма яратилди. Ушбу қурилма учун алоҳида дастур ишлаб чиқилган бўлиб, унинг учун ДГУ патенти олинган. 13-расмда олинган кўп функцияли датчик Si<B, Mn> асосида яратилган қурилма бир вақтнинг ўзида ёруғлик интенсивлигини ва ҳароратни ўлчаш мумкинлиги кўрсатилган.

4-жадвалда  $T=300$  К да марганец атомларининг нанокластерлари мавжуд кремний асосида ишлаб чиқилган кўп функционалли датчикнинг асосий техник тавсифлари кўрсатилган.

4-жадвал. КФ датчикнинг техник тавсифлари

№	Параметри	Қиймати
1	Кучланиш манбаи	12-24 В ёки 5 В доимий кучланиш
2	Аниқлиги	$\pm 0,5$
3	Датчиклар тури	Si<B, Mn>
4	Ишчи режимни ўрнатиш вақти, сек	5 дан ошмайди

5	20°C $\alpha_t$ , %/K ҳароратда ТКС	-5 %/K
6	Ҳароратга сезувчанлик $\beta$ , K	8600 K
7	Спектрал диапазони, мкм	1-4
8	$E=350\div 500$ лх, мкА/лх интенсивлик билан ёритилганда фотосезгирлиги	2 мкА/лх
9	Ҳароратни ишчи диапазони T, °C	-100÷120
10	Фотосезгирлик чегараси P, Вт	$\sim 10^{-7}$ Вт
11	Массаси, кг	0,4 дан ошмайди
12	Ўртача ишлатиш муддати, йил	10

Хулоса ўрнида, Диссертация ишимни бажаришда кўрсатган ҳар таърафлама ёрдами учун устозимиз академик М.К.Баҳадирхановга, ҳамда илмий ишимни ҳимоягача ўз маслаҳатларини берган профессор Н.Ф. Зикриллаевга ва ТДТУ «Рақамли электроника ва микроэлектроника» кафедрасининг барча жамоасига раҳмат айтаман.

## ХУЛОСА

Диссертация ишида олиб борилган тадқиқотлар асосида мустақил аҳамиятга эга бўлган қуйидаги асосий натижалар олинган:

1. Диффузия технологиясини такомилланиши туфайли хона ҳароратида кремнийда энг катта кузатилган қиймат (500%) билан манфий магнитқаршилиқ олинди.

2. Намуналарнинг солиштирма қаршилиги  $\rho(T)$  -  $\rho=5\cdot 10^3$  Ом·см ҳароратга боғлиқлиги аниқланди, яъни ҳарорат 100 К гача камайган ҳолатда, унинг солиштирма қаршилиги  $\rho$  деярли 5-6 тартибда ошди.

3. Аномал киришмали спектрал фототок ўрнатилди, биринчиси фотосезгирликни бошланишини катта тўлқин узунлиги томон нисбатан кескин силжиши  $\lambda=10$  мкм ( $h\nu=0.12$  эВ) гача, иккинчиси  $\lambda=3,1\div 2$  мкм ( $h\nu=0.4-0.6$  эВ) гача бўлган ораликда фототокнинг жуда тез ўсиши, бунда фототокнинг қиймати 7-8 тартибда ортади, учинчиси  $\lambda=2.06\div 1.2$  ( $h\nu=0.6-1$  эВ), мкм гача бўлган ораликда жуда кучсиз ёруғлик қувватига боғлиқ равишда аномал фототок  $I_f\sim 10^{-3}$  А сақланиб қолинди.

4. Диффузия технологияси орқали ҳосил қилинган марганец атомларининг нанокластерлари мавжуд кремний асосида физик катталикларни ўлчайдиган кўп функцияли датчикларни яратиш учун энг оптимал солиштирма қаршилиқка эга  $5\cdot 10^3$  Ом·см материал эканлиги аниқланди.

5. Марганец атомларининг нанокластерлари мавжуд ягона кремний кристалли асосида физик катталикларни ўлчайдиган кўп функционали датчикнинг конструкцияси ишлаб чиқилди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ  
ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И  
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ПРИ НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ  
УЗБЕКИСТАНА**

---

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**ИБОДУЛЛАЕВ ШАХБОЗ НИЗОМ УГЛИ**

**РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ  
ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ  
С НАНОСТРУКТУРАМИ**

**01.04.10 – Физика полупроводников**

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

**Ташкент – 2022**

Тема диссертации доктора философии (Doctor of Philosophy) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером В2019.2. PhD/T1049.

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекском, русском, английском (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (ispm.uz) и на Информационно-образовательном портале «Ziy-Neb» (www.ziyonet.uz).

Научный руководитель:

**Мухаммад Кабир Бахадирханов**

доктор физико-математических наук, академик

Официальные оппоненты:

**Зайнабидинов Сирожиддин Зайнабиддинович**

доктор физико-математических наук, академик

**Мамадалиева Лола Камилджонова**

доктор технических наук, доцент

Ведущая организация:

**Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада Ал-Хоразми**

Защита диссертации состоится «4» 04 2022 года в 10<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета по присуждению ученых степеней DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 при Научно-исследовательском институте физики полупроводников и микроэлектроники Национального университета (Адрес: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871) 248-79-94, факс (+99871) 248-79-92, e-mail: inf@ispm.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в отделе внедрения цифровых образовательных технологий института (зарегистрирована за № 38) по адресу: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871) 248-79-59

Автореферат диссертации разослан «16» 02 2022 г.  
(реестр протокола рассылки № 38 от 16.02 2022 г.).



**Ш.Б. Угамурдова,**  
председатель Научного совета  
по присуждению ученых степеней,  
д.ф-м.н., профессор

**Ж.Ж. Хамдамов,**  
ученый секретарь Научного совета  
по присуждению ученых степеней,  
доктор философских наук (PhD)

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

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

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В настоящее время в мире очень интенсивно ведутся работы по разработке технологии получения объемнонаноструктурированных полупроводниковых материалов и исследованию их свойств. Это связано с достаточно широкими возможностями таких материалов, чем у одномерно наноструктурированных материалов, позволяющих создать на их основе принципиально новые оптоэлектронные и фотомагнитные приборы и высокоэффективные датчики.

В мире существующие датчики создаются на основе полупроводниковых материалов, электрические параметры которых наиболее чувствительны только к одному виду физических величин (температура, освещение, давление, магнитное поле). Для создания датчиков регистрирующих одновременно несколько физических величин, то есть многофункциональных датчиков требуются материалы физические параметры которых, одновременно имеют высокую чувствительность к нескольким физическим величинам. Однако большинство полупроводниковых материалов не обладают такими свойствами. Поэтому для разработки и создания многофункциональных датчиков на основе одного единого кристалла требуются новые полупроводниковые материалы.

Одним из современных перспективных материалов для создания новых многофункциональных датчиков на основе одного единого кристалла является кремний с нанокластерами примесных атомов марганца. Решение данных задач очень важно и актуально не только для практического использования таких материалов при разработке различных новых видов многофункциональных датчиков, но и для более глубокого понимания механизма формирования нанокластеров введенных примесных атомов марганца.

В соответствии со Стратегией действий по дальнейшему ускоренному развитию Республики, особое внимание уделяется вопросам стимулирования научно исследовательской и перспективной инновационной деятельности, создания эффективных актуальных механизмов внедрения инновационных достижений в практику. Поддержке активного реального предпринимательства, перспективных инновационных идей и технологий, нацеленных на получение научных результатов, отвечающих современным требованиям. В том числе важнейшей задачей наноэлектроники является получение кремния с нанокластерами (квантовыми точками), устойчивому к внешним воздействиям, который может использоваться для изготовления полупроводниковых приборов со стабильными параметрами и в частности многофункциональных датчиков. В этом аспекте весьма актуальной задачей является создание датчиков регистрирующих одновременно несколько физических величин, то есть многофункциональных датчиков для микроэлектроники и оптоэлектроники.

Исследования, выполненные в диссертационной работе в определенной степени служат выполнению задач, предусмотренных в Указе Президента

Республики Узбекистан УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 гг.» от 7 февраля 2017 года, и в постановлениях Президента № ПП–3875 «О создании и организации деятельности в Ташкенте филиала Федерального государственного образовательного автономного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»» от 20 июля 2018 года, № ПП-5234 «О мерах по внедрению Специального режима применения технологий искусственного интеллекта» от 26.08.2021, № ПП-5241 «О мерах по усилению взаимосвязи образовательного процесса между высшими, средними специальными и профессиональными образовательными учреждениями, а также производственной практики с отраслевыми организациями» от 31.08.2021, ПП-3151, ПП-3365 «О мерах по дальнейшему укреплению инфраструктуры научно-исследовательских учреждений и развитию инновационной деятельности» от 1 ноября 2017 года, ПП-3899 «О мерах по повышению эффективности системы интеграции научной и инновационной деятельности» от 6 августа 2018 года, а также задаче проведения более глубоких фундаментальных и прикладных исследований в области физики, разработки перспективных инновационных технологий, исходя из реальных потребностей различных секторов экономики страны и широкого вовлечения талантливых молодых ученых и одаренных студентов в научный процесс.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики.** Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики: III. «Энергия, энергосбережение, транспорт, ракетно–космическая техника, авиация, робототехника, машиностроение и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

**Степень изученности проблемы.** В настоящее время специалисты в области нанотехнологии и наноэлектроники уделяют большое внимание проблемам получения примесных кластеров и в частности, технологии получения нанокластеров на основе различных примесей с управляемой структурой и состав. В своих работах М.Г. Мильвидский, И.В. Бажин, Ю.А. Астров изучили распределение и состояние примесных кластеров в различных полупроводниках. Атомную структуру нанокластеров и их межатомное взаимодействие с различными примесными атомами исследовали Е.А. Михайлов, А.Т. Косилов, Т. Тишковский. Взаимодействие примесных атомов с различными радиационными дефектами в кремнии исследовали Т.А. Пагава, А.А. Лебедев, А.П. Долголенко, наличие кадмия в кремнии исследовали Bayu L.B, Wallace J.B, Lin Y.R, Chen L.C, Nakai K, Hrant N, взаимодействие с термодфектами исследовалось Е.А. Климановым, Weber E, Riotte H.G, Zhang Xiangli, Sun Zhaowei.

В области производства датчиков работают зарубежные фирмы и зарубежные ученые Эндэвко, Кулайт (США), Numicar (Япония), Мида, Метран, Сигнал (Россия). При разработке и моделировании датчиков

выделились российские ученые А.Е. Панич, В.М. Стучебников, В.Я. Распопов, П.Г. Михайлов, а также иностранные ученые E.E. Eller, H. Jaffe, R.G. Jackson, J. Fraden, A.D. Kurtz. Paul Beckman, Nutington Valley, которые создали и запатентовали датчик температуры и пульса.

В Узбекистане академиком А.Т. Мамадалимовым исследовалось температурное гашение фотопроводимости кремния легированного различными примесями, в научной школе академика Р.А. Муминова был разработан детектор ядерного излучения на основе кремния легированного литием. В работах Ш. Махкамова, Н.А. Турсунова, К.П. Абдурахманова разработан способ управления радиационными дефектами в кремниевых приборах. Академик С. Зайнобиддинов и профессора Ш.Б. Утамурадова и Н.А. Тургунов изучали образование примесных микровключений никеля и марганца в кремнии. В научной школе академика М.К. Бахадырханова, профессорами Н.Ф. Зикриллаевым, Г.Х. Мавлоновым и Х.М. Илиевым было научно обосновано формирование магнитных нанокластеров в кремнии. Исследования внешних факторов на физические процессы в МДП – структурах были очень подробно изучены профессорами К.А. Исмайловым и С.И. Власовым.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационная работа была полностью выполнена на кафедре ТГТУ «Цифровая электроника и микроэлектроника» согласно программе государственных грантов в проекте ОТ-Ф2-55 «Разработка научных основ получения объемнонаноструктурированного кремния на основе формирования примесных кластеров как нового класса наноматериалов с уникальными функциональными возможностями» в 2017-2020 годы.

**Целью исследования** является определение физических и технологических основ возможности создания многофункциональных датчиков физических величин на основе одного единого кристалла кремния (температуры, освещения, электрического и магнитного полей).

**Задачи исследования:**

получить материал с кластерами примесных атомов марганца в решётке кремния ( $\text{Si}\langle\text{B}, \text{Mn}\rangle$ );

исследовать особенности магнитных, температурных и фотоэлектрических свойств полученного материала ( $\text{Si}\langle\text{B}, \text{Mn}\rangle$ ) и разработать новые датчики физических величин на их основе;

исследовать отрицательное магнетосопротивление при одновременном приложении различных внешних воздействий (температура, электрическое поле и освещение);

показать возможность разработки и создания многофункциональных датчиков физических величин на основе одного единого кристалла кремния с нанокластерами атомов марганца;

определить физические параметры и чувствительность разработанных многофункциональных датчиков;

**Объект исследования.** Для создания многофункционального датчика был выбран монокристаллический кремний марки КДБ – 3 (концентрация бора  $7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ). В качестве примеси был выбран марганец.

**Предметом исследования** является технологический процесс управления параметрами и свойствами нанокластеров атомов марганца в кристаллической решетке кремния, для создания высокочувствительных датчиков физических величин.

**Методы исследования.** Экспериментальное исследование свойств образцов выполнялось с использованием анализа кинетики фототока, анализа вольтамперных, магнитных, температурных и спектральных характеристик, а также АСМ (Dimension 3000), исследовано образование кластеров, изменение их структуры, размера и плотности. Электрические параметры образцов были исследованы методом эффекта Холла. Для исследования спектральной зависимости фототока использовался монохроматор на основе установки ИКС-21, снабженной криостатом, температура образцов в процессе измерений находилась в диапазоне  $90 \div 100 \text{ К}$ .

**Научная новизна исследования заключается в следующем:**

установлено, что изменяя напряжение на фоторезисторе на основе кремния, легированном атомами марганца, в диапазоне  $0,1 - 30 \text{ В}$  можно изменять красную границу фотоответа материала при  $T=100 \text{ К}$  с  $\lambda=4.6 \text{ мкм}$  до  $12 \text{ мкм}$ ;

установлено отрицательное магнетосопротивление в кремнии при комнатной температуре  $T=300 \text{ К}$  с самым большим наблюдаемым значением  $500 \%$  за счет улучшения технологии диффузии;

определено оптимальное удельное сопротивление материала  $5 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  для создания многофункциональных датчиков физических величин на основе кремния с нанокластерами атомов марганца;

показана возможность создания многофункционального датчика на основе эффекта отрицательного магнетосопротивления в кремнии;

впервые разработана конструкция многофункционального датчика физических величин на основе одного единого кристалла кремния с нанокластерами атомов марганца и определены его основные параметры ( $T=300 \text{ К}$ ) при наличии внешних воздействий.

**Практические результаты исследования:**

впервые разработана конструкция многофункционального датчика физических величин на основе одного единого кристалла кремния с нанокластерами атомов марганца;

проведённые исследования показали, что кремний с нанокластерами примесных атомов марганца обладает высокой чувствительностью к температуре и освещенности и может быть использован для создания многофункциональных датчиков при условии использования цифровой коррекции показаний каналов измерения (температуры и освещенности) и нелинейностей каждого канала;

**Достоверность полученных результатов исследований обеспечивается** применением традиционных, хорошо апробированных экспериментальных методов, а также большим количеством полученных экспериментальных данных и воспроизводимостью полученных результатов. Соответствием физической интерпретации экспериментальных результатов современным теоретическим представлениям. Полученные результаты широко обсуждались на многих международных научных конференциях и семинарах в Ташкентском государственном техническом университете с участием ведущих специалистов (М.К Бахадырханов, Н.Ф Зикриллаев, Х.М Илиев, К.С Аюпов, Г.Х. Мавлонов, С.Б.Исомов, Б.К. Исмайлов и др.).

#### **Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость результатов исследования заключается в том, что в одном и том же образце наблюдается ряд новых интересных электрических, фотоэлектрических и магнитных явлений, а также новые - фотомагнитные и термо-фотомагнитные явления, пока еще не обнаруженные ни в одном из известных полупроводниковых материалов, кроме кремния. В обычных условиях для наблюдения выше перечисленных явлений, требуются разные полупроводниковые материалы, легированные специально подобранными примесными атомами. В данном случае, кремний с нанокластерами атомов марганца р-типа с удельным сопротивлением  $\rho=5 \cdot 10^3$  Ом·см обладает весьма высокой примесной фоточувствительностью, эффектом стимулированной примесной фоточувствительности при наличии достаточно высокого уровня фонового освещения, аномально большой магнеточувствительностью при комнатной температуре.

Практическая значимость означает, что на основе таких материалов можно создать принципиально новые классы многофункциональных датчиков физических величин с высокой чувствительностью. А возможность управления магнетосопротивлением материала в широком интервале с помощью освещения или температуры может служить основой для создания новых научных направлений фотоспинтроники и магнитофотоники.

**Внедрение результатов исследования.** Результаты исследования высокочувствительных датчиков физических величин на основе кремния с нанокластерами атомов марганца полученных с помощью диффузионной технологии, были внедрены следующим образом:

оптимальное удельное сопротивление материала  $5 \cdot 10^3$  Ом·см с примесными кластерами атомов марганца в кремнии было использовано в производстве акционерным обществом «FOTON» (Справка № 01/9-14-2420 акционерной компании «Ўзэлтехсаноат» от 22 июля 2021 года). Применение научных результатов дало возможность получить высокотемпературные полупроводниковые датчики физических величин с повышенной стабильностью, производимые АО «FOTON» на основе монокристаллического кремния с нанокластерами атомов марганца;

разработанная конструкция многофункционального датчика физических величин на основе одного единого кристалла кремния с нанокластерами атомов марганца была внедрена и использована в акционерном обществе

«FOTON» (Справка № 345 акционерной компании «Ўзэлтехсаноат» от 25 июля 2021 года). Полученные научные результаты были применены при разработке совершенно новых многофункциональных датчиков (температуры и освещения).

**Апробация результатов исследования.** Основные научные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, были обсуждены на 6 международных и 3 Республиканских научно-практических конференциях, а также регулярных научных семинарах, проводимых в ТГТУ.

**Публикация результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано 24 научных работ, из них 9 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан, в том числе 3 из них опубликованы в республиканских и 6 в зарубежных журналах.

**Структура и объём диссертации.** Представленная диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка использованной литературы из 94 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследования с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики, раскрыта степень изученности проблемы, сформулированы цели и задачи, приведены объект, предмет и методы исследования, изложена научная новизна и практическая значимость исследования, приведены краткие сведения о внедрении результатов, апробации и публикации работ, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе диссертации под названием **«Полупроводниковые датчики, проблемы и перспективы»** проанализировано современное состояние и последние научные достижения при разработке эффективных полупроводниковых датчиков (ПД), факторы ограничивающие чувствительность ПД и способы повышения чувствительности ПД. Также были проанализированы возможности повышения чувствительности ПД некоторыми технологическими решениями. На основании анализа имеющихся теоретических и экспериментальных данных сформулированы задачи диссертационной работы.

Во второй главе диссертации под названием **«Кластеры атомов марганца как мономагнитные структуры и технология получения кремния с нанокластерами»** исследовались особенности диффузионной технологии получения кремния с кластерами атомов марганца.

Для получения кремния с нанокластерами атомов марганца был использован промышленный монокристаллический кремний с удельным сопротивлением  $\rho=2, 3, 5, 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  (концентрация бора соответственно была  $1\cdot 10^{16}, 4\cdot 10^{15}, 2\cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ). Размер образцов  $8\times 3\times 0,8 \text{ мм}^3$ . Диффузия марганца проводилась из газовой фазы в откачанных кварцевых ампулах (вакуум -  $10^{-6}$

мм.рт.ст.). Диффузия марганца проводилась по разработанной технологии в интервале температур  $T=1055\div 1080$  °С с шагом  $40\div 50$  °С, при одинаковой скорости нагрева и охлаждения образцов чтобы получить полностью компенсированный кремний  $p$ -типа. Основные параметры образцов кремния с нанокластерами Mn приведены в таблице 1. Из таблицы 1 видно, что во всех образцах не зависимо от их типа проводимости и удельного сопротивления, подвижность электронов и дырок заметно меньше, чем подвижность электронов и дырок в нелегированном кремнии.

Таблица 1.

Основные параметры образцов кремния с нанокластерами Mn

Номер группы образцов	$\rho$ , Ом·см	Тип проводимости	Концентрация носителей заряда, см <sup>-3</sup>	$\mu$ , см <sup>2</sup> /В·с
1	$1,5\div 2\cdot 10^2$	$p$	$1,69\cdot 10^{14}$	$180\div 190$
	$2,5\div 3\cdot 10^2$	$p$	$1,26\cdot 10^{14}$	$160\div 167$
	$8\div 9\cdot 10^2$	$p$	$7,98\cdot 10^{13}$	$85\div 90$
	$7\div 8\cdot 10^3$	$p$	$1,22\cdot 10^{13}$	$63\div 64$
	$1\div 1,2\cdot 10^4$	$p$	$6,85\cdot 10^{12}$	$75\div 78$
	$1,5\div 2\cdot 10^4$	$p$	$3,86\cdot 10^{12}$	$80\div 82$
2	$3\div 4\cdot 10^4$	$p$	$1,59\cdot 10^{12}$	$95\div 100$
	$1\div 1,2\cdot 10^5$	$p$	$3,28\cdot 10^{11}$	$158\div 160$
3	$1\div 1,2\cdot 10^5$	$n$	$6,76\cdot 10^{10}$	$750\div 800$
	$4\div 5\cdot 10^4$	$n$	$1,44\cdot 10^{11}$	$850\div 900$
	$2\div 3\cdot 10^3$	$n$	$2,08\cdot 10^{12}$	$\sim 1000$

В третьей главе диссертации под названием «**Функциональные возможности кремния с нанокластерами атомов марганца**» приведены экспериментальные результаты по исследованию электрических, фотоэлектрических (фоточувствительность, пороговая чувствительность и квантовая эффективность), термических и магнитных свойств кремния с нанокластерами примесных атомов, ясно показывающие, что такой материал действительно является уникальным материалом с широкими функциональными возможностями.

Для создания ИК-фоторезистора был использован монокристаллический кремний, выращенный методом Чохральского  $p$ -типа с  $\rho=3$  Ом·см ( $p=7\cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>). Исходные образцы вырезались в виде параллелепипедов размером  $a=1$  мм,  $b=3$  мм,  $c=2$  мм.

Диффузия марганца проводилась из газовой фазы поэтапно с плавным повышением температуры до  $T=1075\div 1080$  °С, соответственно в течении времени  $t=10\div 20$  минут, с последующим резким охлаждением образцов со скоростью порядка  $200$ °С/сек. Температура и время диффузии выбирались таким образом, чтобы после диффузии образцы сохраняли  $p$ -тип проводимости, а удельное сопротивление было в диапазоне  $\rho\sim(10^3-10^4)$

Ом·см. В таблице № 2 приведены основные электрические параметры полученных образцов кремния с нанокластерами атомов марганца при комнатной температуре  $T=300$  К.

Для исследования в полученных образцах спектральной зависимости фототока ФТ использовался монохроматор на основе установки ИКС-21, снабженной криостатом (температура образцов в процессе измерений  $T=100 \pm 5$  К).

Таблица 2

Основные электрические параметры полученных образцов кремния с нанокластерами атомов марганца при температуре  $T=300$  К.

№	Удельное сопротивление $\rho$ (Ом·см)	Концентрация носителей $p, n$ , см <sup>-3</sup>	Подвижность носителей $\mu$ , см <sup>2</sup> /V·с	Положение уровня Ферми, эВ
1	$5,0 \cdot 10^3$	$1,30 \cdot 10^{13}$	70	$E_v + 0,358$
2	$6,3 \cdot 10^3$	$1,180 \cdot 10^{13}$	55	$E_v + 0,350$
3	$5,8 \cdot 10^4$	$1,60 \cdot 10^{12}$	64	$E_v + 0,386$
4	$2,0 \cdot 10^5$	$1,40 \cdot 10^{11}$	184	$E_v + 0,476$
5	$2,5 \cdot 10^5$	$2,55 \cdot 10^{10}$	980	$E_v - 0,529$

На рис. 1 представлена типичная спектральная зависимость фототока образца кремния с нанокластерами атомов марганца при различном удельном сопротивлении материала.

Как видно из рис. 1 начало фотоответа в зависимости от величины удельного сопротивления начинается при различных значениях энергии фотонов, значение фототока с увеличением удельного сопротивления образцов существенно меняется, а максимум наблюдается при  $\rho=5 \cdot 10^3$  Ом·см.

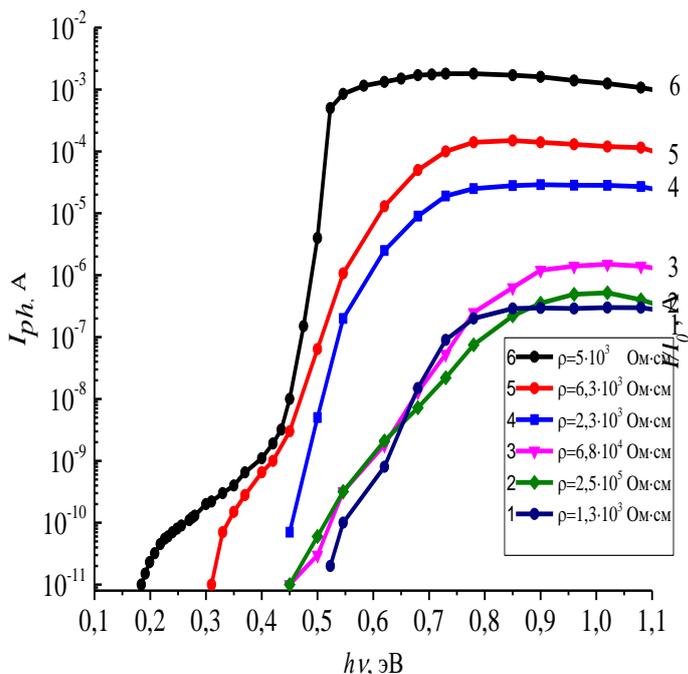
На рис. 2 показана типичная спектральная зависимость фототока образцов кремния с нанокластерами атомов марганца, измеренная в области «примесного» фототока при наличии электрического поля в образце  $6,5$  В/см.

Как видно из рисунка 2 фотоответ начинается при  $\lambda=10$  мкм ( $h\nu=0.12$  эВ). При этом наблюдаются три области спектральной чувствительности, которые существенно отличаются друг от друга:

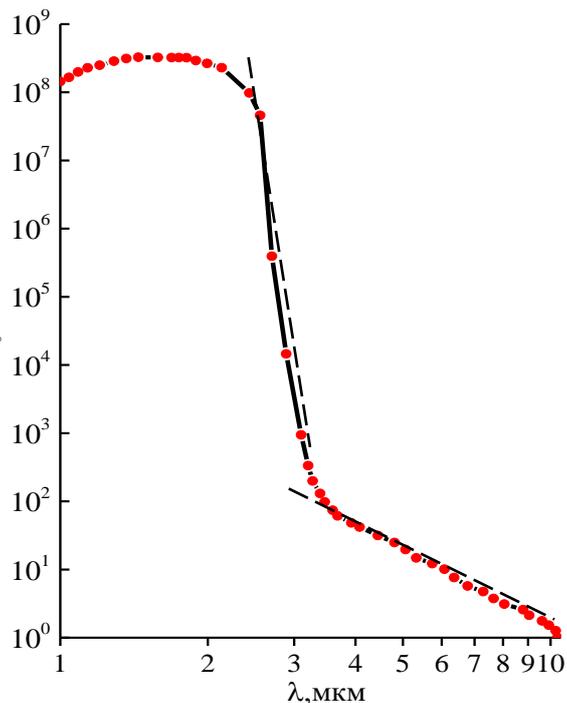
1. Первая область –  $\lambda=10 \div 3,1$  мкм ( $h\nu=0.12 \div 0.4$  эВ), в которой значение фототока монотонно увеличивается в указанной области спектра почти на два порядка.

2. Вторая область –  $\lambda=3,1 \div 2$  мкм ( $h\nu=0.4-0.6$  эВ), в этом диапазоне значение фототока увеличивается почти на 6 порядков, т.е. имеет место большое изменение фототока в интервале  $\Delta h\nu = 0.2$  эВ.

Третья область –  $\lambda=2.06\div 1.2$  мкм ( $h\nu =0.6-1$  эВ) фототок сохраняет аномально большое значение  $\sim 10^{-3}$  А и практически очень слабо зависит от значения энергии фотонов.



**Рис. 1. Спектральная зависимость фототока образца кремния с нанокластерами атомов марганца при различном удельном сопротивлении материала.**



**Рис. 2. Спектральная зависимость фототока образца кремния с нанокластерами атомов марганца, при T=100 К.**

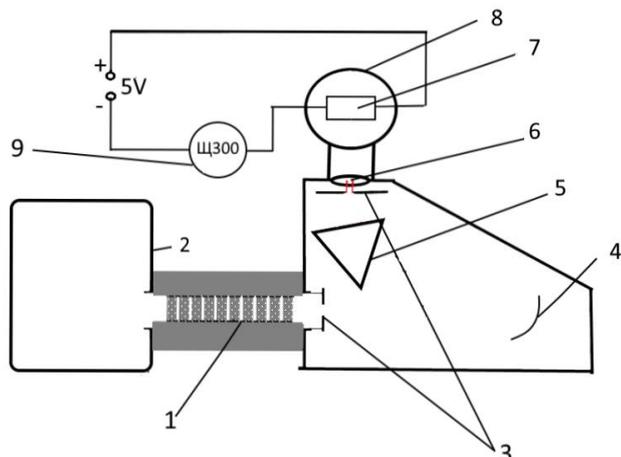
Для исследования пороговой чувствительности, интенсивность падающего света изменялась с помощью кремниевых фильтров, работающих как ослабители излучения.

На рис. 3 показана блок-схема прибора, на котором определялась пороговая чувствительность. Фильтры, располагались в металлическом корпусе, что позволило полностью устранять возможное попадание фонового освещения на исследуемый объект.

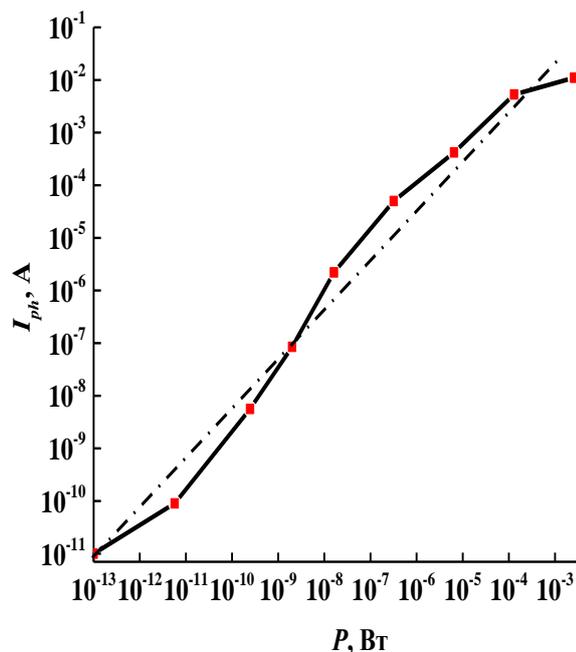
Как видно из рис. 4, в интервале мощности падающего излучения  $P = (10^{-11}\div 10^{-4})$  Вт/см<sup>2</sup>, значение фототока фоторезистора соответствует почти линейной зависимости от мощности, а отклонения, наблюдающиеся при  $P > 10^{-4}$  Вт, могут быть связаны с изменением пропускания первого фильтра за счет фонового освещения и излучения глобара.

Установлено, что фоторезистор на основе Si с нанокластерами атомов марганца имеет пороговую чувствительность порядка  $P \sim 10^{-11}$  Вт/см<sup>2</sup>.

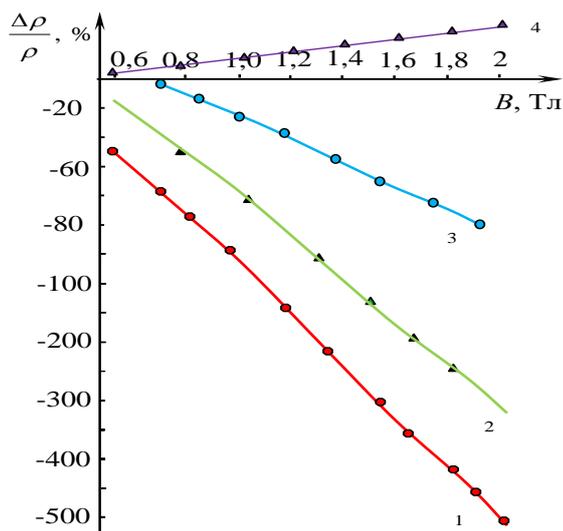
На рис. 5 показана зависимость магнитосопротивления от магнитного поля в образцах с нанокластерами. Из рис. 5 видно, что рост удельного сопротивления образцов, приводит к усилению эффекта ОМС и значение ОМС растет с ростом магнитного поля.



**Рис. 3. Блок-схема установки для определения пороговой чувствительности фоторезистора Si<B, Mn>. 1 - кремневые фильтры, 2 - корпус источника (глобар), 3 - окошко, 4 - зеркало, 5 - призма, 6 - линза LiF, 7 - фоторезистор, 8 - криостат, 9 – измеритель тока (прибор Щ-300).**

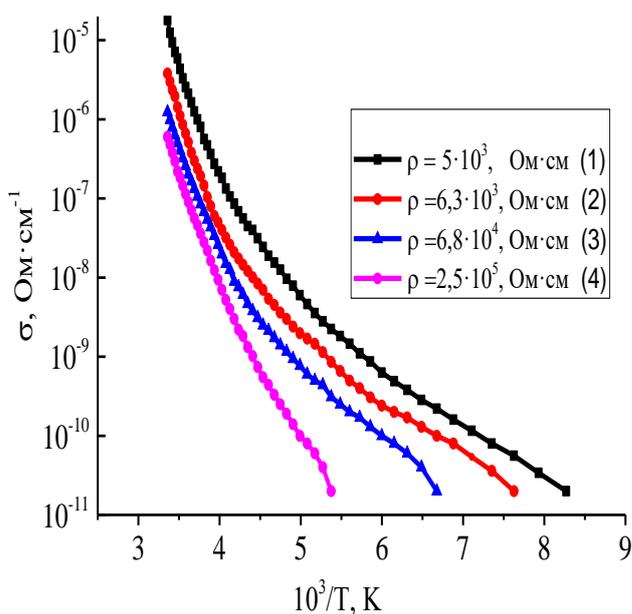


**Рис. 4. Зависимость фототока фоторезистора от падающей мощности излучения при  $h\nu=0,78$  эВ.**



**Рис. 5. Зависимость магнетосопротивления от магнитного поля в образцах с нанокластерами при  $E=100$  В/см,  $T=300$ К: 1 -  $\rho=5 \cdot 10^3$  Ом·см,  $p$ -тип, 2 -  $\rho=6,3 \cdot 10^3$  Ом·см,  $p$ -тип. 3 -  $\rho=6,8 \cdot 10^4$  Ом·см,  $p$ -тип, 4 -  $\rho=2,5 \cdot 10^5$  Ом·см,  $n$ -тип.**

Максимальное значение ОМС наблюдается в образцах с  $\rho=5 \cdot 10^3$  Ом·см при  $T=300$  К. При этом коэффициент чувствительности  $\alpha$  достигает 250 %/Тл. Таким образом, показано, что в образцах с нанокластерами наблюдается аномально высокое высокотемпературное ОМС (500%). На рис. 6 представлены зависимости проводимости от температуры образцов с различными удельными сопротивлениями с  $\rho=10^3 \div 10^5$  Ом·см. Из рисунка видно, что при увеличении удельного сопротивления материала зависимость  $\sigma(T)$  смещается в сторону более высоких температур, а зависимость становится как при собственной проводимости.



**Рис. 6. Зависимость проводимости от температуры образцов с различным удельным сопротивлением.**

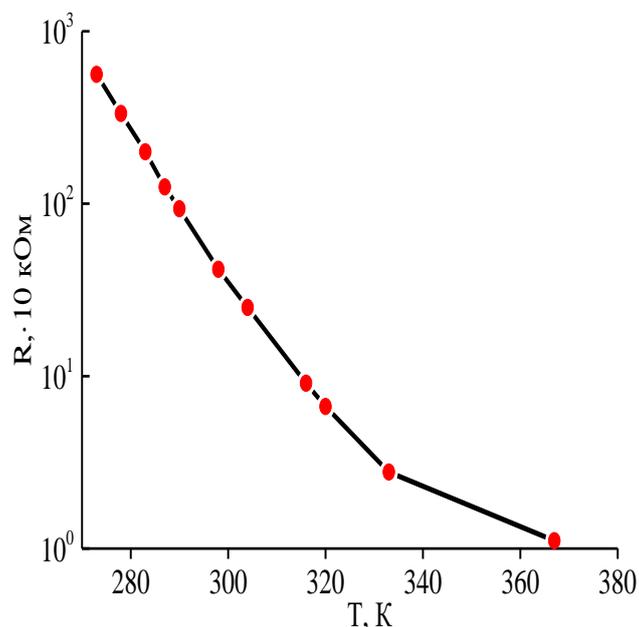
Для создания термодатчика был использован кремний с нанокластерами атомов марганца с удельным сопротивлением  $\rho=(5\div 8)\cdot 10^3$  Ом·см. Выбор такого материала был обусловлен тем, что эти образцы очень чувствительны к изменению температуры (табл. 3).

Для создания омических контактов к кристаллам кремния, легированного примесными атомами марганца с удельным сопротивлением  $\rho=(5\div 8)\cdot 10^3$  Ом·см использовали химическое осажденное никеля. Для герметизации термодатчиков использовался эпоксидный компаунд, имеющий в своем составе порядка 10 % сажи и 20 % оксида железа в качестве поглотителей излучения.

Более высокие концентрации пигментов приводят к появлению проводимости компаунда. На рис. 7 представлены температурные характеристики термодатчиков на основе Si<B,Mn> с  $\rho=5\cdot 10^3$  Ом·см.

Анализ полученных результатов показывает, что разработанные термодатчики на основе кремния с нанокластерами атомов марганца обладают высокой термочувствительностью. Чувствительность термодатчика составила  $\beta=8750$  в температурном интервале от 0 до 25 °С. Среднее значение сопротивления разработанных термодатчиков было около 5000 кОм. Быстродействие для всех разработанных термодатчиков было приблизительно одинаково и находилось в интервале 25÷40 секунд при  $\Delta T=25$  °С (табл. 3).

Анализ полученных данных показывает, что параметры разработанных термодатчиков значительно выше, чем у существующих аналогов. На рис. 8 показана схема подключения разработанного термодатчика и внешний вид термометра на основе полученного термодатчика Si<B,Mn>.



**Рис. 7. Зависимость сопротивления термодатчика Si<B, Mn> от температуры.**

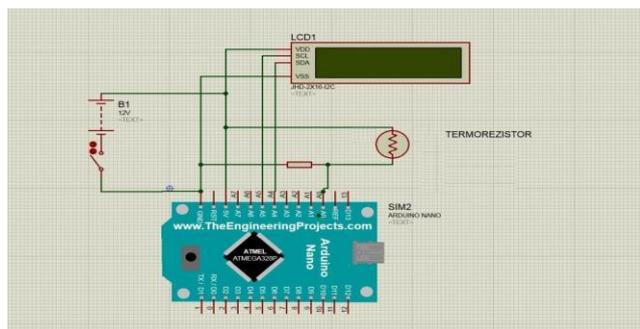


Рис. 8. а) Схема разработанного устройства на основе термодатчика (кремний легированный марганцем)



Рис. 8. б) Внешний вид термометра на основе полученного термодатчика

Таблица 3.

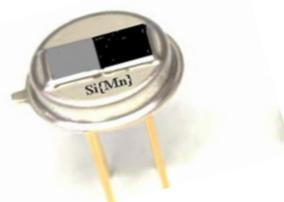
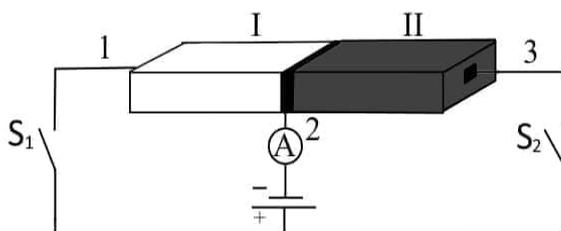
Параметры разработанных термодатчиков

Датчик	Параметры термодатчика				
	ТКС при температуре 20°C $\alpha_t$ , %/K	Температурная чувствительность $\beta$ , K	Быстродействие секунд	Размер мм <sup>2</sup>	Интервал температур °C
Si<B,Mn>	-3 %/K	8600 K	25-40	2x1	-150-100

В четвертой главе диссертации под названием «Резисторная структура на основе кремния с нанокластерами атомов марганца как многофункциональный датчик и определение её характеристических параметров» рассмотрено создание многофункциональных датчиков внешних воздействий, что представляет значительный научный и практический интерес. Разработка и создание многофункциональных (МФ) датчиков для измерения и контроля различных физических величин (температуры, освещения, электрического и магнитного поля) открывает возможности использования их во многих областях техники и народного хозяйства.

Для разработки и создания МФ датчиков нами был выбран образец размером  $8 \times 4 \times 0,9$  мм<sup>3</sup> кремния с нанокластерами атомов марганца с удельным сопротивлением  $5 \cdot 10^3$  Ом·см. На рисунке 9 схематически показана конструкция разработанного многофункционального датчика на основе кремния с нанокластерами атомов марганца. Левая половина датчика (область I) имеет контакты 1 и 2 и используется для получения сигнала, зависящего от освещения. На эту половину направляется измеряемый поток света. Правая половина датчика (область II) закрыта от освещения непрозрачным компаундом и дает сигнал, зависящий от температуры. Правая половина имеет контакты 2 и 3. Электрическая измерительная схема подключается всего тремя проводами, один из которых (контакт 2) может быть измерительной землей. Данные по измеренной температуре

используются для цифровой компенсации температуры в канале освещенности, для чего используется микроконтроллер ATmega328. Омические контакты 1, 2 и 3 к кристаллу кремния, легированного марганцем, создавались с использованием химического осаждения никеля из гипофосфитного раствора. Для увеличения адгезии никеля к поверхности кристалла, после никелирования датчики подвергались термоотжигу в вакууме при температуре 120 °С в течение 36 часов. Поверхностное сопротивление никелевого контактного слоя составляло 0.5÷0.8 Ом на квадрат.



а)

б)

**Рис. 9. а) Схематическая конструкция разработанного многофункционального датчика, б) Внешний вид разработанного многофункционального датчика на основе Si<B,Mn>.**

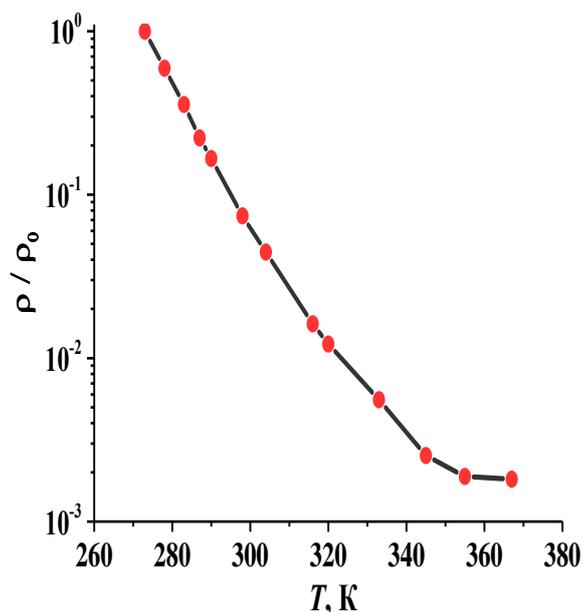
На рис. 10 представлена зависимость удельного сопротивления датчика от температуры  $\rho(T)$ . Для современного термодатчика основным параметром является коэффициент температурной чувствительности  $\beta$  который можно определить, экспериментально измерив удельное сопротивление терморезистора  $\rho_1$  и  $\rho_2$  при двух температурах  $T_1, T_2$ . 
$$\beta = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1} \cdot \ln \frac{\rho_1}{\rho_2}$$

Терморезисторная часть структуры датчиков полученных на основе кремния легированного марганцем Si<B,Mn> имеет следующие параметры: средний расчетный коэффициент температурной чувствительности  $\beta$  равен 6670 K<sup>-1</sup>, в интервале  $T=273 \div 315$  К он увеличивается до 8120 K<sup>-1</sup>.

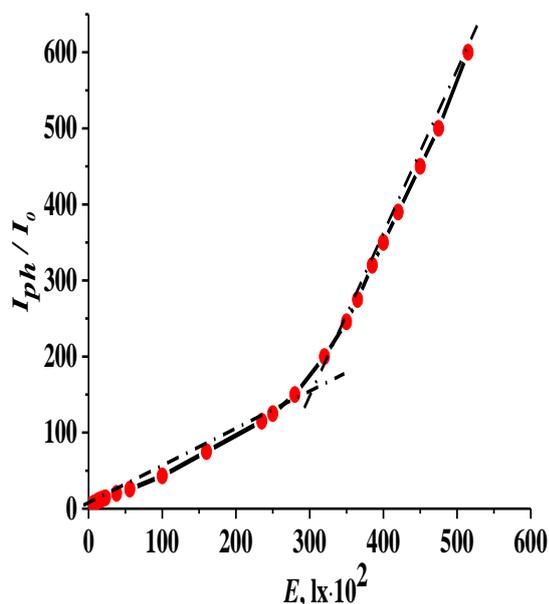
Нами было исследовано влияние освещения на параметры разработанных МФ датчиков, где фотоактивную часть составлял кремний с нанокластерами атомов марганца. Из рис. 11. видно, что световая характеристика фоторезисторной части датчика на основе p-Si<B,Mn> имеет нелинейные характер. То есть при изменении освещенности на одну и ту же величину фототок изменяется неодинаково.

Это объясняется изменением диффузионной длины носителей заряда при изменении степени заселенности рекомбинационных центров под действием увеличивающейся концентрации фотогенерированных носителей заряда.

Как видно из рис. 11, в фоторезисторной части структуры датчика имеют место аналогичные явления, то есть наблюдаются следующие участки.



**Рис. 10. Зависимость удельного сопротивления терморезисторной части датчика от температуры**



**Рис. 11. Световая характеристика фоторезисторной части разработанного датчика на основе p-Si <B, Mn>**

При малых уровнях освещённости до 350 lx имеется линейный участок  $I_{ph} \sim E^{1.5}$ , а в области освещенностей  $E$  больше 350 lx появляется суперлинейный участок световой характеристики  $I_{ph} \sim E^{2.7}$ . Для линейного участка световой характеристики была определена чувствительность ( $S$ ) датчика. Чувствительность датчика составила  $S \sim 2$  мкА/лх.

Нами также была исследована пороговая чувствительность фоторезисторной части датчика при температуре  $T=300$  К. Пороговая чувствительность фоторезисторной части датчика на основе p-Si<B,Mn> от интенсивности падающего света измерялась с помощью кремниевых фильтров, работающих как ослабители излучения.

Таким образом, использование до 5 фильтров последовательно позволило нам уменьшать мощность падающего излучения в интервале  $P$  от  $10^{-3}$  до  $10^{-7}$  Вт. Как видно из рис. 12, в интервале мощности падающего излучения  $P = (10^{-7} \div 10^{-3})$  Вт, зависимость фототока фоторезистора соответствует линейной теоретической, что подтверждает очень высокую достоверность полученных результатов исследования.

Нами также было создано устройство, показывающее функциональные возможности разработанных многофункциональных датчиков, на основе загрузки числовых значений выше указанных закономерностей в память микроконтроллера в табличной форме. Для этого устройства была специально разработана отдельная программа, на которую был получен патент **DGU**. На рисунке 13 показан вид изготовленного устройства на основе полученного многофункционального датчика Si<B,Mn> одновременно измеряющее интенсивность освещения и температуру.

В таблице 4 показаны основные технические характеристики разработанных многофункциональных датчиков на основе кремния с нанокластерами атомов марганца при  $T=300$  К.

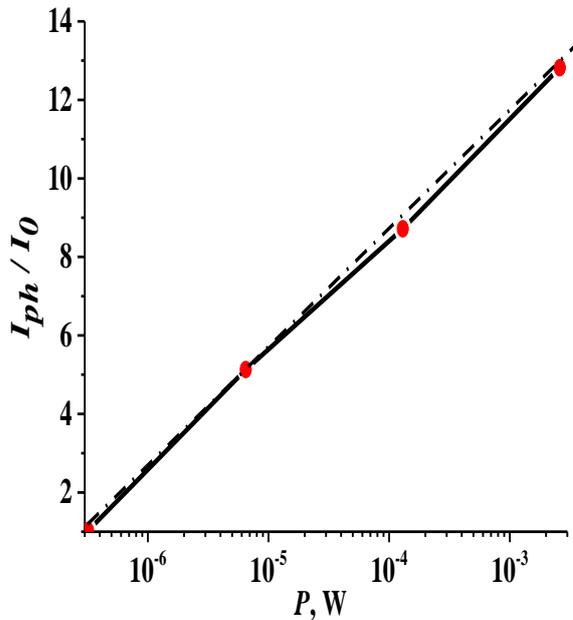


Рис. 12. Спектральная зависимость фототока фоторезисторной части датчика на основе p-Si <B,Mn> от мощности ИК-излучения при энергии квантов  $h\nu=0,78$  eV.

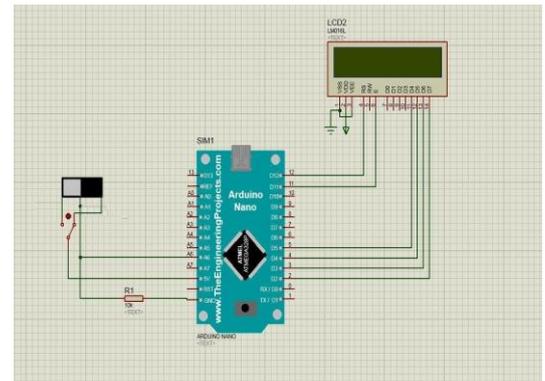


Рис. 13. Созданное устройство и схема подключения полученного многофункционального датчика Si<B,Mn>.

Таблица 4

Технические характеристики МФ датчика

№	Параметр	Значение
1	Напряжение питания	постоянное 12 - 24 В или 5 В
2	Погрешность	$\pm 0,5$
3	Тип датчика	Si<B,Mn>
4	Время установления рабочего режима, с	не более 5
5	ТКС при температуре 20°C $\alpha_t$ , %/К	-5 %/К
6	Температурная чувствительность $\beta$ , К	8600
7	Спектральный диапазон, мкм	1-4
8	Фоточувствительность при освещении светом с интенсивностью $E=350 \div 500$ lx, мкА/lx	2 мкА/lx
9	Рабочий диапазон температур T, °C	-100 ÷ 120
	Пороговая фоточувствительность P,	$\sim 10^{-7}$

	Вт	
11	Масса, кг	не более 0,4
12	Средний срок службы, лет	10

В заключении хочу выразить благодарность моему научному руководителю академику М.К.Бахадираханову и профессору Н.Ф.Зикриллаеву за данные полезные советы, а также всему коллективу кафедры «Цифровая электроника и микроэлектроника» ТашГТУ за помощь и поддержку оказанные при выполнении моей диссертационной работы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе исследований, проведенных в диссертационной работе, были получены следующие основные результаты, имеющие самостоятельное значение:

1. Получено отрицательное магнетосопротивление в кремнии при комнатной температуре с самым большим в мире наблюдаемым значением в 500% за счет улучшения технологии диффузии;

2. Определены температурные зависимости удельного сопротивления образцов  $\rho(T)$  с  $\rho=5 \cdot 10^3$  Ом·см (с некомпенсированной концентрацией дырок  $P_0 = 1,3 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>) с понижением температуры до  $T=100$  К, где удельное сопротивление образцов увеличивается почти на 5-6 порядков.

3. Установлен аномальный примесный спектральный фототок, это первое - существенное смещение начала фотоответа в сторону больших длин волн до  $\lambda=3,1 \div 10$  мкм ( $h\nu=0.12 \div 0.4$  эВ), второе – это непрерывное и существенное увеличение фототока в интервале  $\lambda=2 \div 3,1$  мкм ( $h\nu=0.4-0.6$  эВ), третье - аномально быстрый рост фототока в области  $\lambda=1.2 \div 2.06$  мкм ( $h\nu=0.6-1$  эВ), фототок сохраняет аномально большое значение  $\sim 10^{-3}$  А и практически очень слабо зависит от значения энергии фотонов;

4. Определено оптимальное удельное сопротивление материала  $5 \cdot 10^3$  Ом·см для создания многофункциональных датчиков физических величин на основе кремния с нанокластерами атомов марганца путем диффузионной технологии;

5. Разработана конструкция многофункционального датчика физических величин на основе одного единого кристалла кремния с нанокластерами атомов марганца.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 ON THE  
AWARDING SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF  
SEMICONDUCTOR PHYSICS AND MICROELECTRONICS AT THE  
NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN**

---

**TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

**IBODULLAEV SHAKHBOZ NIZOM UGLI**

**DEVELOPMENT OF HIGHLY SENSITIVE SENSORS OF PHYSICAL  
QUANTITIES BASED ON SILICON WITH NANOSTRUCTURES**

**01.04.10-Physics of semiconductors**

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

**Tashkent-2022**

The theme of the doctoral dissertation (PhD) was registered by the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under No. B2019.2.PhD/T1049.

Dissertation has been prepared at Tashkent State Technical University

The abstract of the dissertation is posted in three (uzbek, russian, english (resume)) languages on the website (ispm.uz) and the "Ziyonet" Information and educational portal at (www.ziyonet.uz).

**Scientific supervisor:**

**Bakhadyrkhanov Mukhammad Kabir Saidkhanovich**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician

**Official opponents:**

**Zainabidinov Sirojiddin Zainabiddinovich**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician

**Mamadaliyeva Lola Kamiljanova**

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

**Leading organization:**

**Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad Al-Khwarizmi**

The defense of the doctoral dissertation will be held on «4» 04 2022, at 10<sup>00</sup> at the meeting of the Scientific Council No. DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 on awarding scientific degrees of under Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics at the National University of Uzbekistan (Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Phone: (99871) 248-79-94, fax: (99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz).

The doctoral dissertation can be looked through in the Department of Digital Education Technology at the Institute (registered under No.38). Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Phone: (99871) 248-79-59, e-mail: info@ispm.uz.

The abstract of the dissertation was distributed on «16» 02 2022.  
(Registry record No. 38 dated «16» 02 2022).



**Sh.B. Utamuradova**

Chairman of the Scientific Council  
on Award of Scientific Degrees,  
Doctor of Physical and Mathematical  
Sciences, Professor

**J.J. Khamdamov**

Scientific secretary of the Scientific  
Council on Award of Scientific Degrees,  
Doctor of Philosophy (PhD)

**Kh.K. Aripov**

Chairman of the Scientific Seminar of the  
Scientific Council on Award of Scientific  
Degrees, Doctor of Physical and  
Mathematical Sciences, Professor

## INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

**The aim of the research work** is to determine the physical and technological foundations of the possibility of creating multifunctional sensors of physical quantities based on one single silicon crystal (temperature, lighting, magnetic fields).

**The object of the research work** is to create a multifunctional sensor, single-crystal silicon of the KDB-3 brand (boron concentration  $7 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) was selected. Manganese was chosen as an impurity.

**The subject of research** is the technological process of controlling the parameters and properties of nanoclusters of manganese atoms in the silicon crystal lattice, to create highly sensitive sensors of physical quantities.

**The scientific novelty of the research is as follows:**

The temperature dependences of the resistivity of the samples  $\rho(T)$  -  $\rho = 5 \cdot 10^3 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$  with decreasing temperature to  $T = 100 \text{ K}$  have been determined. The resistivity of the samples increases by almost 5-6 orders of magnitude.

An anomalous impurity spectral photocurrent has been established, this is the first - a significant shift of the beginning of the photoresponse towards large wavelengths up to  $\lambda = 10 \div 3.1$  microns ( $h\nu = 0.12 \div 0.4 \text{ eV}$ ), a threefold rapid increase in photocurrent in the region of  $\lambda = 3.1 \div 2$  microns ( $h\nu = 0.4 - 0.6 \text{ eV}$ ), where the photocurrent value increases by 7-8 orders of magnitude, the third - in the region of  $\lambda = 2.06 \div 1.2$  microns ( $h\nu = 0.6 - 1 \text{ eV}$ ), the photocurrent retains an anomalously large value of  $I_f 10^{-3} \text{ A}$  and practically very weakly depends on the value of the photon energy.

It was found that by changing the voltage in a silicon-based photoresistor doped with manganese atoms in the range of  $0.1 - 30 \text{ V}$ , it is possible to change the red border of the photoresponse of materials at  $T = 100 \text{ K}$  from  $\lambda = 4.6$  microns to 12 microns.

Negative magnetoresistance was found in silicon at room temperature  $T = 300 \text{ K}$  with the highest observed value of 500% due to improved diffusion technology. The possibility of creating a multifunctional sensor based on the effect of negative magnetoresistance in silicon is shown.

The optimal resistivity of the material of  $5 \cdot 10^3 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$  has been determined for the creation of multifunctional sensors of physical quantities based on silicon from nanoclusters of manganese atoms.

The possibility of creating a multifunctional sensor based on the effect of negative magnetoresistance in silicon is shown.

The design of a multifunctional sensor of physical quantities based on a single silicon crystal with nanoclusters of manganese atoms was developed.

The main parameters of the developed multifunctional sensors based on silicon with nanoclusters of manganese atoms and their sensitivity at  $T = 300 \text{ K}$  in the presence of external influences are determined.

**Implementation of research results.** The results of the study of highly sensitive sensors of physical quantities based on silicon with nanoclusters of manganese atoms obtained using diffusion technology were implemented as follows: The resistivity of the material of  $5 \cdot 10^3 \text{ Ohm}\cdot\text{cm}$  with impurity clusters of manganese atoms in silicon was introduced and used in production by FOTON Joint Stock Company (Reference No. 01/9-14-2420 joint stock company "Uzeltehsanoat" dated July 22, 2021). The application of scientific results makes it possible to obtain high-temperature semiconductor sensors of physical quantities with increased stability produced by FOTON JSC based on monocrystalline silicon with nanoclusters of manganese atoms.

The developed design of a multifunctional sensor of physical quantities based on a single silicon crystal with nanoclusters of manganese atoms was introduced and used in the joint stock company "FOTON" (Reference No. 345 of the joint stock company "Uzeltehsanoat" dated July 25, 2021). The obtained scientific results were applied in the development of completely new multifunctional sensors (temperature and lighting).

**Approbation of research results:** The main scientific results of the presented dissertation work were reported and discussed at 9 international and 7 republican scientific and practical conferences.

**Publication of research results:** On the topic of the dissertation, 24 scientific works were published, of which 9 articles in journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of the main scientific results of dissertations.

**The structure and scope of the thesis:** The presented dissertation work consists of an introduction, 4 chapters, a conclusion and a list of used literature of 94 titles.

**ЭЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**  
**I бўлим (I часть, part I)**

1. Бахадирханов М.К., Ибодуллаев Ш.Н., Зикриллаев Н.Ф., Ковешников С.В., Фоторезистор инфракрасного излучения на основе кремния с нанокластерами атомов марганца // Письма в ЖТФ. 2021. том 47. вып. 13. С.12-15. [**№3 Scopus Q3, IF = 1.7**]
2. Бахадырханов М.К., Илиев Х.М., Мавлонов Г.Х., Ибодуллаев Ш.Н., Тачилин С.А., Использование эффекта отрицательного магнитосопротивления в кремнии для создания многофункциональных датчиков // Письма в ЖТФ. 2021. том 47. вып. 19. С. 7-11. [**№3 Scopus Q3, IF = 1.7**]
3. Bakhadirhanova M.K., Isamova S.B., Ibodullaeva Sh.N., Koveshnikova S.V., and Norkulov N., Electric Field-Stimulated Photoconductivity in Silicon with Manganese Atom Nanoclusters in the Range of 3–8  $\mu\text{m}$  // ISSN 1063-7850. Technical Physics Letters. 2020. Vol. 46. No. 12. pp. 1192–1195. [**№3 Scopus Q3, IF = 1.7**]
4. Bakhadirhanova M. K., Isamova S. B., , Zikrillaeva N. F., Ilieva Kh. M., Mavlonova G. Kh., Koveshnikova S. V., and Ibodullaeva Sh. N., Functional Capabilities of Silicon with Nanoclusters of Manganese Atoms. // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2020. Vol. 56. No. 6. pp. 734–739. [**05.00.00. №14 Scopus. IF=1.2**]
5. Бахадирханов М.К., Ибодуллаев Ш.Н., Зикриллаев Х.Ф., Тачилин С.А. датчик температуры и освещенности на основе единого кристалла кремния // ПРИБОРЫ. 2021. № 8 (254). [**05.00.00. №63 IF=0,19**]
6. Movlonov G.H, Isomov S.B., Ibodullayev Sh.N., Shergoziyev Sh.B., Features of magnetic properties of silicon with magnetic nanoclusters. Semiconductor Physics and Microelectronics. 2019. Volume 1. Issue 6. pp. 15-19. [**01.00.00. № 16**]
7. Zikrillayev, N.; Tachilin, S.; and Ibodullayev, Sh. Highly sensitive ir photodetectors on the basis of silicon nanoclusters atoms of manganese // Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. 2020 Vol. 2: Iss. 5. Article 6. pp. 26-28. [**01.00.00. № 16**]
8. Бахадирханов М.К., Ибодуллаев Ш.Н., Махмудов С.Й., Усмонов Ж.И., Норкулов Н, Спектр энергетических уровней нанокластеров атомов марганца в кремнии // Доклад АНРУз. 2020. №2. С. 16-21. [**05.00.00. № 2**]
9. Бахадирханов М.К., Илиев Х.М., Исамов С.Б., Тачилин С.А., Зикриллаев Н.Ф., Ибодуллаев Ш.Н., Особенности фотоэлектрических свойств кремния с нанокластерами атомов марганца в области  $\lambda = 1,5...2,5$  мкм. // Приборы. 2019. № 10 (232) С. 52-55. [**05.00.00. №63 IF: 0,19**]

## II бўлим (II часть; part II)

10. Isamov S.B., Ibodullaev Sh.N. , Koveshnikov S.V. , Zikrillaev N.F., Makhmudov S.Y. // Photoelectric Properties of Silicon with Multiple Quantum Dots International Congress of The Turkic World on Health and Natural Sciences Kyrgyzstan-Turkey, Osh/Kyrgyzstan 21-23 April 2019 г. С. 214-216
11. Ибодуллаев Ш.Н. // Разработка и создание двух и трех функциональных датчиков внешних физических величин на одном кристалле Международная онлайн конференция «Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике» Ташкент 9-10 октябрь 2020 г. С. 50-52.
12. Ибодуллаев Ш.Н. Шергозиев Ш.Б. Абдуганиев Ю.А. Махмудов С.Й. Каримов А.С. // Особенность электрических свойств кремния с нанокластерами атомов марганца для фотоэлементов. Международная научно-техническая конференция: «Тенденции развития альтернативной и возобновляемой энергетики: проблемы и решения» Ташкент 2021-год 17-18 май С. 277-275
13. Ибодуллаев Ш.Н., Октябров А., Алпомишов Ж.Х., Шукуров Э., Юлдашев Б.Р., Мамарасулов К.Ш. // Новый материал на основе кремния с нанокластерами для фотоэнергетики, Международная научно-техническая конференция: «тенденции развития альтернативной и возобновляемой энергетики: проблемы и решения» Ташкент 2021-год 17-18 май С. 108-110.
14. Ибодуллаев Ш.Н, Махмудов С.Й. Абдуллаева Н. Жураев О.Ш., Абдуллаева Д., Шомилова Ш., Абдуганиев Ю.А. Каримов А.С. // Фотомангнитный эффект кремния с нанокластерами атомов марганца. «Физика фанининг техника соҳасидаги тутган ўрни» Республика илмию-амалий конференция Материаллари, Нукус 2021 йил 28 май С. 109-111.
15. Ибодуллаев Ш.Н, Абдуллаева Н.// Возможности создать интегральные датчики на эффекте отрицательного магнитосопротивления в кремнии Международной научной конференции «Тенденции развития физики конденсированных сред» Фергана 25-май 2020 г. С. 223-226
16. Ибодуллаев Ш.Н, Турсунов О.Б., Абдуллаева Д, Абдуганиев Ю.А., Махмудов С.Й. // Исследование световых характеристик фоторезисторов на основе кремнии с наноструктурами «тенденции развития физики конденсированных сред» Международной научной конференции, Фергана 25-май 2020 г. С. 221-223
17. Ибодуллаев Ш.Н., Исамов С.Б., Тачилин С.А., Абдуганиев Ю.А., Усмонов Ж.И. // Разработка приборов на основе кремния с нанокластерами марганца и свойствами лавиннопролётных диодов. Международная онлайн конференция «Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике». Ташкент 9-10 октябрь 2020 г. С. 50-52
18. Ибодуллаев Ш.Н., Абдуганиев Ю.А., Юлдашев Б.Р., Мамарасулов К.Ш., Пазилова Ш.А // Квантовая эффективность фоторезисторов кремния с нанокластерами атомов марганца. замонавий микроэлектрониканинг ривожланишида фан, таълим ва инновация интеграцияси республика илмий-услубий анжумани Андижон 2020 йил, 24-25 декабрь. С. 227-228

19. Бахадирханов М. К., Мавлонов Г. Х., Исамов С. Б., Ибодуллаев Ш.Н., Турсынбаев С. А., Каримов А. С // Новое поколение многофункциональных датчиков физических величин. Замоновий микроэлектрониканинг ривожланишида фан, таълим ва инновация интеграцияси республика илмий-услугий анжумани Андижон 2020 йил, 24-25 декабрь. С. 220-222
20. Ибодуллаев Ш.Н., Зикриллаев Н.Ф., Исамов С.Б., Тачилин С.А., Турсунов М.О.// Особенности фотоэлектрических свойств кремния с нанокластерами атомов марганца в области  $\lambda=1,5-2$  мкм Республиканская конференция по физической электронике и фотонике Ташкент 23 октября, 2019 С. 56-58.
21. Ибодуллаев Ш.Н., Илиев Х.М., Зикриллаев Х.Ф., Аюпов К.С, Мавлонов Г.Х., Шергозиев Ш.Б. // Аномальное высокое отрицательное магнетосопротивление (омс) кремния с магнитными нанокластерами, Республиканская конференция по физической электронике и фотонике, Ташкент 23 октября, 2019 г. С. 69-71
22. Тачилин С.А., Ибодуллаев Ш.Н., Бегимов О.М. // Разработка универсального прибора для измерения параметров полупроводниковых материалов. Республиканской научно-технической конференции «Актуальные проблемы энергосбережения при использовании альтернативных источников энергии» Карши 28-29 апрель 2017г.С. 305-307
23. Содиков У.Х., Саидахмедов Ш.А., Бобоев Х.С., Ибодуллаев Ш.Н., Бегимкулов О. // Новое технологическое решение позволяющее существенно расширить спектральную чувствительность кремниевых фотоэлементов, «Замоновий физиканинг долзарб муаммолари» Термиз, 2017-йил 19-20-май С. 46-45
24. Исамов С.Б., Ибодуллаев Ш.Н., // Аномально глубокое инфракрасное самогашение фотопроводимости в кремнии с многозарядными кластерами марганца в области энергии квантов 0,3 – 0,8 эВ «Қайта тикланувчи энергия манбалари ва барқарор атроф муҳит физикаси» Республика илмий техникавий анжуман Карши 2019 г. 24-25 апрель.



Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали тахририятида тахрирдан ўтказилди ва ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнларини мослиги текширилди (14.03.2022).

Бичим 60x841/16. Рақамли босма усули. Times гарнитураси.

Шартли босма табағи: 3. Адади 60. Буюртма №33

Гувоҳнома reester № 10-4434

Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти  
босмахонасида чоп этилган.

Босмахона манзили: 100057, Тошкент ш., Янгиолмазор кўчаси 20-уй

